

·特约综述·

DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2021D098

# 泛非构造及其在中国大陆和邻区的表现\*

任留东, 王浩

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘要:** 发端于非洲、进而扩展到整个冈瓦纳古陆, “泛非构造”是发生在新元古代晚期-早古生代期间、主要分布在冈瓦纳古陆范围内的构造-热事件, 其表现既有陆块或板块间的缝合、碰撞, 也有古老造山带的重新活化。泛非构造之后冈瓦纳得以形成, 同时伴随其他大陆的裂解和全球海平面上升, 并可在全球范围内形成早古生代的重要不整合。如今, 中国大陆, 直至亚洲、亚欧, 陆续识别出一些泛非期构造的记录, 如中国东北地区兴凯地块、佳木斯地块和布列亚地块, 显示典型的泛非期变形-变质作用和花岗岩活动; 其他一些地块和造山带亦显示泛非构造的影响, 如华夏地块、塔里木地块以及青藏高原、中央造山带和中亚造山带, 均有泛非期构造或事件的显示。中国境内几乎所有的早古生代造山带、部分的地块亦有泛非期事件或构造的记录。泛非期构造的影响几乎波及到了全球所有大陆, 该事件的发生可能是多中心的。亚欧地区的泛非期记录可能源自冈瓦纳周缘的早期裂解、边缘陆块和造山带。泛非期构造的活动基本限于中、下地壳, 可能是板内为主的一种过程, 并与引张、剪切活动有关, 而不同于狭义冈瓦纳内水平方向的挤压、拼贴。泛非期热事件记录或花岗岩侵位常常发生在新元古代早期片麻岩之中, 并在泛非期记录之后可发生更为剧烈的加里东期构造, 即加里东构造活动对泛非构造有很好的继承性。与泛非期记录有关的活动区可有相对稳定区与活动带的区分, 并相间分布, 两者在沉积建造、不整合性质、构造变形强度、变质作用、火山类型和岩浆作用均有显著区别。泛非构造与现代板块机制的活动密切相关。板块运动中会造成泛非构造带的俯冲、淹没或剥蚀, 可能有隐藏或消失了的泛非构造带。冈瓦纳古陆内的泛非构造带容易成为后期中-新生代大陆裂解的部位, 如大西洋的形成。

**关键词:** 泛非构造; 格林威尔期构造; 花岗岩; 不整合; 大陆裂解; 冈瓦纳

**中图分类号:** P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2023) 01-0001-33

## The Pan-African event and its manifestation in the China continent and adjacent regions

REN Liudong, WANG Hao

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** The Pan-African event was a tectonic-thermal event initiated in Africa and later developed to the whole Gondwana ancient continent in the period of late Neoproterozoic to early Paleozoic with

\* 收稿日期: 2021-12-14

录用日期: 2021-12-20

网络首发日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(41941004); 中国地质调查局项目(DD20190358, 20190370, 20190448, 20221648, 20221645)

作者简介: 任留东(1964年生), 男; 研究方向: 变质地质及南极地质; E-mail: ldren@cags.ac.cn

任留东, 研究员, 博士生导师。长期从事南极地质和变质地质研究, 曾参加中国第七、九、十五和二十一次共4次南极科学考察。在南极首次发现硅硼镁铝矿及有关的硼硅酸盐矿物组合, 并纠正了西方学者对柱晶石的错误鉴定(误认为电气石); 发现并报道了氟磷镁石的一种新多型结构(Wagnerite-Ma5bc, 空间群Ia)。获得中华人民共和国人力资源和社会保障部暨国家海洋局联合颁发的“中国极地考察先进个人”荣誉称号(2017)。主持多项国家自然科学基金和中国地质调查项目, 现任“极地研究”副主编和中国地质学会变质学专业委员会委员。

manifestations of suturing and collisions between plates and rejuvenating of ancient orogenic belts. After the Pan-African event, the Gondwana finally consolidated and formed, accompanying the breakup of the other continents on the globe at that time, the sea level rose and resulted in important unconformities on the earth in the Cambrian. Now the Pan-African records have been widely recognized in almost all the early Paleozoic orogens, the continents of China, Asia, and even in some parts of Europe. The Khanka, Jiamusi, and Bureya blocks in NE China have shown typical Pan-African features such as high-grade metamorphism and voluminous granites. Major orogenic belts, like the Tibetan, Central orogen, and Central Asian Orogen, and blocks such as the Cathaysia block, and Tarim blocks also demonstrate the Pan-African effects. Furthermore, the event might have affected all the major continents on the earth with multiple centers. The records of the Pan-African event in Eurasia might result from the initial breakup, marginal blocks, or orogens of Gondwana. The activities in the peri-Gondwana realm were generally confined to the middle or lower crust. The event was possible an intraplate process with extensional and shear activities, but not simply horizontal compression or accretion in the Gondwana *sensu stricto*. Granites or demonstration of the Pan-African event can be found in granitic gneisses of the early Neoproterozoic (Grenville period). The event was followed by the stronger Caledonian movement. Most domains related to the Pan-African event can be subdivided into relatively stable regions and active zones which are alternatively distributed. They show contrasts in sedimentary formation, volcanism, un- or disconformity feature, deformation intensity, metamorphism type and grade, and magmatism activity. Pan-African orogeny has intimate relations with modern plate tectonic regime. Some Pan-African belts may be subducted, submerged, or exhumed in the plate movement, that is, some belts may be concealed or perished. Finally, the Pan-African belts may be the subsequent breakup positions of the continents, such as the formation of the Atlantic Ocean.

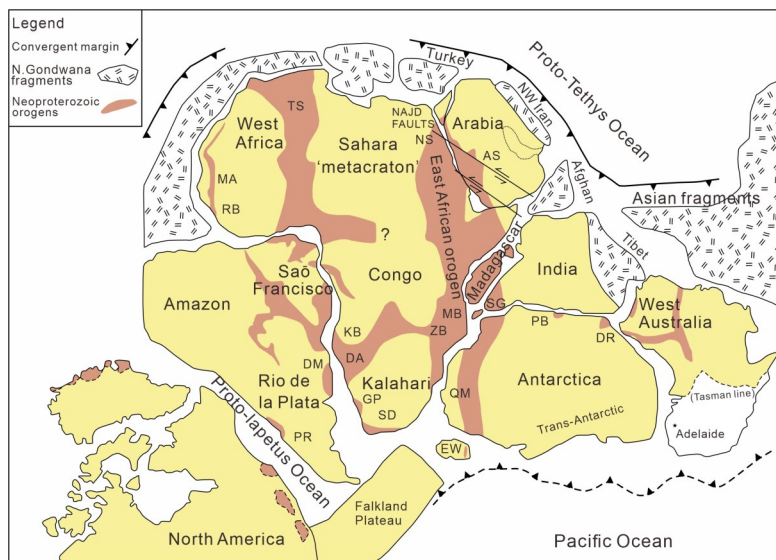
**Key words:** Pan-African structure; Grenville structure; granites; unconformity/disconformity; continent breakup; Gondwana.

泛非构造是讨论冈瓦纳古陆形成时绕不开的话题。近年来,我国越来越多的地质单元,特别是构造带中泛非时期的构造迹象报道逐年增加,经常涉及到研究对象曾属于冈瓦纳哪个陆块的问题,如位于冈瓦纳内部、边缘?而且,现有研究表明,亚洲大陆或者亚欧大陆的形成,与冈瓦纳大陆有着密不可分的联系。因此,通过泛非期构造的识别和事件性质的研究,对于理解亚欧大陆中不同部分与冈瓦纳的最初联系、不同地质单元之间的地质对比、又是如何运移至目前的位置,都是非常关键和重要的。本文拟通过泛非构造在冈瓦纳古陆本身表现的综述,对比分析亚欧大陆特别是中国境内同时期构造发生的机制,从而可以从全球角度探讨中国大陆在前寒武纪晚期至古生代初期的一些演化过程。

## 1 泛非构造的概念

冈瓦纳古陆是元古宙、显生宙之交形成的一个超级古陆,包括了地球上近半数的古陆块,如

非洲、南美洲、澳大利亚、南极洲和印度大陆。提到冈瓦纳的形成,必然涉及到泛非事件或构造。Kennedy(1964)<sup>[1]</sup>基于对非洲大陆大量、可靠的Rb-Sr和K-Ar同位素年龄数据统计发现,在约500 Ma前有一次明显的“热事件”,但并不了解该事件的性质,遂称之为“泛非事件”。后来人们逐渐认识到,该时期非洲大陆出现了一系列围绕古老克拉通的活动带,与之有关的显著的构造运动即称作“泛非造山运动”(Pan African orogeny),发生时间不限于500 Ma左右,而是介于~750 Ma至~530 Ma期间、至少有2幕的造山运动<sup>[2]</sup>,或者650~550 Ma、600~500 Ma或870~500 Ma的多幕活动、以构造-热事件为主要形式的地壳运动<sup>[3]</sup>(图1),从而导致冈瓦纳超级古陆的形成。南美的巴西利亚造山运动(Brasiliano orogeny)与之时空分布及运动性质颇为相近,故又统称巴西-泛非事件。对应泛非事件,不同区域出现了不同的名称,如南美的Brasiliano事件、澳大利亚的Adelaidean事件、南极洲的Beardmore事件。这一概念还被扩大



AS-Arabian Shield; BR-Brasiliano; DA-Damara; DM-Dom Feliciano; DR-Denman Darling; EW-Ellsworth-Whitmore Mountains; GP-Gariep; KB-Kaoko; MA-Mauritanides; MB-Mozambique Belt; NS-Nubian Shield; PM-Petermann Ranges; PB-Prydz Bay; PR-Pampean Ranges; PS-Paterson; QM-Queen Maud Land; RB-Rokelides; SD-Saldania; SG-Southern Granulite Terrane; TS-TransSahara Belt; ZB-Zambezi Belt.

图 1 新元古代末期冈瓦纳及邻近陆块泛非造山带的主要分布(据 Kröner and Stern, 2004<sup>[3]</sup>修改)

Fig. 1 Map of Gondwana at the end of Neoproterozoic time

showing the major distribution of Pan-African belts (modified after Kröner and Stern, 2004<sup>[3]</sup>)

至整个冈瓦纳古陆, 是一次晚前寒武纪至寒武纪非洲大陆乃至整个冈瓦纳大陆的构造运动<sup>[4-5]</sup>。泛非运动可用来表示冈瓦纳大陆其他部位的运动, 但在北美或亚洲同时期的运动一般不用此术语。为对比直观, 本文中对亚洲大陆或其他陆块此间的运动称之为“泛非期事件或构造”。

由于巨大的地理分布和较大的时间跨度, 泛非运动不能当作一个单一的造山运动, 而是一个时间较长的造山旋回, 包括巨大洋盆的开-合、大陆的增生和碰撞, 特别是冈瓦纳大陆块体的拼贴。一般, 泛非运动指完整的造山旋回, 而泛非事件仅指该旋回的末期活动, 有时泛非运动亦被指末期活动。泛非运动在新元古代晚期冈瓦纳超大陆形成过程中达到顶峰。现在, 泛非造山运动这一术语往往用于描述新元古代-古生代初期曾属冈瓦纳古陆地壳的构造、岩浆和变质活动, 多表现为在冈瓦纳古陆内部形成的活动带。由于泛非运动在时间跨度、构造性质上具有较大的不确定性, 当一个地区构造运动具有较好的限定时, 可以用更为准确或局部的地名来替代“泛非运动”的名称。时间上, 泛非造山运动对应于欧洲中-西部、即冈瓦纳古陆周边的(700~540 Ma) Cadomian 运动

和 Avalonian 造山运动, 这些部位碰撞造山不明显<sup>[6]</sup>。

冈瓦纳可分为东、西冈瓦纳两部分。其中东冈瓦纳包括非洲东部、阿拉伯-努比亚地盾、塞舌尔群岛、印度、马达加斯加、斯里兰卡、东南极和澳大利亚, 西冈瓦纳则包括非洲大部 and 南美洲。冈瓦纳泛非旋回若采用 2 期的主要造山运动幕<sup>[2]</sup>, 其中可识别出早期幕, 即~750 Ma 至~620 Ma 期间阿拉伯-努比亚地盾中的岛弧聚合, 以及晚期幕沿东部非洲(肯尼亚-坦桑尼亚及以北的非洲地区)与其他陆块(尚未联结的塞舌尔群岛、印度、马达加斯加、斯里兰卡、东南极)之间陆-陆碰撞活动。参照 Stern(1994)<sup>[7]</sup> 的提法, 前者可称为东非造山带(Eastern African Orogen), 包括其中的 NS 走向的莫桑比克带。Goscombe 等(1998)<sup>[8]</sup> 意识到, 较早的造山运动可能与东冈瓦纳的形成无关。晚期幕发生于~570 Ma 至~530 Ma 之间, 即澳大利亚、部分南极洲及东非造山带中的一些碎块之间的斜向碰撞<sup>[2]</sup>, 根据 Meert 等(1995)<sup>[9]</sup> 的意见, 可称为 Kuunga 造山带(Kuunga Orogen)。紧随该造山运动, 沿着古太平洋边缘, 即南极横贯山脉和东澳塔斯曼线(Tasman Line)于~500 Ma 发生的俯冲作

用形成 Ross-Delamerian 造山带<sup>[10-11]</sup>。

在泛非构造中,大体可识别出两种类型的造山带或活动带<sup>[3]</sup>。一种类型主要为新元古代壳岩和岩浆岩(多数具有初生地壳,即地幔来源特征),其构造-变质演化与显生宙碰撞、增生带的特征相似,这些活动带剥露其中-上地壳层次,包括特定的组合如蛇绿岩套、与俯冲或碰撞有关的花岗岩、岛弧或被动大陆边缘组合,以及一些外来地体,从而可以采用显生宙的板块模型来重建其演化,包括像阿拉伯和非洲东北部的阿拉伯-努比亚地盾等。这些周边造山带位于聚合后超级古陆的外缘,随着内大洋边缘于 820~800 Ma 期间的俯冲而开始其造山活动;外缘扩张型大洋因板片自俯冲位置后退而形成多种多样的岛弧、弧后盆地,大量的约 600 Ma 内硅铝壳岩浆活动出现,伴随同构造低级变质火山-沉积序列、弧内和弧间裂谷、局部以走滑为主的变形、有限的隆升、与后期序列之间呈局部角度不整合。

另外一种活动带一般包括经过多期变形的高级变质组合,出露中-下地壳层次,其成因、形成环境及构造演化更难恢复。原岩组合主要为较老的中元古代-太古宙陆壳岩石,并在泛非构造期间强烈活化。研究较好的例子有东非的莫桑比克带(包括马达加斯加,并可向南延至东南极的毛德皇后地、西南极东北端)<sup>[3]</sup>。在超级古陆聚合过程中,内部造山带开始于 850~800 Ma 的 Cordillera 型俯冲、内大洋缩小,直至 650~600 Ma 陆-陆碰撞后消失,形成大量的钙碱性花岗岩类,强烈地壳增厚、大规模逆冲、中-高级变质岩隆起,与后期序列之间呈大范围角度不整合<sup>[6]</sup>。

洋壳(洋盆)物质的传输或沿陆壳深部低速层的滑动造成聚敛部位的抬升和离散位置的下沉<sup>[3]</sup>,第一种活动带未必对应板块边界,亦可是陆壳内物理性质(如强度、密度,甚至厚度)明显不同的两种域之间的界面;第二种活动带也不一定是洋中脊,仅是陆内裂隙或裂谷的活动,同样可以造成扩张、下陷,形成不整合,造成泛非活动板内型和边缘型的区别,并引起泛非构造的复杂性。

综上所述,泛非构造是发生在元古宙和显生宙之交、基本限于冈瓦纳古陆范围内的构造运动,表现为强烈的变形-变质和花岗岩侵位,这些构造带有洋盆闭合、裂谷封闭以及古老造山带的重新活化,造山带固结之后冈瓦纳得以形成。

## 2 泛非构造带的主要表现

### 2.1 南美泛非构造带

同为冈瓦纳古陆的一部分,南美大陆和非洲大陆在泛非构造之前即连在一起,更有人指出,南美地台的 N-NW 部由 Laurentia 古陆、E-SE 部由冈瓦纳古陆的基底组成<sup>[12]</sup>。南美与非洲在地层、构造带、古生物和冰川作用等方面完全一致,甚至主要金属成矿带也能互相衔接。在南美地台上最早的磨拉石是巴西利亚运动(Brasiliano orogeny, 850~490 Ma, 主期幕为 650~600 Ma)的产物,以圭亚那地盾的皮拉波拉群(Pirapora)(晚前寒武纪到早古生代)为代表。南美地台的侧翼均被晚前寒武纪-古生代的变质岩和侵入岩形成的造山带所围绕,冈瓦纳部分的巴西利亚运动以强烈褶皱为主,有同褶皱期的花岗岩和酸性、基性岩脉或岩墙侵入,其延伸方向与构造线的走向一致。可识别出 Goias 岩浆弧(890~800 Ma; 670~620 Ma)和 São Gabriel(~750 Ma)岩浆弧<sup>[12]</sup>。或者说经历了>670~595 Ma 构造前、620~550 Ma 同构造和 560~490 Ma 构造后的活动<sup>[13]</sup>,有证据表明,该碰撞事件具有先后不同的演化过程:630~590 Ma 碰撞、615~560 Ma 热流高峰,随后是持续到 540~490 Ma 的板片拆离、软流圈上涌、地幔板底垫托并保持长期(近 100 Myrs)高热流状态。根据 Paixão 等(2008)<sup>[14]</sup>,南美 Araguaia 带的演化记录了一个完整的威尔逊旋回,自 750 Ma 的裂谷至最后 500 Ma 的碰撞后活动,表明南美 Araguaia 带与非洲 Rokelides 带的高级片麻岩同时形成。

### 2.2 非洲西部的泛非构造带

在泛非期,西冈瓦纳主要表现为陆块的汇聚及岩浆弧的形成,出现缝合线,尤其是可以出现榴辉岩,即具有典型的碰撞特征。在非洲西部,泛非事件的结束表现为从与俯冲-岛弧有关的岩浆作用转变为构造后的碱性岩浆作用<sup>[15]</sup>,其后显生宙的加里东、海西和阿尔卑斯运动仅限于非洲北端。根据自西向东的记录变化,在非洲纳米比亚 Kaokoan 造山带经历了~590 Ma 时期 EW 向缩短和 550~530 Ma 时 NW-SE 方向的走滑; Damara 造山带先是 555~550 Ma 的 NW-SE 向、继而 512~508 Ma 时 NE-SW 向缩短,最后,在~505 Ma,均显示 N-S 向拉张应力(或上涌状态)及其伴随的造山带核部的高热、降压熔融以及变质核杂岩的形成<sup>[16]</sup>。

Khomash盆地要么是Congo和Kalahari克拉通之间的陆内裂谷, 要么是该裂谷之后~700 Ma裂解的小洋盆, 并于555~550 Ma关闭<sup>[17]</sup>, 即较小规模的扩张和闭合。Congo克拉通的SW边缘是断续的新元古代被动陆缘、深海浊积盆地。没有典型的俯冲, 仅有向两侧的对冲或花状构造。Damara造山带中的南部边缘, 具有Uis-Pass缝合带和肢解了的蛇纹岩, 增生楔、深海浊积岩, 具有Congo克拉通源区, 洋盆不宽, 具有北部Congo克拉通源区的沉积, 强烈剪切序列具有Kalahari源区特征, 并沉积于被动裂谷边缘(前陆盆地)。

Damara造山系统相当于冈瓦纳内部的一个三联点的位置, 分别由Kaoko(590~535 Ma), Damara(555~505 Ma)和Gariiep造山带组成, 没有明显的裂开, 形成凹陷、裂谷, 但未能发展成为典型的洋盆, 随后挤压作用形成泛非期的收缩构造, 但缺少加里东期活动。由于缺少俯冲板片的牵引, 陆内裂谷模型不能提供有效的收缩机制, 这种收缩需要555 Ma前冈瓦纳边缘的远距离碰撞提供动力。(小)洋盆自身难以闭合, 其收缩需要外部应力, 因此, 构造带显示特征的挤压、收缩和隆升过程, 但未必有典型的俯冲或碰撞性质。Damara造山带中部还可产出早期的花岗片麻岩(1 028 Ma)<sup>[17]</sup>。

### 2.3 东非造山中带的泛非构造显示

沿东非造山带的泛非构造具有复杂的组成和性质<sup>[18-19]</sup>, 再向东, 即为东冈瓦纳。东冈瓦纳, 经过1.85 Ga和1.60 Ga造山带的聚合、格林威尔(Grenville)期前的有限裂谷-收缩和之后泛非期的固结, 最后形成较为稳定的超级古陆(东冈瓦纳), 即东冈瓦纳的活动-固结经过多个旋回才得以完成。

塞舌尔群岛、马达加斯加的花岗岩(800~700 Ma)与印度西北部Abu花岗岩(锆石结晶年龄, (765±5) Ma<sup>[20]</sup>), 共同组成岩浆弧<sup>[21-22]</sup>, 该岩浆弧在马岛、印度之间形成的一些新元古代微陆块已有部分消失。Abu花岗岩变质程度达角闪岩相, 其中角闪石给出<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄(509±2) Ma, 认为该变形对应晚泛非期碰撞、冈瓦纳聚合后的造山带垮塌<sup>[20]</sup>, 泛非构造表现为早期构造的重新活化。

### 2.4 印度次大陆的泛非造山带

印度南端Nagercoil地块给出2.1~2.0 Ga、(1 877±24) Ma的岩石年龄和独居石、变质锆石边缘给出~560 Ma的变质年龄<sup>[23-24]</sup>。斯里兰卡于

2 100~1 765 Ma侵位的花岗岩、与之互层的表壳岩(老于2 100 Ma, 甚至可与华北克拉通北缘孔兹岩对比)均受到了约540 Ma泛非期不同程度的同位素重启或铅丢失, 全岩Sm-Nd同位素体系被严重扰动<sup>[25]</sup>。

印度东高止地构造带(The Eastern Ghats Belt)的主要变质事件为格林威尔期, 并局部出现断续发生于850~650 Ma期间的热事件, 而普遍存在的是550~500 Ma的泛非构造, 是在早期构造(如格林威尔造山带)基础上的重新活化, 东高止地于泛非期整体向西逆冲至印度克拉通之上<sup>[26]</sup>。差异上升陆壳的深部较易受泛非构造影响, 说明泛非构造主要记录在中、下地壳层次。印度东北端邻近喜马拉雅造山带的Shillong高原具有泛非事件记录<sup>[27]</sup>。

印度半岛附近的斯里兰卡(构造线或片麻理总体走向西凸<sup>[28]</sup>)顺时针旋转了90°, 复原后可与东南极Rayner杂岩<sup>[28]</sup>构造线一致, 对此支持资料有南极Lützow-Holm湾北部与斯里兰卡东部(Vijayan Complex)的岩石, 这些部位同属约1 Ga前岩浆弧的一部分, 并经受了泛非构造的强烈叠加<sup>[29]</sup>。所有的冈瓦纳复原模型中, 都把斯里兰卡置于印度的最南端<sup>[3]</sup>(如图1), 但是斯里兰卡最主要的岩石记录是格林威尔期<sup>[28-29]</sup>, 而印度南端恰恰缺少这些岩石, 并表现为古元古界基础上的泛非期叠加<sup>[23-25]</sup>。考虑到复原后与南极Rayner杂岩构造线的一致性, 以及后者主体为格林威尔期活动<sup>[28]</sup>, 斯里兰卡置于东高止地东侧可能更为合适, 即斯里兰卡、印度东高止地、南极普里兹湾(Prydz Bay)及西澳, 直至印度东北端的Shillong高原, 形成一个印度东部泛非带。当然, 这需要进行进一步的工作。

### 2.5 南极泛非构造带

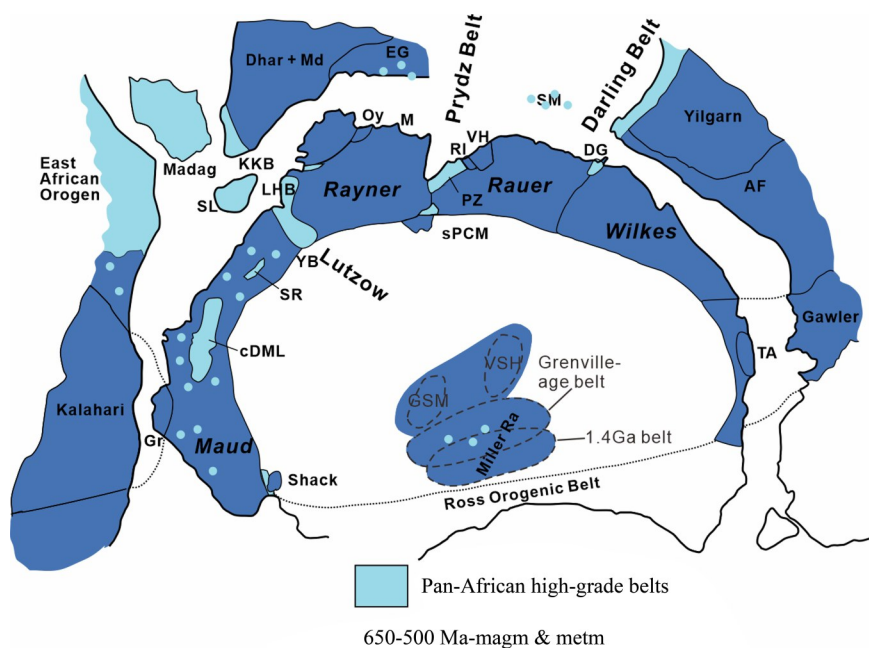
在东南极克拉通, 泛非构造广泛分布于东南极, 尤其是沿岸地区和一些内陆地区<sup>[30-31]</sup>。从剪切带、花岗岩伟晶岩、高级变质作用时期以及沉积岩(物)中碎屑锆石年龄的分布等方面判断, 东南极及冈瓦纳复原中的邻区, 包括非洲东南部、印度南部、澳大利亚西南部均有泛非构造<sup>[32]</sup>。沿剪切带的流体活动可导致早期(如格林威尔期)变质岩的退变作用; 地球化学方面, 泛非期花岗岩往往具有非造山花岗岩的性质, 偶尔可见辉绿岩墙或辉长岩, 某种意义上, 具有双峰式特征。泛非事件重启或影响了大多数同位素体系, U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr和Ar-Ar体系, 从而很容易给出泛

非事件的年龄。空间上,泛非期花岗岩的分布较为局限,较大尺度上显示中-高级变质作用,而分布最为广泛的是同位素体系的重启,表明热事件的广泛分布,几乎波及整个冈瓦纳古陆。冈瓦纳中相邻陆块间可能的反向旋转运动造成褶皱带和一系列剪切带。早-中寒武世期间有变形-变质与增厚、垮塌或中地壳韧性流过程相一致;基性岩浆的底侵作用亦限定了泛非构造的特征。整体上,泛非构造具走滑性质,伴随局部张性或挤压活动,并引起大陆周围的板块运动,这些内部陆块尚未完全固结,泛非构造的固化之后才形成冈瓦纳。

东非造山带向南延伸,对应南极洲的 Heimefrontfjella 和 Shackleton 山岭之间,这里泛非构造-变质叠加是表现为剪切带和逆冲带的网状交织,还是整体活化、仅保留局部块体或透镜未受影响?尚无法判定,借鉴邻近的东南极中毛德皇后地(Queen Maud Land)的情况,后一种可能性较大,

即非均匀活化<sup>[33]</sup>。

横贯南极山脉的北维多利亚地(Northern Victoria Land, NVL)早古生代变质碎屑岩中的碎屑锆石年龄集中于 1 300~900 Ma 和 700~470 Ma,而且,年轻的一组还可进一步划分为 700~550 Ma 和 550~470 Ma 两个时间段,分别代表了泛非和 Ross 构造运动<sup>[34]</sup>。这里被当作典型的冈瓦纳边缘俯冲-造山带<sup>[35]</sup>,而 NVL 与冈瓦纳聚敛有关的事件发生于 600~580 Ma、随后边缘的俯冲-增生 520~500 Ma,显然难以解释 NVL 的约 600 Ma 的花岗岩源区的存在。反而说明了在横贯南极山脉附近,同样有泛非期构造的显示(图 2)<sup>[36]</sup>,即在南极克拉通及其边缘,至少存在 3 个泛非构造域:毛德皇后地及东南非洲-印度南部-斯里兰卡、普里兹湾地区-Bunger 丘陵-西澳-印度东北部的 Shillong 高原和南极横贯山 Miller 山脉附近。即泛非期热事件在东南极附近呈多中心,并且是后期大陆裂解的部位。



AF-Albany Fraser; cDML-central Dronning Maud Land; DG-Denman Glacier; EG-Eastern Ghats Land; Gr-Gariep orogenic belt; GSM-Gamburtsev Subglacial Mts; KKB-Kerala belt; LHB-Lützow-Holm Bay; M-Mawson Station; Madag-Madagascar; Maud-Maud belt; Oy-Oygarden Land; PZ-Prydz Bay; RI-Rauer Group; Shack-Shackleton Range; SL-Sri Lanka; SM-Shillong Mt; sPCM-southern Prince Charles Mts; SR-Sør Rondane Mts; TA-Terre Adélie; VH-Vestfold Hills; VSH-Vostok Subglacial Highlands; YB-Yamato Mts.

图 2 东冈瓦纳古陆中可能的泛非构造分布区域(据 Harley & Kelly, 2007<sup>[36]</sup> 修改)

Fig. 2 Possible distribution of the Pan-African domains in Antarctica and adjacent eastern Gondwana fragments (modified after Harley & Kelly, 2007<sup>[36]</sup>)

泛非构造带大致位于克拉通陆核的边缘部位,如西部 Maud 泛非构造域介于 Kalahari 克拉通和 Dharwar 克拉通之间,且多发生于尚未克拉通化的

格林威尔早期构造带内,如斯里兰卡具有显著的格林威尔期构造。在澳大利亚 Petermann 泛非构造带位于南、北澳克拉通之间的格林威尔期 Mus-

grave 杂岩中。由此推测, Prydz-Bunger-Pinjarra 地区的泛非构造亦可能围绕古陆核: 该陆核位于冈瓦纳复原中的印度和澳大利亚之间, 东南极边缘的 Vestfold 克拉通可能为其残留部分, 与之新太古代性质相近的华北克拉通(NCC)<sup>[37]</sup>与印度克拉通及后二者之间的密切联系<sup>[38]</sup>, 暗示着华北克拉通可能为早期裂解、分离出去的部分。冈瓦纳复原图中, 于印度、西澳之间不排除有古陆核及其伴随的泛非构造带, 但已消失。

南极横贯山脉的 Miller 山附近的泛非期花岗岩及大量该期碎屑锆石表明这里存在泛非构造带(图 2), 可能围绕 Miller-Adélie 地联合克拉通(或 Mawson 古陆的一部分)的边缘分布。

## 2.6 澳大利亚泛非构造带

进一步向东, 东冈瓦纳的澳大利亚的泛非构造则相对分散、强度较弱。Rodinia 裂解时期(~750 Ma), 在劳伦与东冈瓦纳古陆之间沿东澳形成古太平洋, 之后在澳大利亚陆块中的软弱带发生构造活动, 并在鼎盛时期形成一些陆内造山带, 如形成澳大利亚中部和西部陆内的 King Leopold, Paterson, Petermann 和 Pinjarra 造山带(620~540 Ma), 进一步的活化可持续至显生宙(540~530 Ma)。其中的 Petermann 造山带, 虽为陆内造山带, 却发育榴辉岩((544±7) Ma)<sup>[39]</sup>。随后在澳大利亚北部形成大量大陆溢流玄武岩和克拉通内盆地(540~530 Ma)<sup>[40]</sup>。

## 2.7 冈瓦纳泛非构造带

组成冈瓦纳的克拉通于 650~570 Ma 期间出现克拉通之间(包括东、西冈瓦纳之间的莫桑比克洋)洋盆的斜向俯冲、碰撞导致冈瓦纳的形成, 并诱发了克拉通之间的逆时针旋转和褶皱, 最后的俯冲还造成陆地隆起和同时发生的剥离作用(striping), 表现为约 500 Ma 的 K-Ar 和磷灰石裂变径迹年龄的广泛存在。这种事件不仅是“泛非洲”, 而且是“泛冈瓦纳”<sup>[5]</sup>。

泛非构造期间冈瓦纳古陆上多为非海相沉积, 整体具上浮性质, 而 Laurasia 则系海相沉积, 是沉降的。且冈瓦纳的持续时间更长久、内部更热。限于冈瓦纳的泛非构造带加剧了这种热异常和上浮(如深部基性岩浆底侵), 东澳新元古代晚期玄武岩之下的近水平反射层( $V_p > 7.5$  km/s)可能为这种基性层, 东部非洲的泛非地体亦具有基性层<sup>[41]</sup>。

各种古大陆复原方案中, 自 Nuna 或 Columbia 直至冈瓦纳, 特别是自 Rodinia 至冈瓦纳, 东南极

克拉通与澳大利亚克拉通之间的位置构建设没有变化; 而印度与东南极、澳洲之间的相对位置多数人认为基本没有变化, 直到 Powell & Pisarevsky (2002)<sup>[42]</sup>的古地磁研究认为, 最初印度位于南极-澳大利亚西北方向, ~750 Ma 之后直至泛非期印度与南极-澳洲地块之间通过左旋平移连接到一起。从而使印度平移至东南极克拉通附近<sup>[43]</sup>。至少有一点, 泛非期这些陆块之间似乎没有明显的大洋闭合过程, 泛非期的花岗岩集中于较短的时期内。

泛非期长英质岩浆活动构造遍布整个东冈瓦纳<sup>[44]</sup>, 甚至南亚的阿尔卑斯造山带<sup>[4]</sup>, 说明这些部位与冈瓦纳具有亲缘性。除了明显发育于西冈瓦纳的聚合运动, 广泛的泛非期花岗质岩浆作用有利于冈瓦纳超级古陆、尤其是东冈瓦纳的固结(如深部的“焊接”)。冈瓦纳特别是东冈瓦纳古陆内形成泛非构造带, 表现为明显的区域性的热异常, 出现中-高级变质作用和花岗质岩浆为主的岩浆活动, 并伴随隆升。斯里兰卡发育强烈的泛非期高级变质作用和花岗岩、伟晶岩活动<sup>[25]</sup>, 印度、马达加斯加南端表现出类似的性质, 形成大量的伟晶岩, 并出现宝石, 可能代表了泛非活动的某种中心。

泛非构造涉及大规模中、下地壳, 即陆壳内的活动, 至少有一部分经历了板内活动为主的地质过程, 如澳洲的泛非构造带<sup>[40]</sup>, 其中地幔活动的机制则未知。这种作用使得大陆地壳发生固结, 同时造成部分大陆块体的裂解、裂离(rift and drift)。这些基本属于垂直运动的范畴, 古陆裂解之后转化为板块间的水平运动。泛非事件与冈瓦纳内部长期的高热流(岩浆底侵?)有关, 保持隆升(剥蚀)状态, 于 500 Ma 达到顶峰, 之后则呈凹陷或沉降状态, 接受沉积<sup>[41]</sup>, 如南非 Saldania 带在 550~500 Ma 期间形成 Cape 花岗岩和覆于其上的 Cape 群沉积岩<sup>[45]</sup>。其他大陆如北美、欧洲没有形成泛非构造, 从而, 这些部位显示泛非事件的地质体往往被认为是源自冈瓦纳的外来地体<sup>[5]</sup>, 亚洲的情况较为复杂, 后面专门讨论。

古地磁研究表明<sup>[48]</sup>, 冈瓦纳的形成涉及 3 个大的泛非构造带, 即东非造山带(866~650 Ma)、巴西利亚造山带(600~530 Ma)引起南美陆核与非洲之间的碰撞和最后(~550 Ma)的 Kuunga 造山带, 导致澳洲-南极与其他冈瓦纳陆块的碰撞。最早发生的是东、西陆块之间的碰撞, 在西、东冈瓦纳内部也伴随一些活动, 如在非洲最西部的泛非造

山带 Mauritanides(MB)和 Rokelides(RB)褶皱带,并在西非克拉通东缘的南北向横贯 Sahara 造山带产出世界上最早的超高压变质记录——Mali 榴辉岩(620 Ma<sup>[49]</sup>,南美的榴辉岩可能与之属于同一带<sup>[50]</sup>;沿 Damara 造山带东段, Lufilian–Zambezi 造山带具有~595 Ma 的 MORB 型榴辉岩和白片岩<sup>[16, 51]</sup>;而东冈瓦纳内的同一方向为中澳的 Petermann 造山带(550 Ma),形成榴辉岩((544±7) Ma<sup>[39]</sup>),东南极内陆 Shackleton 岭北部遭受了角闪岩相-麻粒岩相变质作用,局部榴辉岩相(510~500 Ma)的变质<sup>[52]</sup>。之后是南、北陆块之间的汇聚,形成 EW 向的 Kuunga 造山带碰撞、收缩构造,如刚果克拉通南、北两侧的纬向泛非构造带,南侧的即 Damara 造山带,如前所述,即使有洋盆存在,其规模也不大;东冈瓦纳的普里兹带属于纬向泛非构造带,有陆-陆碰撞和陆内活化之争;此外,考虑到 Zealandia 古陆的存在<sup>[47]</sup>,东南极横贯南极山脉附近可能也有一条泛非构造带(图 2 和图 3),这样的话,EW 向延伸的收缩构造不止一条 Kuunga 造山带。Kuunga 造山带使得冈瓦纳陆块发生南、北向的粘合,并最终完成冈瓦纳聚合<sup>[17]</sup>。

在非洲东部,南部(如莫桑比克以南)具有镁铁质岩浆底侵<sup>[41]</sup>,而北部(肯尼亚、埃塞俄比亚以北)则显示洋盆,出现蛇绿岩等,有南北差异;东澳新元古代晚期玄武岩之下的近水平反射层( $V_p > 7.5 \text{ km/s}$ )可能为这种基性层,南部即南极克拉通则出现泛非构造。因此,除了通常强调的西、东冈瓦纳区分外,冈瓦纳内部南、北部的差别亦值得重视。即使在东非造山带,泛非构造在南部主要显示格林威尔期构造的活化,而肯尼亚以北的部分、直至阿拉伯半岛,则开始显示明显的洋壳物质组成<sup>[18]</sup>,表现出明显的南北差异。

总之,泛非构造在西、东冈瓦纳的表现形式不尽相同,有洋盆闭合、碰撞,也有古老造山带的再次活化,甚至基性岩喷发。尤其是东冈瓦纳泛非构造涉及大规模中、下地壳,即陆壳内的活动,可能有板内为主的地质过程,并与引张活动有关,拉张从深部开始,深部热流自下而上的影响,活动基本限于上地幔、下地壳,可造成陆壳的差异上升,影响显著的可在浅部形成凹陷、盆地或山脉等,而限于水平方向的挤压、拼贴。

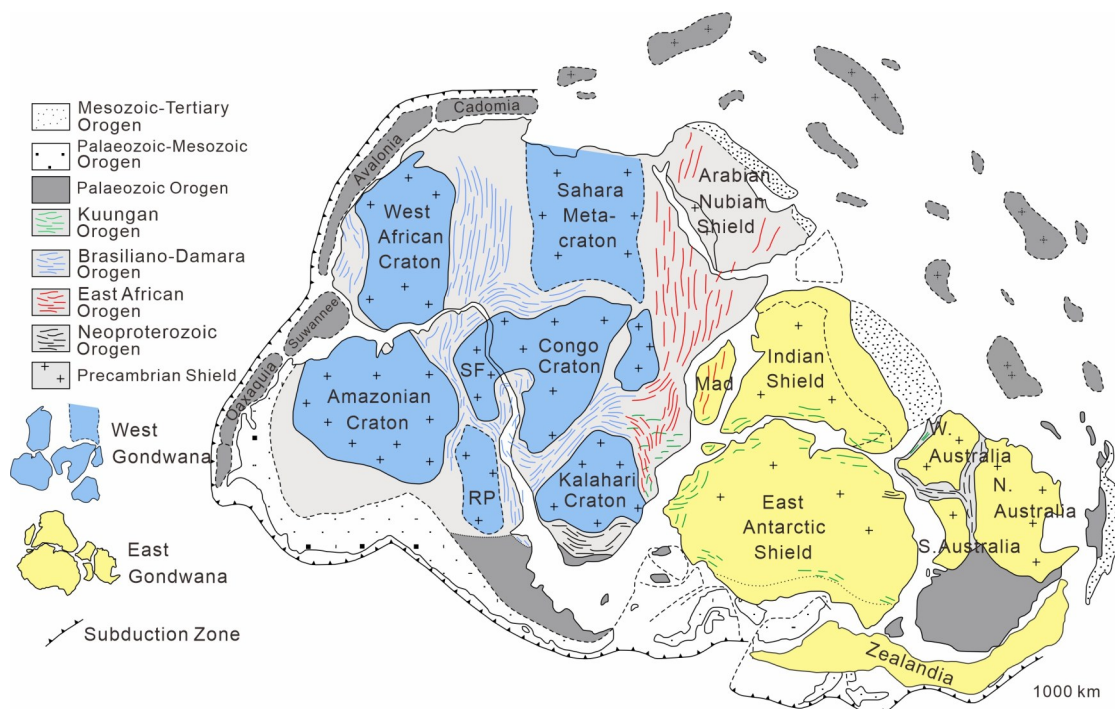


图 3 冈瓦纳复原图中被新元古代及更晚造山带分隔了的各克拉通  
(据 Turner 等(2014)<sup>[46]</sup>和 Mortimer 等(2017)<sup>[47]</sup>修改)

Fig. 3 Generalized Gondwana reconstruction depicting Neoproterozoic and younger orogenic belts that separate the various cratons of West and east Gondwana (modified after references<sup>[46-47]</sup>)

### 3 冈瓦纳的裂解与周缘地质体

Rodinia 于~750 Ma 时期裂解, 沿澳大利亚外侧发生了劳伦古陆和东冈瓦纳之间的裂开及古太平洋的形成<sup>[53]</sup>, 即通过 Mirovoi 洋和莫桑比克洋的关闭、古太平洋于 760 Ma、Iapetus 洋于 575 Ma 先后打开<sup>[54-55]</sup>。在 Rodinia 裂解阶段 800~650 Ma 的古大陆中心附近, 张裂构造较弱, 以东冈瓦纳陆块为主的原冈瓦纳(proto-Gondwana)组成部分可能存在有隐性裂解, 即发生轻微引张活动, 形成凹陷或盆地, 对应一些地层(715~650 Ma)的出现<sup>[56]</sup>, 东南极地区可有 770 Ma 的同位素年龄记录, 可能与此对应; 由这种裂解造成的碰撞速度则极慢<sup>[57]</sup>, 而古陆边缘的凹陷、甚至破裂则趋于显著(850~650 Ma)。

随后的挤压-闭合过程(650~500 Ma)中, 大陆内部则以壳内的构造-热事件叠加为主, 发生较强烈的变形-变质作用; 边部一些陆块随着宏观旋转、撕裂而去, 伴随着局部的变形(挤压或剪切、引张)以及低级-中级变质作用, 同时出现花岗岩活动, 因抬升强度所限, 大部分(850~650 Ma)岩石尚未出露地表, 仅有少部分岩体上升侵位较高。

#### 3.1 冈瓦纳的初次裂解

Rodinia 裂解之后, 一系列的 NE-SW 向挤压事件及随后的回返, 反映了一个可能的新超级大陆(Pannotia, 650~550 Ma)的形成, 但很快发生的张性活动引起其裂解。东冈瓦纳的早期聚合、澳大利亚 Paterson-Petermann 泛非造山带(650~550 Ma)的剪切平移运动均发生在这个时期。即冈瓦纳周围呈俯冲、聚敛, 而劳伦、波罗的和西伯利亚克拉通周围呈现张性(沉降)环境<sup>[55]</sup>。加拿大、格陵兰、斯堪的纳维亚的早古生代碳酸盐岩沉积及火成碳酸岩(565 Ma)的产出表明这些部位当时均处于引张环境<sup>[58]</sup>。北美东、西两侧, 南美西北部, 中东地区, 澳大利亚西北部早古生代盆地分析表明, 这些位置出现了 625~555 Ma 的大陆裂解, 以及随后寒武纪晚期(520~510 Ma)的最大海侵<sup>[59]</sup>。劳伦、波罗的(Baltic)和西伯利亚大陆周围部分或全部的被动陆缘建造的发育, 说明 Rodinia 在古生代初便彻底裂解<sup>[59]</sup>。

与克拉通有关的引张可有广泛影响, 拉张先从深部开始, 深部热流自下而上的影响, 多数深部的活动限于上地幔、下地壳, 影响显著的可在浅部形成凹陷、盆地或山脉等, 而不仅仅是水平方向的挤压拼贴或裂解。

于 540 Ma 或新元古代-早古生代界线附近冈瓦纳形成之后, 其边缘或外围出现裂谷, 发生冈瓦纳的初次裂离, 但这种裂离的距离并不大, 可以形成凹陷, 并接受沉积, 因此, 很多古生代盆地仍接受冈瓦纳物源的沉积, 形成一些孤立陆块并向北漂移。在早古生代早期, 整体上处于超大陆裂解过程<sup>[60]</sup>。

泛非构造带的变形基本上与冈瓦纳陆块间的碰撞及 Iapetus 洋的打开(~575 Ma)有关<sup>[61]</sup>。新元古代晚期劳伦-南美克拉通之间的裂解、扩张导致西冈瓦纳陆块间的 Adamastor 洋的封闭, 早寒武世时期西冈瓦纳形成; 东、西冈瓦纳间的莫桑比克洋开始封闭, 可直至南极洲的 Shackleton 岭, 与 Iapetus 洋有关的扩张及斜向运动造成了横贯南极山脉的变形。于冈瓦纳内部泛非变形的结束时期(早寒武世)冈瓦纳古太平洋边缘大量岩浆弧的形成, 可能反映了冈瓦纳聚合过程中板块运动方向的改变, 同时期冈瓦纳边缘新的俯冲状态则与 Iapetus 的关闭有关。Iapetus 洋的扩张引起冈瓦纳内部变形、聚合, 其闭合造成冈瓦纳边缘的俯冲。冈瓦纳周缘盆地的闭合和周边造山带的结束意味着超级古陆的裂解与离散<sup>[6]</sup>。

东南极有较多的 1 300~900 Ma 和 700~500 Ma 的碎屑锆石<sup>[62]</sup>, 表明这里有新元古代晚期-早古生代时期的凹陷或(小)洋盆, 而沉积中缺少 900~700 Ma 锆石, 没有新元古代中-晚期时期的锆石记录, 这一点, 与非洲不同。与东南极类似, 澳大利亚中部大量 NW 向的基性岩墙, 即~820 Ma 时期的 Gairdner LIP(大火成岩省)<sup>[63-64]</sup>对应的张裂主要形成基性岩, 少见花岗岩, 所以, 澳大利亚很少有 900~700 Ma 的碎屑锆石记录。印度西北部的 Marwar 超群有流纹岩之类<sup>[46]</sup>。作为 Kuunga 造山带的一部分, 印度南端经历了新元古代晚期-早古生代阶段强烈的泛非期麻粒岩相变质作用<sup>[25]</sup>。

南极半岛特里尼蒂半岛群(Trinity Group)的沉积岩中含有大量的古生代碎屑锆石年龄, 表明其来自于西冈瓦纳古陆裂解之前的物源区; 南美 De-seado 地块记录了早寒武世到晚古生代的冈瓦纳裂解作用<sup>[65]</sup>。显然, 南极半岛碰撞陆块主要源于寒武纪时自冈瓦纳大陆的裂离, 从构造上来说准原地的。

新元古代最晚期的岩浆活动记录了澳大利亚-南极洲东缘同时发生的裂谷活动和大陆裂解之前这些陆块的亲缘性<sup>[66]</sup>, 这些与裂谷有关的记录略

早于原太平洋周边~550 Ma前的一次大陆裂解<sup>[2, 59]</sup>(图3)。新元古代开始裂谷作用, 早古生代初期伴随陆块的漂移<sup>[66]</sup>, 中寒武世三叶虫古地理分布表明<sup>[67]</sup>, 此时(~500 Ma)西伯利亚、华北、扬子克拉通与冈瓦纳古陆已相互隔离。

南美北部的 Avalonia 地体和西非附近的 Armorica 地体沉积岩石中均具有年轻碎屑锆石年龄峰 570~550 Ma, 并非形成于活动陆缘, 而是张性环境<sup>[68-69]</sup>。南美北部可延伸至非洲西北部, 由一系列 Avalonia-Carolina-Cadomia 地体组成(图3), 或者说, 劳伦与波罗的古陆之间的裂解形成较小的 Iapetus 古洋, 其南侧出现 Avalonia 洋内弧<sup>[70]</sup>。这些地体于早古生代裂自冈瓦纳、并在早-晚古生代增生至劳伦<sup>[71]</sup>; 向东, 有西伯利亚、华北克拉通、扬子克拉通、塔里木克拉通、印支地块, 甚至可能更多的小陆块, 于 300 Ma 前聚合形成劳亚古陆(古亚洲)。

新元古代晚期, 冈瓦纳北缘基本上处于原 Cadomia 弧后盆地环境, 南部隆起的泛非造山带提供剥蚀源<sup>[72-73]</sup>。希腊褶皱带前寒武纪基底被寒武纪花岗岩(524+6/-5 Ma)侵入, 这种花岗岩在地中海东部常见, 但在非洲北部缺失, 表明东冈瓦纳北缘的 Cadomian 岩浆弧已于早古生代从冈瓦纳裂解出去<sup>[68]</sup>。希腊褶皱带变沉积岩中的碎屑锆石与约旦、以色列和利比亚地区寒武纪地台相沉积以及东非米诺斯(Minoan)型地体类似, 均具有 600 Ma 和 1 000 Ma 的锆石峰, 显示东冈瓦纳物源特征。

在土耳其 Menderes 地块, 变花岗岩类(549.0±5.4 Ma)形成于冈瓦纳北缘沿原特提斯洋的向南俯

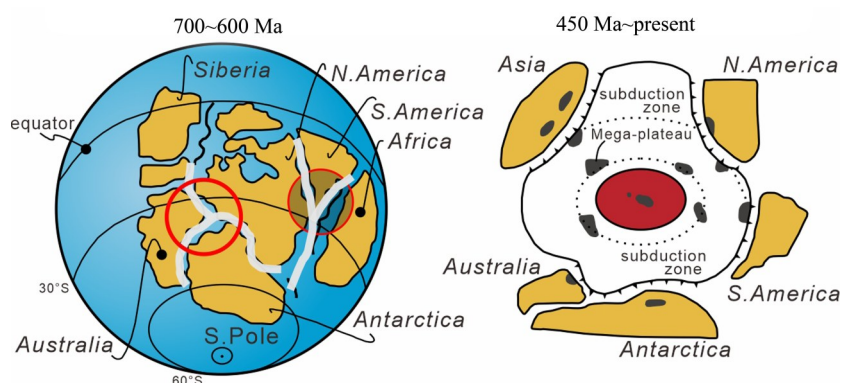
冲、Cadomian 弧后盆地伸展环境(560~545 Ma), 属于晚造山、造山后的过程<sup>[74]</sup>。类似的特征也出现于欧洲的东、西部, 伊朗、青藏和东南亚。伊朗 Shahrekord 北部变玄武岩形成于冈瓦纳北缘新元古代晚期-早寒武世裂谷形成的弧后盆地<sup>[75]</sup>, 俯冲板片的反转引起 OIB(洋岛玄武岩)类岩浆的上升。伊朗整个古生代仅为造陆运动, 没有造山运动, 构造稳定, 发育典型的地台沉积。

在~550 Ma 前, 印度北缘喜马拉雅边界位置古洋盆的打开, 裂解出去古印度陆块元古代活动带的一部分<sup>[76]</sup>。印度西北部的高喜马拉雅结晶岩系中的花岗岩(553~496 Ma), 同时出现镁铁质岩浆岩, 之后隆起, 造成奥陶系底部的角度不整合<sup>[77]</sup>。在巴基斯坦 Spiti 地区, 奥陶系底部的砾岩及海侵表明奥陶纪之前的伸展性正断层的发育, 与持久的泛非构造旋回晚期的伸展构造相对应, 如藏南晚泛非期不整合面<sup>[78]</sup>的形成。

寒武-奥陶系之间的不整合在全球多处出现, 在华北克拉通(NCC)西缘该不整合可能与东冈瓦纳北缘的构造活动, 即 Kurgikh 或 Bhimphedian 造山运动有关, 与多数复原模型不同, 内蒙地区则是印度北缘的走向延伸<sup>[79]</sup>。

### 3.2 古太平洋的作用

而现今东亚陆区当时多处于离散状态, 地块内的裂解可再局部形成洋盆, 古太平洋是真正的裂解中心<sup>[80]</sup>(图4), 即这些裂解中的一些位置直接形成了古太平洋、Iapetus、古亚洲洋(如西伯利亚西南缘)等, 冈瓦纳外围的裂解与冈瓦纳的聚合、固结基本同时发生, 如成为古亚洲构造域较小的扩张距离(裂解)形成多个小洋盆, 之后的封



红圈为地幔柱的位置。The red circle refers to the superplume.

图4 Rodinia及南太平洋超级地幔柱引起的裂解示意图(据 Maruyama, 1994)<sup>[80]</sup>

Fig. 4 Schematic map showing the Rodinia breakup through the superplume in the ancient southern Pacific ocean(after Maruyama<sup>[80]</sup>)

闭造成了大量的加里东造山带。

古太平洋周缘由被动边缘→主动边缘(活动边缘)过程中, 出现俯冲、碰撞, 古太平洋的扩张至500~400 Ma达到最大, 然后由于俯冲开始收缩, 并形成环太平洋构造带<sup>[80]</sup>。

由图4看出, 古太平洋形成之前, 亚洲各陆块与美洲、南极洲大陆之间间距较近, 太平洋的形成才使得东亚一些微陆块与原先的源区大距离位移。中亚造山带内或西伯利亚克拉通周围的微陆块、欧洲西部的微陆块、格陵兰岛东缘, 甚至北极圈内的斯瓦尔巴德(Svalbard)群岛地质体<sup>[81]</sup>等, 可能因古太平洋的扩张迁移而来, 陆块源区为冈瓦纳周边。

冈瓦纳古陆只包括了当时全球范围内的部分大陆, 是“半个超大陆”。超大陆的形成过程有两个端元模型, 在经典的威尔逊旋回中, 早期超大陆裂解过程中形成新的洋壳(内部洋)在随后的聚合过程中消减, 即introversion而成新的超大陆, 有人翻译为“内倾”, 意指‘inside in’, 内缘连接陆化; 相反, 早期超大陆裂解之后, 沿漂移陆块(板块)外部边缘再聚合时发生碰撞, 即经历extroversion成为新的超大陆, 有人翻译为“外倾”, 意指‘outside in’, 外缘连接陆化<sup>[82-83]</sup>。冈瓦纳沿东非造山带的碰撞、缝合可能是一个extroversion过程<sup>[83]</sup>, 至于东冈瓦纳内部, 或为有限洋盆的闭合, 或为重新活化, 至多是一种introversion过程。

南太平洋超级地幔柱(Southern Pacific Superplume, 图4)<sup>[80]</sup>引起古太平洋持续扩张, 或与冈瓦纳北缘的裂解有关。古太平洋的扩张与冈瓦纳的聚合形成一个巨大的“盆-山耦合”体系, 即冈瓦纳的形成与古太平洋的出现是同一过程的两个方面, 受整体汇聚影响下的陆块群逐渐聚集成较大的集合体——冈瓦纳, 而古太平洋周围(澳大利亚、南极洲、非洲、南美洲、北美洲、波罗的地盾、西伯利亚克拉通及亚洲陆块)的陆块性质则有所不同: 靠近潜在的冈瓦纳一侧的澳大利亚、南极洲、南美洲和非洲陆块既有内部挤压构造(位于陆内的泛非构造带)、又有被动陆缘(很快转化为所谓安第斯型造山带), 而另一侧的北美洲及部分亚洲陆块(如华北克拉通)主要表现为离散型边界。古太平洋于500~450 Ma扩展到鼎盛, 之后开始北缘俯冲、缩小, 形成环太平洋造山带。超大陆周缘的俯冲带分隔了大陆中心与地幔的联系, 进而导致较热地幔的上升, 并促使超大陆裂解, 尽管

地幔柱和热点并非必要条件<sup>[84]</sup>。

另外, 冈瓦纳古陆一部分固结(700~500 Ma)的同时, 其(北部)边缘部分却发生了明显的裂解<sup>[66]</sup>。冈瓦纳的形成与其周缘或其他大陆的裂解同时发生, 如裂离在北美(Utah粗面岩580 Ma)<sup>[85]</sup>、南极横贯山脉(Churchill Mts玄武岩(586±20) Ma)<sup>[86]</sup>; Skelton冰山的石英正长岩(551±4) Ma<sup>[87]</sup>、澳洲塔斯马尼亚(Arrowsmith镁铁质火山岩(586±7) Ma)<sup>[85]</sup>均有所体现。

至于劳伦西北部的裂离, 根据北美西部Great盆地的沉降曲线, Kominz(1995)<sup>[88]</sup>发现这里的裂解时期为560~534 Ma; 澳大利亚的裂解可通过克拉通内盆地<sup>[89]</sup>估计出来, 即Antrim高原火山岩; 在阿德莱德(Adelaide)地区的不整合间接表明了其裂解介于最年轻的(西部)Wilpena群(565~550 Ma)至寒武纪最早期(544 Ma)的(北部)Normanville群之间<sup>[90]</sup>。此外, Flöttmann等(1996)<sup>[91]</sup>注意到了Adelaide裂谷杂岩古地理的显著变化, Foden(1996)<sup>[92]</sup>也注意到寒武纪Kanmantoo群的沉积源区的变化。加拿大的552.5 Ma裂解介于倾斜地层(>555 Ma)和水平地层(<550 Ma)之间, 平均值达560 Ma(580~550 Ma)。至于南极, 暂时采纳Moore(1991)<sup>[93]</sup>和Dalziel(1991)<sup>[94]</sup>的提法: 变形了的Beardmore群之上不整合覆盖的灰岩代表了被动陆缘下裂解至漂移(rift-to-drift)的转换, 时代介于Skelton冰山石英正长岩((551±4) Ma)和Shackleton灰岩((544~520) Ma)<sup>[95]</sup>之间。

尽管有人根据沉积、岩浆岩事件解释了陆块初始(新元古代)的裂谷和最终(新元古代-早古生代过渡期)漂离, 关于元古宙期间澳大利亚、南极和劳伦的重建仍有争议。新元古代晚期泛古陆(东冈瓦纳和劳伦古陆)同时出现了裂谷和漂离, 即~720 Ma沿莫桑比克带的聚合和560 Ma裂解造成的古太平洋和Iapetus洋<sup>[85]</sup>。超级古陆此处聚合、彼处同时裂解, 不仅见于冈瓦纳旋回, 在Rodinia古陆演化中也有发生<sup>[96]</sup>。

### 3.3 冈瓦纳外围的地质体

冈瓦纳复原流行模型的北缘, 自西向东, 分布有Avalonia, Cadomia, 阿拉伯地盾、喜马拉雅造山带和华夏地块等。新元古代晚期-早古生代初期冈瓦纳边缘的一些(微)陆块, 基本处于松散状态, 冈瓦纳形成时未必都并入超大陆, 这些小陆块, 特别是周边或与劳伦、西伯利亚古陆过渡区的位置, 具有一些盆地和山脉, 具有拉张-挤压活

动,但强度小于典型的板块俯冲、碰撞。从靠近冈瓦纳的位置向外裂离、漂移而散布于亚洲、欧洲,甚至北美洲。

冈瓦纳主体和边部的活动强度、性质有区别。570~550 Ma 阶段的蛇绿岩及同时或更早的类似岩石出现于阿拉伯一带:在泛非期,这些部位仍为张性构造,形成冈瓦纳时,其周边部位多显示裂解,如祁连-柴达木地块经历了冈瓦纳东缘的裂谷(615~580 Ma)、边缘裂解(550 Ma)形成洋盆<sup>[66]</sup>。从演化示意图上, Yakubchuk(2017)<sup>[97]</sup> 则给出了完全不同的解释:于新元古代-早古生代过渡时期并没有一个统一的超大陆,甚至亚洲的前身并不属于冈瓦纳,兴凯-布列亚-佳木斯地块亦不在冈瓦纳范围内。

在冈瓦纳外围,或者与冈瓦纳的形成有关的活动单元内,经常出现一些与冈瓦纳主体泛非构造类似的活动,容易被当作泛非构造,姑且称为泛非期构造,其与冈瓦纳主体的泛非构造性质似乎不同:表现为陆块上发生凹陷但未裂开部位的挤压、旋转(剪切)和闭合过程,如北美东部的阿巴拉契亚、格陵兰东缘及欧洲西部的加里东造山带,其中的造山带与多数中-新元古代类型的造山带类似,而与湖区以北加拿大地盾上典型的格林威尔构造带(type Grenville orogen, 1 250~980 Ma)<sup>[98]</sup> 有所不同,如其中的 State Farm 片麻岩具有 Rb-Sr 分散等时线年龄(1 031±94) Ma 和 530 Ma 的 Osceola 花岗岩,之间有 Albemarle 浅变质安山质火山弧-碎屑岩(700~600 Ma),不整合上覆双峰式火山-沉积(600~500 Ma)及花岗岩(530 Ma),伴随相当于加里东运动的塔康运动(Taconian orogeny)<sup>[99]</sup>。

因此,泛非期热事件可能呈多中心,很多部位经历了重新活化。在冈瓦纳的泛非构造带,600~500 Ma 期间新生的长英质物质不多,大量的花岗岩为再熔而成<sup>[100]</sup>,而中亚造山带岩浆弧岩石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值可正可负,花岗岩多具有  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  正值,显示有地幔物质加入,尽管有人指出中亚造山带显生宙地壳生长规模并没有前期认为的那么大<sup>[101]</sup>。按照 Janoušek 等(2018)<sup>[102]</sup> 的模型,“泛非期”的记录是俯冲及岩浆弧活动的结果,而与冈瓦纳的聚合无关,如沿阿尔金山可出露早古生代甚至泛非期花岗(片麻)岩<sup>[103]</sup> 可能就是该区造山作用的结果。一些格林威尔期、泛非期碎屑锆石,并非源于冈瓦纳,而是源自亚欧大陆自身的造山

带,说明这些地区的“泛非构造”是自身生产的,不是冈瓦纳本身的特征,或者说,这些造山带从来没有真正成为冈瓦纳的一部分。

冈瓦纳外围与劳伦或西伯利亚古陆的过渡区或边缘区分布的地质体,活动性介于活跃的大洋和稳定的大陆之间,容易形成多个小型凹陷或洋盆、面状或带状分布的少量的新生陆壳物质,一直未能形成稳定块体,而处于准稳定(活动)状态,即邓晋福等(2015)<sup>[104]</sup> 所认为的残留弧,并有古老物质(如新太古-古元古代)的残留。可能显示稳定区与活动带相间分布,如 Kröner 等(2017)<sup>[101]</sup> 指出古亚洲增生杂岩中夹有大量来自包括塔里木克拉通在内的冈瓦纳大陆北部边缘的前寒武纪微地块。被裂解的造山带或块体较小,在随后的板块运动过程中很难保持其固有形态而被进一步拆解、裂离、差异位移,甚至旋转,如中亚造山带中的一些微陆块(如佳木斯地块)就是这样被裂解出块体的一小部分。

与冈瓦纳裂解、陆块迁移相伴,由于俯冲、沉没或抬升剥蚀,造成一些陆块的迁移或消失,如澳大利亚-新西兰之间主体沉没于水下的 Zealandia 大陆<sup>[47]</sup>。可能亦有隐藏或消失了的泛非构造带:在冈瓦纳复原图中印度的北部(?)或东北端可能有消失了的泛非地体,甚至俯冲至亚欧大陆之下。

### 3.4 冈瓦纳与现代板块运动

冈瓦纳古陆的形成与现代板块活动有着密切的联系<sup>[7]</sup>。到目前为止,地球上最老的(~1 030 Ma)蛇绿岩见于中亚造山带<sup>[104]</sup>,普遍承认的最老蓝片岩 800~700 Ma<sup>[106]</sup>,最老的含柯石英榴辉岩形成于~620 Ma<sup>[49]</sup>,如果考虑现今板块构造体制以“俯冲构造”<sup>[107]</sup> 为主要标志,那么这种板块体制应该自新元古代才出现,这也是孕育泛非构造、冈瓦纳逐渐形成的时期。

陆块也有可能消失,如与法拉龙板块(Farallon plate)有关的一些陆块俯冲沉没于亚洲大陆。在扬子克拉通西缘志留系-泥盆系沉积中,可见 560 Ma 泛非期碎屑锆石峰<sup>[108]</sup>,邻近的松潘-甘孜地区及青藏造山带晚泛非花岗岩年龄(一般<540 Ma)<sup>[109]</sup> 显得太年轻,扬子克拉通本身缺乏泛非构造,其沉积要么反映了当时完全不同的岩相古地理环境,要么当时一些泛非构造地质体已消失。尽管“泛非构造”这一术语通常不用于亚洲,如果这些陆块确实源自冈瓦纳,并具有泛非时期的

构造特征, 亦可称作泛非构造, 或泛非期构造。

此外, 泛非构造对地球演化具有重大影响, 除了板块运动方式或速度的变化<sup>[7]</sup>外, 对于全球气候变化、生命的演化可能也具有重要影响, 如Ediacara生物群、寒武纪生命大爆发, 甚至磷矿的大量沉积都有关系。地球的内生作用从根本上决定了外生作用的演化进度, 从全球范围内1 000 Ma以来最大的锆石年龄峰值(结合花岗岩和碎屑锆石, 参见后面的“关于超大陆”部分)出现在600 Ma<sup>[110]</sup>, 此时冈瓦纳趋于形成并整体隆升, 同时期劳伦、波罗的和西伯利亚古陆, 包括华北克拉通、扬子克拉通<sup>[111]</sup>, 则出现广泛的海侵过程。

### 3.5 冈瓦纳的第二次裂解

泛非构造带早期经历了高温-低压(HT/LP)变质作用的造山带花岗岩较为集中, 较易成为冈瓦纳大陆中-新生代裂解的位置<sup>[112]</sup>, 这是冈瓦纳的第二次裂解, 并造成冈瓦纳的逐渐解体。其裂解首先导致大西洋的形成, 南段是沿泛非构造带裂解, 而北段则是沿加里东褶皱带的裂解, 以及非洲的东、西两侧, 印度的东、西两侧和东南极沿岸。可能的解释是, 这些部位的地壳中分布较多的花岗岩类, 由于温度的上升, 这里的岩石率先接近或达到低共熔点, 整体趋向于韧性、塑性, 岩石强度明显降低, 容易造成壳内破裂, 出现岩墙、裂谷, 甚至洋盆, 造成大陆裂解。地幔异常活动可诱发古陆裂解(如地幔柱<sup>[113]</sup>)。当然, 冈瓦纳裂解的位置亦可与泛非构造带不一致, 甚至切割古老克拉通, 如南大西洋的形成, 有关破裂直接分割了南美的São Francisco克拉通和西北非洲的刚果克拉通; 澳大利亚与南极洲之间的南大洋则切割了南极洲的Terre Adélie克拉通和南澳的Gawler克拉通, 两者共同组成Mawson古陆(图5); 南极和印度之间, 曾经共同拥有一个格林威尔带, 并在泛非期活化<sup>[114]</sup>, 中-新生代冈瓦纳裂解的部位恰位于泛非构造活化带之中。也就是说, 在冈瓦纳形成甚至更早的时期, 没有所谓的澳大利亚或南极陆块, 那时的构造分区或陆块组成与现今大陆分布或轮廓并不一致, 泛非构造带即是其中构造分区的重要界线之一。

总之, 泛非期构造多沿着早期格林威尔活动带(1 100~900 Ma)发生, 且这些活动带与北美典型的格林威尔带(1 250~980 Ma)有所不同。泛非期构造的发生与现代板块活动密切相关。泛非期构造的发生可能是多中心的, 且主要表现为深部热流



RP—Rio de la Plata craton; SF—São Francisco craton.

图5 冈瓦纳的泛非构造带及其中可能的古陆核的分布  
(据Foster等, 2015<sup>[17]</sup>修改)

Fig. 5 Map showing the locations of Pan-African orogenic belts and continental nuclei in Gondwana  
(modified after Foster et al., 2015<sup>[17]</sup>)

自下而上的影响, 而不仅仅是水平方向的挤压拼贴或碰撞; 此外, 冈瓦纳内部的挤压构造与周围其他大陆的凹陷、裂解可发生。新元古代晚期-早古生代初期冈瓦纳边缘的初次裂解及后期的漂移导致部分微陆块散布于亚洲、欧洲。在全球范围内相对稳定地块或构造部位表现为早寒武统底、顶部的不整合, 尤其是寒武系-奥陶系之间的不整合。泛非构造带容易成为冈瓦纳大陆中-新生代大陆裂解的部位。

## 4 泛非构造和加里东运动

尽管人们可以恢复出不同地史时期若干个超级古陆, 似乎没有哪一个超级古陆形成于全球一致的造山或沉积事件, 如不像单个克拉通, 可有统一的基底或盖层。但是, 冈瓦纳古陆普遍受到泛非事件的影响, 对于确定某一地质体是否属于

冈瓦纳具有重要意义。即,可以遵循这样一个原则:同受泛非构造影响的地质体应位于冈瓦纳古陆范围内。至于冈瓦纳边缘是否泛非带,则有争议。如横贯南极山脉的北维多利亚地在变质相带分布、花岗岩及其时代关系方面<sup>[115]</sup>均类似,宜当做泛非构造带<sup>[28]</sup>,但Cawood等(2007)<sup>[116]</sup>认为其应该是边缘活动带,不是泛非构造带。Zealandia的发现及其紧靠澳大利亚-南极的东部、中生代才开始裂解<sup>[47]</sup>表明,横贯山造山带不是简单的边缘增生带,可能与北秦岭造山带<sup>[117]</sup>夹持于不同克拉通之间类似,如Wilson杂岩、Bowers群和Robertson Bay群分别与秦岭岩群、二郎坪岩群和宽坪岩群从岩石建造类型、变质类型与程度、事件年代等多方面大致可以对比<sup>[118]</sup>。此外,南极半岛根部Graham地亦可出现加里东期侵入岩487~422 Ma<sup>[119-120]</sup>,在寒武纪-石炭纪之间,这种分离的距离并不是很大,从而可以解释碰撞前夕非常短暂的俯冲阶段(不超过20 Myrs),沿南极横贯山脉即使有过洋盆,其规模亦很有限。

冈瓦纳裂解和亚洲、甚至欧洲的增生紧密相连。泛非构造主要体现在冈瓦纳陆块内部,而加里东期活动主要体现在陆缘的增生或活化。全球主要有8个加里东期造山带,即挪威-苏格兰、阿帕拉契亚、东格陵兰、西伯利亚南缘、东澳大利亚、秦岭-祁连、中-南天山、华夏褶皱带。表明加里东造山带主要位于北方大陆周边,多集中于非冈瓦纳陆块边缘,或与冈瓦纳古大陆相邻的位置<sup>[54, 116]</sup>。或者,与古太平洋的扩张相伴,在冈瓦纳周边多岛洋中出现挤压构造,开始俯冲、碰撞,直至加里东造山带。当古太平洋扩张至500~400 Ma达到顶峰,开始出现收缩<sup>[80]</sup>,挤压构造迁移至古太平洋边缘,加里东造山带结束活动。

时间上,泛非构造之后才有加里东褶皱带,两者存在递进演化关系,或者说加里东构造影响范围对泛非构造有很好的继承性:南方古陆的裂解,造成了北方古陆边缘的俯冲、增生。西藏则兼具晚泛非、加里东运动的一些特征<sup>[121-122]</sup>,青藏高原多个地块中产出加里东期花岗岩<sup>[109, 123]</sup>。根据高喜马拉雅花岗片麻岩的年龄(~500~473 Ma)和地球化学性质,Miller等(2001)<sup>[77]</sup>认为形成于非弧伸展环境,而根据Cawood等(2007)<sup>[116]</sup>,其形成于原特提斯洋俯冲、洋壳反卷和断离过程中大陆弧性质的弧后环境,属安第斯型冈瓦纳边缘<sup>[124]</sup>。早古生代初期除华北克拉通不具有冈瓦纳大陆的属

性外,扬子(?)、华夏、塔里木、柴达木、阿拉善、北秦岭-中祁连-中阿尔金、欧龙布鲁克、羌塘、拉萨、兰坪-思茅、印支等(微)陆块都具有亲冈瓦纳的特征<sup>[124-126]</sup>。南方冈瓦纳大陆主体形成完成于540 Ma,而亚欧大陆主体集结完成于420 Ma,早古生代末450~400 Ma存在全球性准同时的造山运动,亚欧大陆已经出现俯冲增生、碰撞、陆内3种类型的全球尺度造山带<sup>[125-127]</sup>,而且,基本是与冈瓦纳古大陆相邻或有关的位置。大量微陆块在早古生代可能是冈瓦纳外缘的俯冲-增生带中的重要组成。与南极半岛古生代微陆块之间短暂的分离和俯冲<sup>[119-120]</sup>类似,东亚很多陆块之间可能为有限洋盆和有限俯冲。

总之,发生于冈瓦纳聚合主体范围内的泛非构造带通常具有较高的变质温度,出现较多的花岗岩,伴随升温、挤压、剪切,进而隆升。沿着这些泛非构造带的闭合、固结直接形成了冈瓦纳,并躲过了后期的改造。所以,冈瓦纳范围内很少有加里东期的构造。而冈瓦纳外围的泛非期构造,更像是克拉通陆核之间的格林威尔带再活化,其影响仅限于重新活化区(带)内,即先前(格林威尔期甚至更早)活动带的壳内层次,如出现凹陷、裂谷或小洋盆,但多未发展成足够规模的洋盆。若伴随进一步的裂解活动,并波及上地幔,扩张而出现(小)洋盆;随后的收缩,即加里东期构造可出现在冈瓦纳古陆的一些边缘,如沿南极横贯山及东澳塔斯曼线的造山带。冈瓦纳外围陆块或造山带(如亚欧大陆)中容易出现加里东造山带甚至更晚期的构造叠加活动。可能由于克拉通通常具有较大的地壳厚度,泛非构造及加里东构造均未能波及克拉通或稳定陆块,即使泛非构造广泛发育的冈瓦纳内部亦是如此。

## 5 亚洲大陆的泛非期构造显示

泛非事件或构造不仅限于非洲,在其他冈瓦纳陆块上亦有显示,可以出现于整个冈瓦纳,即“泛冈瓦纳”(Pan-Gondwana)<sup>[5]</sup>。反过来,具有典型泛非事件或构造的地质体,应基本属于冈瓦纳古陆或与之有密切联系,在Rodinia裂解、直至泛非期构造过程中基本限于冈瓦纳范围内。相反,仅出现较弱的泛非期构造迹象的陆块或造山带可能不属于严格的冈瓦纳古陆,至少不是冈瓦纳核心部位。

中国大陆的形成几乎涉及所有地史上的古超

大陆。就中国大陆, 或者说东亚的形成而言, 除了地史上最近的潘吉亚(Pangea)古超大陆以外, 关系最为密切的就是冈瓦纳古陆了。人们普遍认为, 冈瓦纳古陆的离散、部分北移形成亚洲大陆和欧洲的一部分。因此, 了解冈瓦纳裂解、进而亚欧大陆增生的过程, 对于探讨亚欧大陆的形成具有重要意义。

下面介绍一些亚洲大陆、重点是中国大陆范围内泛非期构造的可能表现。

### 5.1 青藏高原及邻区的泛非期构造

**5.1.1 青藏高原及邻区的花岗岩** 高喜马拉雅具有大量前喜山期的过铝硅质花岗岩, 表明印度次大陆北缘大规模陆壳活化, 可能有新元古代晚期和早奥陶世两次花岗岩事件, 也可能持续时间较长的一次事件(时间跨度超过50 Myrs<sup>[77]</sup>)。除了边缘地区, 如印度东北部的Shillong高原、东高止地(Eastern Ghats Land)和南端的Nagercoil地块外, 锡瓦里克带以南的印度克拉通并没有典型的泛非构造, 喜马拉雅山脉的碎屑锆石可能并非来自现今的印度克拉通。

在西亚, 土耳其Menderes地块有泛非基底(核部)、新元古代变碎屑岩、各种变质花岗岩类((549.0±5.4) Ma)和变辉长岩侵入体, 以及古生代盖层系列<sup>[74]</sup>。

一般认为, 滇西保山地块是羌南地块的南延部分, 可产出老至502 Ma的二长花岗岩, 其锆石Hf模式年龄(~1.7 Ga), 表明了花岗岩源于较老地壳物质的重熔<sup>[128]</sup>。再向南, 同为腾冲-保山地块的南延部分, 泰国湾Khao Tao花岗岩锆石年龄(501.5±7.5) Ma, 成分上具有壳-幔混合特征<sup>[129]</sup>。

近年来, 在高原南部获得大量泛非运动的年龄信息, 如1:25万安多县幅区域地质调查报告(中国地质大学(北京)地质调查院, 2006)。西藏地区产出大量的早古生代花岗岩, 但基本限于班公湖-怒江板块缝合带以南<sup>[109]</sup>。南羌塘地块仅有470~460 Ma的花岗岩, 而无泛非期的花岗岩(潘桂棠, 私人通讯)。

拉萨地块和羌塘地块之间的“安多微陆块”或聂荣微陆块位于安多与那曲之间, 呈透镜体近东西向夹持于班公湖-怒江缝合带之中, 有910~799和531~483 Ma的两期花岗岩岩浆活动, 其中寒武纪花岗岩侵入于前寒武纪片麻岩中, 属于I型高钾钙碱性岩石系列, 具有富集的锆石Hf同位素组成( $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-3.0 \sim -0.1$ )、古老的锆石Hf模式年

龄( $t_{\text{DM}}=1\,472\sim 1\,659$  Ma)和相对较高的Mg<sup>#</sup>值(32~47), 安多微陆块与拉萨地块应具有亲缘性<sup>[130]</sup>。考虑到花岗岩中锆石Hf模式年龄接近1.6 Ga, 该年龄对应东冈瓦纳古陆的中元古代活动带, 即早期的造山带, 从而可能与拉萨地块有所不同。

南羌塘地块南缘的聂荣微陆块中安多片麻岩锆石LA-ICP-MS法测定U-Pb年龄为517~505 Ma<sup>[131-132]</sup>, 代表了片麻岩原岩花岗岩的侵位时代, 岩性属分异的亚碱性过铝质I型花岗岩; 侵入聂荣岩群的片麻状二长花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄(515±14) Ma<sup>[131-132]</sup>, 聂荣微陆块中亦有锆石年龄(541±8) Ma<sup>[133]</sup>, 是目前在青藏高原发现位置最靠北的泛非期事件年龄记录, 认为冈底斯及其以南的部分均属冈瓦纳大陆<sup>[134]</sup>, 安多片麻岩原岩形成的大地构造背景与碰撞造山过程密切相关, 初步认为微陆块上发育的中-晚寒武世岩浆事件可能是泛非造山作用结束之后, 沿冈瓦纳超大陆边缘安第斯型造山作用的产物。这些晚泛非期花岗岩的围岩为843~820 Ma之间的花岗片麻岩, 其形成的大地构造背景与裂解拉张的环境密切相关, 可能对应Rodinia全球裂解阶段造成的新元古代岩浆事件, 并与扬子板块边缘的裂解事件相关<sup>[132]</sup>。

在南羌塘地块的北缘, 即沿南、北羌塘地块之间的龙木错-双湖缝合带, 产出本松错花岗岩岩基, 获得锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U加权平均年龄分别为(496.2±3.9)和(497.1±3.0) Ma<sup>[135]</sup>。北羌塘地块小苏莽一带的宁多岩群黑云斜长片麻岩(副变质岩)的最新蚀源区年龄为(1\,044±30) Ma, 而侵入宁多岩群的片麻状黑云母花岗岩(古侵入体)的形成年龄为(991±4) Ma, 由此可将宁多岩群的形成时代限定为(1\,044±30)~(991±4) Ma, 相当于中元古代末-新元古代初。宁多岩群黑云斜长片麻岩还出现了530 Ma的次峰值年龄(该锆石CL图像发暗、黑色), 系锆石重启年龄, 表明在深部应该有此时的热流活动事件, 对应泛非期的构造活动信息<sup>[134]</sup>。北羌塘地块俄久卖变质结晶基底含夕线石和蓝晶石的片麻岩以及其附近发现的极浅变质的奥陶系地层, 片麻岩中锆石的SHRIMP年龄7组: 2\,498~2\,374、1\,780~1\,666、645~522、465~420、402~369、270~233和223~198 Ma, 其中1\,780~1\,666 Ma为该片麻岩的主期变质年龄<sup>[136]</sup>, 如果这种解释合理, 那么, 泛非期及更晚的年龄应该是事件年龄, 而不是碎屑锆石年龄, 即北羌塘地块亦具有泛非事件的影响。若以泛非事件作为冈瓦

纳的标志,北羌塘-昌都地块的东北部具有泛非记录,在早古生代时具有冈瓦纳属性。至于人们提及的龙木错-双湖缝合带为冈瓦纳大陆的北界<sup>[134]</sup>,则是晚古生代以来的分界。

南迦巴瓦岩群中的部分长英质片麻岩的原岩为形成于 500~490 Ma 的中酸性侵入岩,并具有岩浆弧花岗岩的化学成分特征,而且与其相伴生的钙硅酸盐岩也记录了同时代的变质事件(505 Ma)<sup>[137]</sup>,这些花岗岩可能是原特提斯洋向冈瓦纳大陆北缘俯冲和亚洲微陆块(包括拉萨和羌塘地块)增生的结果,该造山作用开始于冈瓦纳超大陆拼合及其伴生的陆-陆碰撞型泛非造山作用的晚期或结束之后,是在冈瓦纳大陆拼合之后其边缘发生的安底斯型造山作用,因此,它并不属于在冈瓦纳超大陆聚合过程中陆-陆碰撞形成的泛非造山带<sup>[116]</sup>。

藏南亚东及邻区的高喜马拉雅早古生代花岗岩包括 I 型和 S 型花岗岩<sup>[138]</sup>。I 型花岗岩被当作早古生代花岗岩为安第斯造山作用的产物,而 I 型和 S 型花岗岩的同时存在则被认为是增生造山作用的重要标志<sup>[139-140]</sup>。Decelles 等(2000)<sup>[141]</sup>则强调,高喜马拉雅是在晚寒武世-早奥陶世冈瓦纳大陆边缘的俯冲过程中增生到印度大陆上的,并且推测,相关的早古生代缝合带存在于主中央逆冲断裂带(MCT)以及大面积的逆冲叠瓦岩片之中。

因此,青藏高原及邻区的泛非期花岗岩分布较为广泛但不集中,鲜有同期的构造-热事件。局部新元古代花岗片麻岩中可有泛非期的热事件记录,但发育不是很强烈。

**5.1.2 青藏高原及邻区的火山、沉积及不整合与泛非构造时期相对应**,在冈瓦纳古陆及相关地区范围内,出现近同时或稍后的沉积作用。在西亚,土耳其 Menderes 地块有泛非基底(核部)、新元古代变碎屑岩,基底与盖层之间为角度不整合,表明基底曾发生过强烈的抬升和剥蚀,并接受盖层沉积<sup>[142]</sup>。下寒武统底部不整合之下存在低级变质岩,并被寒武纪花岗岩侵入,另外,可能还存在晚寒武世的事件,导致剥蚀和隆起<sup>[143]</sup>,即可能存在多幕事件。

在阿拉伯板块北缘的土耳其 Anatolia 原地体带东南部产出 Derik 火山岩,有安山岩(581~559 Ma)、流纹岩(575~570 Ma)、玄武岩和一些火山碎屑岩、河流沉积,对应安第斯型的 Cadomia 弧。上面不整合覆盖早寒武世的干旱沉积和中寒武-志

留纪的海相沉积。泛非旋回中 Cadomia 的晚期阶段原特提斯洋向南俯冲过程中形成了这些大陆弧火山岩<sup>[144]</sup>,即下寒武统底部、顶部均有角度不整合(unconformity),寒武系与奥陶系之间可能为平行不整合(disconformity),其他部位自寒武纪至新生代为连续沉积<sup>[144]</sup>,反映了稳定区沉积环境。北带(Pontids 带)泥盆系不整合于上志留统之上(志留系呈东西走向,而泥盆系呈南北走向),具有活动带特征。

在伊朗,底寒武系上、下均为不整合,寒武系直下泥盆统与中-上泥盆统之间平行不整合,表明整个古生代期间,伊朗仅为造陆运动,没有造山运动,构造稳定,发育典型的地台沉积。阿富汗的寒武系、奥陶系呈连续沉积,中泥盆统不整合于中志留统之上,有一定的构造活动性。

在喜马拉雅西北部的巴基斯坦,轻微变形-变质的前寒武纪岩石与上覆下寒武统之间为角度不整合<sup>[145]</sup>。而在 Spiti 地区,寒武系内部地层呈整合关系<sup>[146-147]</sup>,寒武系为巨厚复理石沉积:表明为地堑或裂陷盆地环境(造盆运动)。没有经历过挤压褶皱(造山运动:角度不整合)或地壳大范围隆升(造陆运动:平行不整合)。与上覆下奥陶统底部可有沉积间断。

青藏高原西部地区古生代的沉积接触分为两种类型:整合或平行不整合、角度不整合,前者反映了稳定地台、地块或类似的较为稳定的部位,后者则为区域造山带或与之有关的较为活跃的构造位置。

印度大陆北缘自新元古代初期的裂谷、至新元古代晚期的被动陆缘的形成,产出安山岩、玄武岩(530~490 Ma),反映了较为稳定的区域,局部伴随着区域变形和 S-型花岗岩(直至 470 Ma),最后出现 Bhimpedian 造山运动<sup>[116]</sup>,然后,一直呈现被动陆缘,直至喜山运动。

在低喜马拉雅(Lesser Himalaya)具有泛非期锆石碎屑<sup>[148]</sup>,而锡瓦里克以南的印度大陆北部并没有泛非期构造带,因此,高、低喜马拉雅岩石中泛非期碎屑锆石源于这些地块自身或邻近的其他冈瓦纳陆块源。根据古水流向和碎屑锆石年龄谱,肖文交等(2017)<sup>[149]</sup>认为,特提斯喜马拉雅(THS)应该是冈底斯弧前体系,具有单一的欧亚大陆特征,原来划归印度的特提斯喜马拉雅(THS)和高喜马拉雅(GHS)并非代表印度大陆,可能是包含了冈底斯的弧前杂岩及增生的微地体。

拉萨地体新元古-早古生代火山岩主要位于拉萨地体中部, 具有上寒武统和下奥陶统间不整合及双峰式火山岩(酸性岩为主), 仅有少量510 Ma 年龄记录(主要为花岗岩)<sup>[150]</sup>; 申扎地区流纹岩锆石 U-Pb 年龄为(501±2) Ma<sup>[151]</sup>; 也有人从变流纹岩得出(510.6±2.6) Ma 和(524.8±2.9) Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 流纹岩的地球化学性质属岛弧火山岩, 既有早期物质的重熔, 又有新生地幔物质的参与。在冈瓦纳原特提斯洋的边缘其他微陆块亦可见到类似岩石, 结合寒武、奥陶系之间的角度不整合, 可能是冈瓦纳形成之后, 安第斯岩浆弧之下原特提斯洋岩石圈俯冲的结果<sup>[152]</sup>; 或形成于活动大陆边缘背景下原特提斯洋岩石圈板片的断离所致<sup>[153]</sup>。

分布于羌塘龙木错-双湖缝合带南侧(南羌塘地块)的温泉(O<sub>1,2</sub>)石英岩盖层在喜马拉雅、拉萨和羌南地块广泛发育, 董春艳等(2011)<sup>[154]</sup>的分析表明, 石英岩碎屑锆石存在2 500~2 400, 1 900~1 800, 1 100~900, 900~800 和 700~520 Ma 等5个年龄段, 其中950 和 625 Ma 年龄峰值最为明显, 表明在温泉石英岩的物源区泛非构造岩浆热事件和格林威尔-晋宁构造岩浆热事件十分发育。

羌南地块早古生代岩浆岩主要分布在日湾茶卡、都古尔、戈木日、本松错等地区, 岩性以变质辉长岩、变质玄武岩、安山岩、花岗岩、变质流纹岩以及花岗片麻岩等为主<sup>[155]</sup>。对羌南地块的玄武岩有人给出新元古代晚期(548 Ma) 的年龄<sup>[156]</sup>。这些岩浆岩可能是泛非造山运动结束后, 发生陆陆碰撞后的伸展构造环境, 如裂谷构造环境中形成<sup>[157]</sup>, 即冈瓦纳大陆北缘岩石圈伸展减薄的产物, 寒武系和奥陶系之间的不整合可能形成于伸展背景下的断陷盆地中, 但这期岩浆活动在冈瓦纳大陆北缘相对较少。大规模的伸展拆离事件主要发生在早古生代, 主要在羌南、拉萨、喜马拉雅、保山和贡山板块上广泛发育的多期大规模酸性岩浆作用和少量的基性岩浆作用<sup>[158]</sup>。有关伸展减薄的机制问题仍需开展进一步的研究工作。

南羌塘奥陶系、志留系和泥盆系为连续深水沉积, 并认为龙木错-双湖缝合带是冈瓦纳的北界<sup>[159]</sup>。也有地层分析认为泥盆系(灰岩、长石砂岩)底部与其下志留系为整合或平行不整合关系, 均表明了较为稳定区的环境。

在滇西, 公养河群被含丰富化石的无砾石的上寒武统保山组碎屑岩不整合覆盖, 该不整合显

然早于上寒武统-下奥陶统之间的晚泛非不整合面上的砾石层<sup>[78]</sup>。地学界对保山地块寒武系与奥陶系之间的接触关系存在较大争议, 有人认为是整合接触, 有人认为是假整合接触, 在保山施甸地区开展1:5 万区调工作表明<sup>[160]</sup>, 区内普遍缺失下奥陶统沉积, 仅在施甸半坡一带有中奥陶统, 在大寨一带, 中-上奥陶统蒲缥组直接平行不整合在上寒武统保山组之上, 即这里先后至少有2个不整合面, 不整合的时期即性质与南羌塘地块对应, 属稳定区, 但黄勇等(2012)<sup>[160]</sup>结合晚寒武世-早奥陶世业已存在的岩浆活动, 认为这是晚泛非运动的远程响应。

胡培远等(2014)<sup>[161]</sup>报道了藏北羌塘中部驼背岭蛇绿岩中斜长花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果为(504.8±4.2) 和(491.6±1.5) Ma, 相当于中-晚寒武世。斜长花岗岩中锆石具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(11.46~15.16), 反映其源区为亏损型地幔。斜长花岗岩形成年龄略晚于洋壳的形成时代, 表明, 龙木错-双湖-澜沧江洋的开启时限为中寒武世以前。龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带中寒武纪蛇绿岩的发现<sup>[161-162]</sup>, 说明在寒武纪时该洋盆已经在羌南和羌北之间形成, 在古生代, 羌南-保山板块是冈瓦纳大陆北缘的重要组成部分。

南羌塘奥陶系-泥盆系为连续深水沉积, 北羌塘奥陶系-志留系沉积与上覆中-上泥盆统之间为不整合接触, 显示北羌塘可能为活动带性质, 如杨耀等(2014)<sup>[163]</sup>指出, 南、北羌塘的沉积-剥蚀关系正好相反: 早奥陶世-志留纪时, 北羌塘沉积(如志留系)<sup>[164]</sup>, 南羌塘剥蚀; 中奥陶世-早泥盆世期间反过来, 北羌塘剥蚀, 南羌塘沉积。至中泥盆世(D<sub>2</sub>)之后共同沉降, 接受沉积。与“南羌塘稳定区、北羌塘活动带”一致。在南羌塘块体北部, 中-上奥陶统塔石山组底砾岩平行不整合于浅变质中厚层石英砂岩夹薄层泥灰岩之上, 其中不整合界面之下的2 485、980 和 615 Ma 的年龄峰值最为明显。不整合面之上, 塔石山组石英砂岩中的碎屑锆石则存在470~520、580~800、950~1 100 Ma 的年龄变化范围, 其中500、585、800 和 985 Ma 的年龄峰值显著, 表明源区有泛非期的锆石存在(615、585 Ma)。

李才等(2004)<sup>[159]</sup>在前人认为的前泥盆纪基底阿木岗群浅变质岩中早古生代连续沉积地层的发现、晚志留世大型三角洲沉积的发现、海陆变化频繁的沉积环境, 龙木错以东的五指山等地中-上

泥盆统不整合于奥陶系-志留系之上,均证明龙木错-双湖缝合带北侧受到晚加里东运动的影响,与羌塘南部地区(奥陶系-泥盆系为连续稳定的海相沉积)的沉积建造存在显著的差异<sup>[164]</sup>。扬子板块加里东运动这一固有的印记为我们区分两大板块的边界提供了依据。即龙木错-双湖缝合带可作为欧亚大陆与冈瓦纳大陆边界。二叠纪冷水沉积未能越过龙木错-双湖一线,即处于南羌塘地块的北界。

解超明等(2021)<sup>[155]</sup>总结到,寒武系和奥陶系之间的角度不整合在羌南、拉萨、喜马拉雅和保山板块上广泛发育<sup>[78, 116]</sup>,角度不整合的特征显示其更倾向形成于伸展拆离环境而不是碰撞造山环境。

缅甸的寒武系昌马之群上、下均为不整合,具有寒武系-奥陶系之间不整合、奥陶系-志留系之间不整合及志留系-泥盆系之间沉积间断。越南北部庐江带中、上寒武统之间呈不整合,清化区奥陶系底部为不整合,中-下泥盆统与寒武系-下志留统之间有不整合。

另一个最为广泛的不整合位于中-晚泥盆统底部,自西部的土耳其、伊朗,至东部的马来半岛,均可出现,应与加里东运动有关,该不整合的广泛分布表明加里东运动的广泛影响。稳定地块前加里东运动时期的沉积较完整,沉积间断多表现为不整合接触,偶见平行不整合。加里东运动多表现为平行不整合;活动带的沉积可大段缺失,沉积间断之间为不整合,加里东运动表现为不整合。这里的不整合体现了区域内显著的幕式活动特征,而板块构造理论似乎对幕式运动没有清晰的解释。

因此,从沉积不整合的角度看,西部(土耳其、伊朗、巴基斯坦和阿富汗)的古生界内不整合最早,并有两次不整合:下寒武统底部和早-中寒武统之间的不整合。寒武系底部的不整合在缅甸已有发现。中-晚寒武统之间的不整合仅在越南发现。

寒武系-奥陶系之间的不整合范围较为广泛,土耳其(?)、阿富汗、巴基斯坦、喜山、拉萨地块、滇西、缅甸、越南均有,与冈瓦纳之后的隆起有关;奥陶系底部的不整合西自印度西北部、东至越南北部,即喜马拉雅带、拉萨地块最为显著,羌塘地块南缘略有显示。

总而言之,青藏高原及邻区在新元古代初-早

古生代期间具有多个不整合,体现了区域内显著的幕式活动特征。区内可分出相对稳定的地块和构造较为活跃的造山带,分别具有不同的地质特征:相对稳定地块产出火山-沉积建造,沉积序列较完整,可有不整合,但多为整合或假整合;活动构造带可有新元古代花岗片麻岩,容易显示泛非期的构造-热事件,前加里东期沉积多不完整,在泥盆系底部或下部形成不整合。

## 5.2 东昆仑造山带的泛非期活动

依据中国中、西部重要陆块主体基底的形成和固结时代及是否存在~500 Ma的晚泛非期热事件的记录,陈能松等(2007)<sup>[165]</sup>将其划分为塔里木-阿北-阿拉善-欧龙布鲁克陆块群(简称“塔-欧陆块群”)和柴达木-北秦岭-中祁连陆块群(简称“柴-秦陆块群”),两个陆块群之间有着明显不同的组成特征和不尽相同的构造热事件序列。前者“塔-欧陆块群”表现为稳定的地块或克拉通,构造影响表现为沉积间断,如欧龙布鲁克陆块全吉群红藻山组之上的区域性平行不整合,可能代表了新元古代晚期的伸展阶段<sup>[166]</sup>。后者“柴-秦陆块群”各陆块主体发育中元古代末期(~1.0 Ga)的结晶基底,经历了格林威尔期、晚泛非期和早古生代晚期的构造热事件,存在格林威尔期的角闪岩相、局部麻粒岩相变质作用、晚泛非期和加里东期的构造热事件<sup>[164]</sup>。在陆块的单侧或两侧发育早古生代的蛇绿岩套,并将其与“塔-欧陆块群”隔开。因此,“柴-秦陆块群”主体表现为造山带,相当于较为活动的块间造山带区域。

陈能松等(2008)<sup>[167]</sup>对东昆仑造山带东段昆中带的清水泉高级岩片的花岗片麻岩和斜长角闪岩进行了锆石测年,认为~560和~520 Ma的年龄值分别代表了片麻岩的岩浆岩原岩的结晶年龄和变质作用年龄,并有955、895和657 Ma的继承锆石,斜长角闪岩的锆石给出了~550、516和482 Ma的年龄记录。东昆仑造山带中有泛非期事件的报道<sup>[165, 168]</sup>。李怀坤等(2006)<sup>[169]</sup>给出了昆中麻粒岩相变质作用的SHRIMP锆石U-Pb年龄为(507.7±8.3) Ma;张建新等(2021)<sup>[170]</sup>则报道了较多的460~400 Ma期间的变质年龄记录;陆松年等(2002)<sup>[171]</sup>测定了昆中带蛇绿岩中的辉长岩锆石年龄为(522.3±4.1) Ma,即在东昆仑发生了560~516 Ma期间的花岗岩活动、泛非期和加里东期的变质作用,表明它们在原特提斯构造演化早期可能曾发生过陆块汇聚,即“柴-秦陆块群”前期主

要表现为活动带的特征。

### 5.3 塔里木克拉通的泛非期活动

尽管陈能松等(2007)<sup>[165]</sup>将塔里木克拉通作为“塔-欧陆块群”的典型代表,认为塔里木陆块没有经历泛非构造的影响,实际上,因沙漠覆盖,对塔里木陆块的具体情形了解较少。结合地质与地球物理资料综合分析,塔里木陆块前寒武纪具有不同年代、不同类型的基底结构:北部为中-新元古代中浅变质岩基底、中部为古元古代花岗岩基底、南部为新元古代早-中期岩浆岩与变质岩基底、东南部为遭受早志留世区域变质改造的变质基底,除前中元古代记录外,存在950~900、800~700、560~540和500~400 Ma等多期构造-热事件<sup>[172]</sup>。南部特征反而与“柴-秦陆块群”<sup>[165]</sup>类似,而且,对应阿尔金中、南部出现泛非期事件的记录<sup>[102]</sup>。与青藏高原类似,塔里木盆地寒武系底部不整合广泛分布。因此,塔里木克拉通不是铁板一块,南北有差异,南部可能受到泛非期构造的影响。

### 5.4 柴北缘造山带的泛非期活动

柴达木北缘基底以沙柳河岩群乌龙滩岩组为主体,被新元古代早期(904±18 Ma)<sup>[173]</sup>的碰撞型花岗岩类岩体侵入,于540 Ma发生绿片岩相变质作用;在柴北缘滩间山群发育(514.2±8.5) Ma的埃达克质酸性火山岩<sup>[174]</sup>,洋壳深俯冲的峰期年龄可推至510 Ma之前。

朱小辉等(2015)<sup>[175]</sup>指出,柴北缘地区在850~750 Ma时受Rodinia超大陆裂解事件的影响发生了张裂,形成一些陆壳属性的高压变质岩原岩;700~535 Ma时在裂解事件的基础上形成了一个新元古代-早古生代的洋盆,具洋壳属性的含柯石英榴辉岩原岩形成于516 Ma,在535~460 Ma期间该洋壳发生了俯冲消减作用、460~450 Ma期间洋盆闭合消失,由陆壳深俯冲形成高压/超高压变质带。柴北缘地区可能记录了从洋壳俯冲、大陆俯冲再到碰撞造山这一完整的演化历史过程,是一条典型的早古生代造山带。柴北缘构造岩浆岩带的早古生代花岗岩限于500~400 Ma之间<sup>[176]</sup>。

刘永江等(2012)<sup>[177]</sup>对柴北缘路乐河剖面新生代沉积物和山前现代河沙中碎屑的锆石研究表明,物源区发育显著的823、539和470~430 Ma主要年龄峰值,柴北缘-南祁连地区先后主要经历了900~800 Ma的Rodinia超大陆裂解事件、600~500 Ma的泛非期区域变质事件和~450 Ma的俯冲碰撞变

质事件,泛非期锆石可能源于南部的东昆仑<sup>[167]</sup>、阿尔金山<sup>[103]</sup>,甚至柴达木地块自身(如中心部位)。对比秦岭岩群的特征(下文),柴北缘路乐河剖面新生代沉积物和山前现代河沙中碎屑的锆石<sup>[177]</sup>泛非期年龄颗粒应该源于新元古代早期花岗片麻岩中的泛非期事件叠加。

### 5.5 西昆仑造山带的泛非期活动

西昆仑塔什库尔干南部(塔阿西一带)布伦阔勒岩群中赞坎英安斑岩的锆石分别为(533±10) Ma及(527.4±9.0) Ma,锆石Hf同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-3.31~-9.02,平均为-5.40,具有明显的不均一性,Hf平均地壳模式年龄为 $t_{\text{DM}}=1.70\sim 2.06$  Ga,峰值在1.7~1.8 Ga左右,与锆石形成年龄533 Ma相差甚远,说明这类锆石的母岩中主体是再造的古老地壳,同时也可能混合幔源,对应着1.7~2.0 Ga地壳再造<sup>[178]</sup>。布伦阔勒岩群中侵位的斜长花岗斑岩具有(544.5±4.7) Ma的锆石SHRIMP年龄<sup>[179]</sup>。在麻札-甜水海一带辉长岩、花岗岩的侵位年龄~530~490 Ma<sup>[180]</sup>,这些岩浆岩的产出表明西昆仑有泛非期构造的影响。

### 5.6 祁连造山带的泛非期活动

中祁连地块出现多处的新元古代早期花岗片麻岩<sup>[181]</sup>。在该期花岗岩(935±5 Ma)中可见早古生代花岗闪长岩侵位,其锆石给出469 Ma的结晶年龄,尚有567~487 Ma的继承或重启锆石年龄(本研究未发表资料),显示了泛非期构造的可能影响。

北祁连造山带中的变沉积岩中的碎屑锆石U-Pb年龄有600~540 Ma之间的集中<sup>[182]</sup>,天水市以北祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石中有约559和445 Ma峰值<sup>[182]</sup>,其源区受到了泛非期事件的影响。根据徐学义等(2008)<sup>[176]</sup>的总结,祁连构造-岩浆岩带的早古生代花岗岩限于500~400 Ma之间。

陆松年等(2009)<sup>[184]</sup>认为,北大河岩群最小碎屑锆石年龄峰1400 Ma,变质年龄863 Ma,因此,其沉积介于1400~863 Ma之间,并有(757±8) Ma花岗(片麻)岩侵位。祁连山造山带西部朱龙关群位于北大河岩群之中,在厚度和岩性在横向上极不稳定,朱龙关群(拉班、碱性)玄武岩喷发于600~580 Ma,为古祁连洋发育初期裂谷的产物,其裂谷环境,与澳大利亚东南部可对比,系Rodinia伸展、裂解导致<sup>[66]</sup>,朱龙关群玄武岩可能代表了北大河岩群内的凹陷、裂解,即对应伸展构造,被认为与冈瓦纳聚合过程中内部泛非期挤压构造

相对应<sup>[66]</sup>。朱龙关群所覆盖的北大河岩群可能与中祁连地块类似(张建新,私人通信)。结合前人研究成果表明,祁连山新元古代岩浆活动记录了新元古代早期汇聚、新元古代晚期伸展到裂解的长期演化过程。实际上,在中祁连地块本身,既具伸展构造,亦有泛非期构造-热事件的迹象,说明这些地区的“泛非构造”是自身生产的,未必是冈瓦纳古陆内部的特征。

### 5.7 秦岭造山带的泛非期活动

秦岭造山带中同样有早期格林威尔构造、晚期泛非和加里东期活动的现象<sup>[185]</sup>。秦岭岩群商南段古生代花岗岩中有早期格林威尔期及泛非期记录残留(图6),而围岩中却无,仅显示古-中元古代的继承锆石,这一点,与青海化隆县合群峡的化隆群、甘肃天水市马跑泉麦积山风景区冷水河

村的花岗岩脉的情形类似,结合北羌塘地块新元古代早期宁多岩群(变深成岩)黑云斜长片麻岩中出现 530 Ma 的锆石重启年龄,可能对应深部泛非期热活动事件<sup>[134]</sup>,说明花岗岩源区或深部岩石中可有格林威尔期及泛非期锆石的存在,而且,泛非期事件记录的不仅是水平方向的构造带如拼贴、增生过程,亦有可能反映了壳内垂直方向的变化,有一部分活动可能起源于深部:深部热流异常及其引发的一系列现象,特别是花岗岩的侵位、上升,其中裹挟了较多的泛非期构造信息。当然,这种构造应该是地块内部、而不是地块之间的活动,如同青藏高原东北缘的祁连-阿尔金-昆仑早古生代造山系中所夹的一些前寒武纪地质体普遍遭受早古生代造山事件的改造或再活化<sup>[170]</sup>,由此可知部分泛非期构造具有陆内活动的性质。

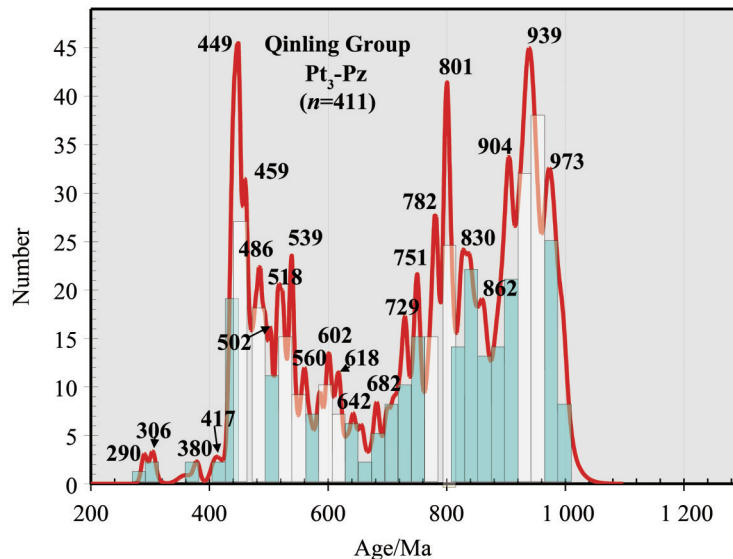


图6 秦岭岩群中长英质岩石新元古代以来的年龄记录

Fig. 6 The histogram showing the major zircon age records of the felsic rocks in the Qinling Complex since the Neoproterozoic

秦岭东段南缘沿商丹断裂带出现富水辉长岩约 500 Ma<sup>[186]</sup>,片麻状辉长闪长岩 491 Ma(本研究未发表资料),均显示拉张环境的产物;而北部秦岭岩群中泛非期花岗岩(如漂池岩体)记录热事件(492±4 Ma)与近于同时的北缘的榴辉岩则记录了典型的俯冲、碰撞环境,表明秦岭造山带范围内挤压与拉张环境的同时出现,反映了“泛非期”构造-热事件与裂陷或洋盆可以同时异地发生,由此限定了该区泛非期构造的活动性质。

### 5.8 阿拉善地块的泛非期活动

阿拉善地块何时与华北克拉通拼贴、成为华

北克拉通的一部分,仍是一个尚未解决的问题。该地区产出新元古代早期(926~904 Ma)变形花岗岩<sup>[187]</sup>,锆石 Hf 两阶段的模式年龄峰值在 1.56 Ga,花岗岩岩浆来自具有较长地壳滞留时间的地壳物质的部分熔融。这个时期的花岗岩在华北克拉通的其他部位并没有出现。

至于泛非期构造,现在有更多的资料显示,并基本为碎屑锆石的记录,在早古生代沉积中可有显著的泛非期碎屑锆石年龄峰,如阿拉善地块南缘龙首山东段“龙首山岩群”中的寒武纪大黄山群的碎屑锆石具有 600~500 Ma 的年龄峰,其中

砂岩甚至具有 561 Ma 的最强峰, 并认为源自祁连山地块的火成岩<sup>[188]</sup>。在阿拉善东缘鄂尔多斯(华北地块)与北祁连早古生代造山带之间的过渡地区奥陶统米钵山组的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄中, 除了数量最多的新元古代早期年龄 950~900 Ma 峰外, 还有重要的 623~494 Ma 年龄区间, 如 623、588、517、505 和 494 Ma 的峰值, 认为早古生代物源主要来自北祁连造山带, 与华北克拉通是在中奥陶世或之后才拼贴在一起<sup>[189]</sup>。

如前所述, 北祁连造山带可能有一些泛非期的构造记录(本研究未发表资料), 但并不显著。米钵山组碎屑锆石中, 泛非期锆石 CL 多呈黑色, U 含量较高<sup>[189]</sup>, 说明泛非期活动可能为先存地质体的再活化所致, 早古生代阿拉善地块应该与泛非构造带相毗邻。或者, 根据较为普遍的早期格林威尔构造、晚期伴以泛非和(或)加里东期活动的现象来看, 阿拉善地区早古生代地层中的泛非期碎屑锆石很可能源于阿拉善地块自身, 即可望在阿拉善地块内(如中、东部)找到泛非期岩石的直接记录。

### 5.9 佳木斯-布列亚-兴凯地块及中亚造山带的泛非期构造

关于中亚造山带中的典型泛非期构造, 分别从变质作用、花岗岩、沉积与不整合及蛇绿岩等方面来论述。

#### 5.9.1 变质作用与花岗岩

整体上, 佳木斯地块构造走向呈 NE, NNE 和 NEE 方向, 新断裂大致与片麻理方向一致。根据岩石建造和变质程度的简单对比, 曾认为佳木斯地块的麻山群形成于太古代。近年来大量的同位素测年证明, 主要的高级变质作用, 尤其是花岗岩活动发生在早古生代。Wilde et al. (2003)<sup>[190]</sup>更是通过与东澳、南极洲的对比认为, 这里发生了典型的泛非构造, 并伴随少量加里东期的花岗岩活动。进一步的研究认为, 兴凯地块、布列亚-佳木斯曾经属于同一个构造单元, 具有相同的演化历史, 都经历了泛非期构造的影响<sup>[191]</sup>。远东地区的布列亚地块具有 937~933 Ma 的辉长岩、花岗岩侵位, 认为形成于大陆弧环境<sup>[192]</sup>。

我国东北地区的佳木斯和兴凯地块、以及额尔古纳、兴安、松辽地块等断续分布有泛非期高级变质岩和岩浆岩, 其变质年龄为 ~500 Ma, 记录了从 Rodinia 到冈瓦纳的聚合与离散过程<sup>[193]</sup>。

#### 5.9.2 沉积与不整合

兴凯地块有新太古代-古

元古界岩石和里菲期-早寒武统的连续沉积, 地块中部的 Matveevka-Nakhimovka 亚带有前寒武纪基底, 其余的部位则为厚层古生代沉积-火山盖层<sup>[194]</sup>, 这些基本属于稳定型沉积。兴凯地块北部基性岩床锆石 U-Pb 年龄((757±4) Ma)<sup>[195]</sup>, 显示了该时期的张性活动。

兴凯湖东南地区, 紧邻麻粒岩相变质岩有早寒武世的大陆裂谷沉积, 时限为从冰积层开始的震旦纪至中寒武世初, 不整合对应的主褶皱幕发生在早、中寒武世之间, 被称作兴凯运动<sup>[196]</sup>。兴凯地块东缘寒武系底部不整合于变质岩之上, 再向上, 上寒武统与下奥陶统之间为一层砾岩, 是否不整合难以确定<sup>[197]</sup>。也就是说, 兴凯地块东缘仅有局部寒武系底部为不整合, 而下寒武统之上不整合明显, 局部下寒武统底、顶部均有不整合。实际上, 与西亚类似, 兴凯地块、松嫩地块、蒙古、俄罗斯均有寒武系底部(下部或底部)的角度不整合。

Scheka et al. (2001)<sup>[198]</sup>提出兴凯地块东缘存在蛇绿岩的可能性, 认为兴凯蛇绿岩是在增生杂岩体发育之前、在一次寒武纪大陆裂谷/碰撞事件中(中寒武世)形成的, 该裂谷/碰撞事件发生在早-中寒武世界线附近很短的时间跨度内(约 10 Myrs), 厚层的碎屑岩序列及其沿走向显著的岩性变化, 说明兴凯“蛇绿岩”形成于一个硅铝质裂谷带或大陆边缘的小海盆之中, 更像是被动陆缘的性质, 而不是“活动陆缘”的特征。

更北部的布列亚地块新元古界与下寒武统整合接触(连续沉积), 变质程度很低(绿片岩相), 与麻山杂岩的中-高级变质程度明显不一致。向上, 角度不整合间断地超覆磨拉石型上寒武统砾岩、砂岩、粉砂岩和安山-流纹质凝灰岩, 与青藏高原的拉萨地块或南羌塘地块有类似之处<sup>[151-152]</sup>。再向上为志留系(~444 Ma)和泥盆系, 伴有一系列的间断和不整合<sup>[199]</sup>。

佳木斯地块北部有新元古代中-晚期的碎屑岩沉积, 金银库大理岩经对比为下寒武统沉积。佳木斯地块以西的伊春地区, 下寒武统之上为角度不整合, 再向上为中-上奥陶统; 稍南的中-下泥盆统砂岩、凝灰岩、灰岩显示短暂时期内的微弱拉张、裂隙不深的裂隙槽。

佳木斯地块西侧的张广才岭北部有中元古代-早寒武世的裂谷沉积, 形成东风山铁矿、晨明组(下寒武统)碳酸盐岩和页岩等较为稳定环境下的

沉积,属于西伯利亚生物区系。黑龙江省内上早寒武世末普遍存在角度不整合,缺失中-上寒武统,表明寒武纪曾发生过一次较大规模的造山运动<sup>[200]</sup>。根据王成文等(2009)<sup>[201]</sup>的总结,“佳-蒙古陆”北缘元古界片(麻)岩之上为不整合,再上为早古生代,之上为不整合,再上为下泥盆统。

天山地区大量的的资料尚待总结。西南天山地区那拉提地区具有新元古代早期的花岗片麻岩<sup>[202]</sup>,其北缘断裂北侧出露寒武纪((516.3±7.4) Ma)橄榄拉斑玄武岩,为过渡型洋脊玄武岩(T-MORB),认为形成于洋中脊的扩展型裂谷环境<sup>[203]</sup>,并与柴北缘滩间山群所代表的陆缘小洋盆类似<sup>[170]</sup>。

在中亚造山带的图瓦-北蒙古地块和萨彦岭的萨拉伊尔构造范围内,文德系-中寒武统巨厚细碧-角斑岩及蛇绿岩建造于晚寒武世之前经受了强烈的褶皱-推覆变形(中、上寒武统之间),并普遍被晚寒武世的花岗闪长岩、斜长花岗岩及钾长花岗岩侵入,标志着萨拉伊尔旋回的结束<sup>[199]</sup>。有些部位变形持续到加里东期末,之上不整合,再上为(509~444 Ma)上寒武统-奥陶系(戈尔诺阿尔泰群)碎屑岩次复理石,其上又不整合产出(444~393 Ma)志留系-下泥盆统的碎屑-碳酸盐岩地层(早加里东褶皱期:塔昆期)、再被中-上泥盆统的黑色页岩群和下石炭统的碎屑岩-碳酸盐岩超覆。泥盆系覆于强烈褶皱的萨拉伊尔杂岩之上。

总之,兴凯-布列亚-佳木斯地块既有相对稳定环境下的沉积建造,如中-新元古代稳定沉积、新元古代和早古生代裂谷环境下的碎屑岩沉积,甚至局部有小洋盆的存在,也有相对活动带的显示,即相当于格林威尔期的花岗片麻岩或变质捕虏体,并经历了泛非期的高级变形-变质作用叠加、花岗岩侵位等记录的典型泛非期构造和加里东期活动。具有多期构造活动叠加,变质带、花岗岩的分布呈复杂的“带状”分布,似乎属于造山带范畴,而不是典型的地块。或者,很难用地块或造山带来统一概括这3个所谓地块的特征,似乎显示了相对稳定地块和活动带相间分布的盆山格局。

东北地区中俄交界处的兴凯、佳木斯和布列亚地块,甚至一些中亚造山带中的其他陆块、造山带上的不整合、花岗岩等与青藏高原的主要地块有诸多类似之处,说明了尽管其现在距离遥远,在早古生代可能处于类似的构造位置。

## 5.10 华夏地块的泛非期活动

在Rodinia复原中,华夏地块与扬子古陆、劳伦古陆、澳洲、南极洲形成一个整体,华夏地块和扬子西缘古生代沉积岩中600~550 Ma碎屑锆石年龄,如云开地块的高州杂岩中麻粒岩、副片麻岩有610~540 Ma的继承锆石<sup>[204]</sup>,表明有泛非期岩石物源,并与源自冈瓦纳的地质体如特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、羌塘地块、印支地块和印度北部有着类似的年龄谱,因此,华南-印支地块联合体可能是冈瓦纳的一部分,并通过泛非碰撞带与北印度相连<sup>[205]</sup>。而扬子克拉通、华北克拉通主体不论碎屑锆石还是内生锆石,均没有明显的泛非期记录,远离泛非地质体物源,与其基本处于海平面之下<sup>[111]</sup>有关,在构造上可能与冈瓦纳呈分隔状态,没有受到泛非期构造的实质性影响。

华夏地块内具有古元古代片麻岩记录<sup>[205]</sup>,并产出浅变质英安岩和晶屑凝灰岩(LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄(729±4)和(735±6.7) Ma)<sup>[206]</sup>,其间存在746~696 Ma浅变质的中酸性火山岩和(592±3) Ma的细碧岩(中国地质调查成果快讯,2019)。

浙西北寒武系陆源碎屑物质有2 131、1 768、747和574 Ma的锆石年龄,主要来源于陈蔡群、双溪坞群、河上镇群及八都群,即华夏褶皱带自身,华夏地块露出水面为剥蚀区<sup>[207]</sup>。实际上,华夏地块本身即具有泛非期事件的记录:新元古代斜长角闪岩中出现锆石年龄(533±7) Ma的集中<sup>[208]</sup>,说明自Rodinia形成的1 000~890 Ma时期以来,源区岩石在深部停留了超过300 Myrs的时间,并经历了泛非期地壳活化过程。

以上主要讨论的是亚洲大陆、特别是中国大陆范围内的泛非构造的显示,分别描述了冈瓦纳主体及外缘地质体泛非构造的异同,以及造山带与稳定地块内泛非构造的区别。实际上,除亚洲外,类似的现象在欧洲大陆如挪威加里东造山带、北美东缘的阿巴拉契亚造山带、格陵兰东缘的加里东造山带及北极圈内的斯瓦尔巴德群岛地质体等,均具有相似的特征和演化历程。它们多少显示泛非期事件或构造的记录,可能曾位于冈瓦纳周边,因冈瓦纳的裂解、古太平洋的扩张而迁移至目前的位置。

## 6 关于超大陆

古超大陆的研究是目前地学界的一个热点<sup>[55,57,82]</sup>,即把全球古大陆作为一个统一的体系考

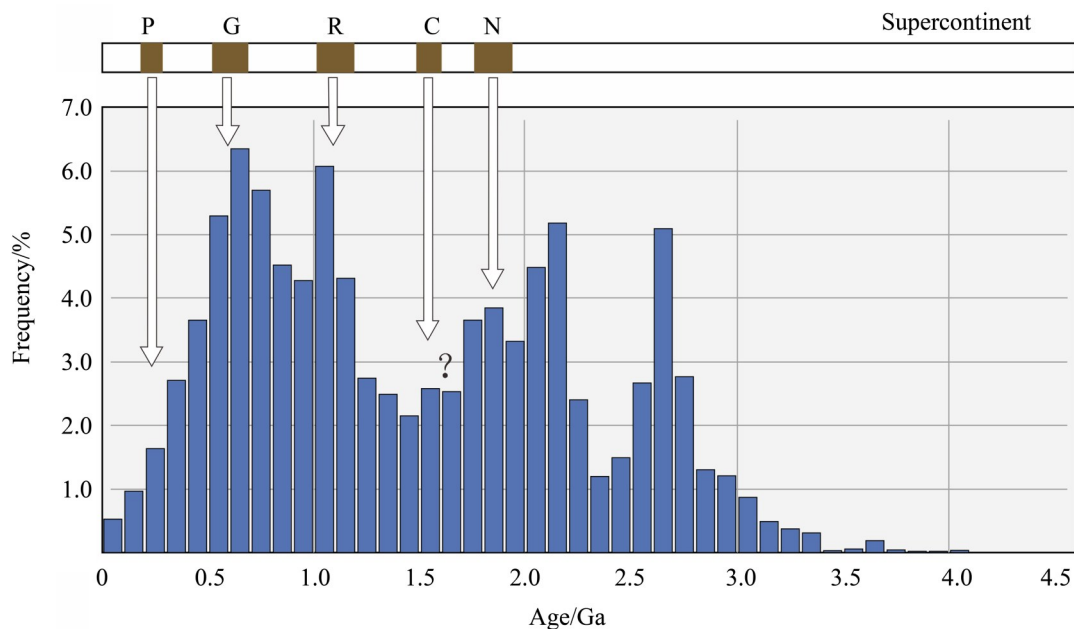
虑, 强调各大陆(陆块)之间的相互联系, 单个大陆(陆块)只不过是这一体系中的一个个体, 其间的联系即造山带。

针对超大陆的形成, 有人提出内部新洋壳的聚合(introversion)和陆块外缘的聚合(extroversion)两个极端过程模型<sup>[83]</sup>。通过introversion形成的超大陆, 地壳年龄晚于早期超大陆裂解的时代; 由extroversion形成的超大陆, 重新汇聚中消减的洋壳早于前期超大陆的裂解, 即增生的镁铁质岩石年龄老于裂解时期。在古生代阿巴拉契亚加里东-华里西造山带中, 由于潘吉亚(Pangea)的形成出现一条重要的碰撞造山带, 增生的镁铁质岩晚于Iapetus洋的形成, 即晚于~600 Ma, 系introversion过程。而新元古代形成冈瓦纳的东非造山带(Eastern African Orogeny)和巴西利亚造山带(Brasiliano Orogen)中, 镁铁质杂岩的形成年龄(~1.20~0.75 Ga)早于Rodinia的裂解时代(~750 Ma), 即这些杂岩形成于围绕Rodinia的外大洋, 其在冈瓦纳形成过程中被消减。因此, 潘吉亚形成于introversion, 而冈瓦纳是extroversion过程。当然, 这里指的是东、西冈瓦纳之间的相互作用过程, 至于东冈瓦

纳或西冈瓦纳内部, 特别是东冈瓦纳内部, 是否有可能是introversion, 甚至内部重新活化的过程, 仍是一个有争议的问题。

关于古超大陆的演化、不同时期超大陆的复原, 简直可以说是地学界的鸿篇巨制<sup>[8, 64, 83, 116, 141]</sup>。如同板块构造基本被地学界所接受, 但就其动力机制、起始时间仍存争议一样, 有关古超大陆的认识在很大程度上是一种假说, 特别是关于潘吉亚(Pangea)以前的古超大陆的重建以及认识, 存在很大的不确定性。如Rodinia古超大陆是否存在? 只是多数人承认有这样一个古超大陆<sup>[209]</sup>, 若存在的话其复原样式仍是尚未解决的问题<sup>[210]</sup>。

元古宙-显生宙之交的泛非事件(700~500 Ma)是地球历史上分布最广泛的造山带之一<sup>[5, 211]</sup>。全球范围内, 根据河口碎屑锆石年龄统计, 最强的两个峰为格林威尔(1.2~1.0 Ga)和泛非期(0.7~0.5 Ga), 且泛非期的年龄峰最为突出(图7)<sup>[70]</sup>, 其中, 除了北美洲产出较少外, 其他大陆均有该期年龄的明显记录。本图没有南极洲和大洋洲的资料, 考虑到南极、澳大利亚地区大量泛非构造, 若计入其信息, 泛非期的年龄峰将会更加突出。



C-Columbia, G-Gondwana, N-Nuna, P-Pangea, R-Rodinia.

图7 全球主要大陆河口碎屑锆石年龄直方图显示的陆壳幕式生长和超大陆旋回(据Rino等, 2008<sup>[70]</sup>修改)

Fig. 7 Episodic growth of continental crust and the supercontinental cycle as illustrated from the river-mouth zircon data histogram (modified after Rino et al., 2008<sup>[70]</sup>)

根据Veevers等(1997)<sup>[85]</sup>的总结, 寒武纪晚期(~500 Ma)东冈瓦纳其他地区的事件包括克拉通的

造陆抬升(显示为广泛的K/Ar年龄磷灰石裂变径迹年龄)、石英浊积扇的形成以及沿南极和东南澳断

续变形和花岗岩侵位,继之以全球海平面上升达到最高。这些事件可与中白垩世(100~90 Ma)的澳大利亚陆地抬升、北美西部花岗岩侵位,继之以第二次全球海平面上升达到最高相比较。

关于冈瓦纳的抬升与海平面升降的关系,似乎是冈瓦纳的整体抬升,应该伴随着海平面的下降。这要看考虑问题的角度。如同居于池塘中间悬浮的一个物体浮出水面,会引起池塘水平面下降一样,冈瓦纳的抬升,引起海平面的下降。而从太空的角度看,冈瓦纳的形成、抬升,特别是其伴随的大量基性岩浆底侵<sup>[5, 41]</sup>和花岗岩就位、隆升,可以理解为在全球海洋中增加一个外来体积,只不过这个外来物是从下部进入的,冈瓦纳的抬升会引发全球海平面上升,而不是下降。

全球海平面显著升高的两大旋回均由超大陆引起的热流驱动,引起全球性的伸展和裂谷、边缘沉降和沉积充填,继之以大陆漂移和海底扩张。由 1 100 Ma 所代表的全球变形(Grenvillian)对应 Rodinia 泛大陆聚合;第二次超级旋回 B(720~320 Ma)期间,泛大陆诱发的热流至少从 720 Ma 以来,改变了早期地球历史的演化轨迹,并开启了现代板块运动的模式<sup>[85]</sup>。

## 7 讨 论

泛非构造是发生在元古宙和显生宙之交、主要限于冈瓦纳古陆范围内的构造带。泛非构造在西、东冈瓦纳的表现形式不尽相同,既有洋盆闭合、碰撞或裂谷封闭,也有古老造山带的再次活化,均表现为强烈的构造-热流事件活动和显著的花岗岩侵位,甚至基性岩喷发。泛非构造带固结之后冈瓦纳形成,对应全球花岗岩(~500 Ma)侵位的顶峰,并引起全球海平面上升。

泛非构造多沿着早期格林威尔活动带(1 100~900 Ma)继发,且这些活动带与北美典型格林威尔带(1 250~980 Ma)有所不同。根据 Murphy & Nance(2003)<sup>[83]</sup>,冈瓦纳的形成属于 extroversion 过程,其中缝合、碰撞应集中于东非造山带和巴西利亚造山带中。Rodinia 于新元古代中期(~750 Ma)发生裂解,形成镁铁质杂岩(~1.20~0.75 Ga),并于泛非期发生外大洋消减。

我国的一些与泛非期构造接近或类似的一些地质单元如中国青藏高原的低、高喜马拉雅带、拉萨地块、羌塘地块和秦祁昆造山带(如东昆仑、中祁连地块中)均有泛非期活动记录,以及柴北缘

造山带、秦岭造山带、中祁连地块、阿尔金造山带、华夏地块亦如此,这些泛非期活动多限于新元古代早期花岗片麻岩之中,在泛非期缺乏明显的变形-变质记录,而与冈瓦纳典型的泛非构造有所不同。东北地区兴凯地块、佳木斯地块和布列亚地块似乎具有典型的泛非期变质作用和花岗岩活动<sup>[190, 212-213]</sup>,中亚造山带内其他微陆块也可见泛非期构造<sup>[214]</sup>。可以说,中国境内的早古生代造山带几乎均有泛非期事件或构造的显示,甚至部分所谓的地块亦有记录,如华夏地块、塔里木地块等。

这些构造单元在冈瓦纳复原中总体上位于冈瓦纳的边缘,且时间上稍晚。按目前的认识,这些地质体曾与冈瓦纳古陆有联系,恢复这些地块与冈瓦纳的相对位置有利于了解亚洲、甚至亚欧大陆的增生过程。

根据前面的介绍,一些格林威尔期、泛非期碎屑锆石,并非源于冈瓦纳,而是源自亚欧大陆自身的造山带,说明这些地区的“泛非期构造”是自身生产的,与冈瓦纳古陆主体没有直接关系。这些造山带或地块未必都并入冈瓦纳,而是在冈瓦纳边缘造成一些松散陆块或造山带,并在冈瓦纳边缘或与劳伦、西伯利亚过渡区的位置出现拉张-挤压活动,形成一些盆地、裂谷或洋盆。与冈瓦纳主体的泛非构造相对应,这些过渡区亦可出现俯冲、碰撞。过渡区的活动强度似乎介于活跃的大洋和稳定的大陆之间,并形成多个小型凹陷或洋盆、面状或带状分布的地质体,伴随一定量的新生陆壳物质。这里相对稳定区与活动带可以相间分布。古亚洲构造域是面积较大、较为集中的冈瓦纳边缘或过渡区。

活化带形成的地质体处于稳定单元边缘或之间时往往被称作造山带(如柴北缘、东昆仑、北秦岭),而与稳定单元有显著间隔、相对独立时则称作微陆块(拉萨地块、南羌塘地块、中祁连地块、佳木斯地块等);有的地质单元则具有归类争议,如华夏褶皱带或华夏古陆;甚至称作“弧”,如北山地区的花牛山弧等,邓晋福等(2015)<sup>[104]</sup>意识到,造山带内一些所谓的“地块”并没有构造“稳定”的岩石构造组合的记录,实际上为新元古代残留弧,其前寒武纪建造与洋俯冲环境有关,在古生代时段仍为时代较新的沟弧盆系统中的重要成员。因此,原先认为的一些微陆块实际上可能是早期的活动带,格林威尔造山带的形成范围比现在在保

留的大得多。

冈瓦纳外围的泛非期构造涉及大规模中、下地壳, 即陆壳内的活动, 可能是板内为主的一种过程, 并与引张活动有关, 拉张从深部开始, 深部热流自下而上的影响, 活动基本限于上地幔、下地壳, 可造成陆壳的差异上升, 影响显著的可在浅部形成凹陷、盆地或山脉等, 而限于水平方向的挤压、拼贴。

整体引张背景下, 活动型地质单元可发生裂解, 形成火山-沉积, 如中祁连地块新元古代中-晚期和早寒武世的陆内裂谷火山作用分别与澳洲-南极-华南/劳伦、澳洲/塔里木陆块间的裂解有关<sup>[215]</sup>。其扩张期形成的(小)洋盆随后的收缩, 可形成加里东期构造。新元古代晚期-早古生代初期冈瓦纳边缘的初次裂解导致部分微陆块散布于亚洲、欧洲。这是冈瓦纳形成后的初次裂解, 并可在全球范围内相对稳定地块或构造部位表现为早寒武统底、顶部的不整合, 以及寒武-奥陶之间的不整合(如李才等<sup>[78]</sup>)。冈瓦纳古陆内的泛非构造带容易成为后期大陆裂解的部位, 如大西洋的形成<sup>[112]</sup>。

一些碎屑沉积中具有显著的泛非期锆石, 但缺少物源。在冈瓦纳古陆多次裂解过程中, 分离出去的陆块除了部分可持续移动而存在外, 不排除部分陆块在显生宙复杂的板块运动中被俯冲、淹没或剥蚀, 同样的情况也可以发生在泛非构造带上, 如冈瓦纳复原中印度-澳大利亚之间的部分(图1和图5), 可能有隐藏或消失了的泛非构造带。

沉积建造及不整合类型大致与地质单元的活动性相对应, 如兴凯-布列亚-佳木斯地块既有相对稳定环境下的沉积建造, 如中-新元古代稳定沉积、新元古代和早古生代裂谷环境下的碎屑岩沉积, 甚至局部有小洋盆的存在<sup>[198]</sup>, 也有相对活动带的显示, 即相当于格林威尔期的花岗片麻岩或变质捕虏体, 并经历了泛非期的高级变形-变质作用叠加、花岗岩侵位等记录的典型泛非期构造和加里东期活动。青藏高原及邻区具有多个陆块, 在新元古代初-早古生代期间具有多个不整合, 体现了区域内显著的幕式活动特征。区内可分出相对稳定的地块和构造较为活跃的造山带, 相对稳定地块产出火山-沉积建造<sup>[150-151]</sup>, 沉积序列较完整, 可有不整合, 但多为整合或假整合; 活动带可有新元古代花岗片麻岩, 容易显示泛非期的构造-热事件, 加里东期之前的沉积多不完整, 尤其

是泥盆系底部或下部多为不整合。这种相对稳定地块和活动带的相间分布形成一致独特的盆山格局。按照这种思路, 拉萨地块、南羌塘地块基本属于相对稳定型的部分, 而“聂荣微陆块”、甚至北羌塘地块则大致对应活动带。同理, 华夏褶皱带与其他加里东造山带一样, 应该是造山带而不是地块。除了巨型板块外, 微板块的活动造成了局部接触关系的复杂化, 值得研究。

另外, 不论青藏高原、中央造山带、中亚造山带, 或者欧洲西部、北美洲东缘的一些地块和活动带有诸多类似之处, 如不整合的时代及性质、新元古代早期花岗片麻岩、新元古代中-晚期的张裂活动、泛非期事件的显示与记录和加里东期构造运动的存在, 说明尽管其现在相距遥远, 在早古生代可能处于类似的构造位置, 如冈瓦纳边缘附近。进而表明, 虽然现在分处不同的构造域, 如古亚洲构造域、中央造山带、青藏高原或环太平洋带, 在新元古代-早古生代, 这些不同部位之间的差异远比现今小得多。

根据前面的介绍, 冈瓦纳外围(如亚欧大陆)的泛非期活动与非典型性的格林威尔活动带(1 100~900 Ma)有关, 即这种关联事件在全球多处发生, 而不仅限于冈瓦纳自身, 也就是说泛非期构造的发生可能是多中心的。也就是说, 泛非构造活动中心或最强烈部位在冈瓦纳古陆<sup>[3]</sup>, 但其影响几乎波及到了全球所有大陆。在冈瓦纳外围的泛非期活动主要体现在稳定陆块间的活动带、微地块的中心(中-深)部位, 即与冈瓦纳古陆自身以俯冲、碰撞为主有所不同。冈瓦纳主体的形成、固结, 伴随周缘的裂解以及显著的加里东期构造, 均表明泛非期构造与现代板块机制的运行密切相关。反映了全球陆块间的剧烈活动过程, 也是生命演化的关键转折点。因此, 泛非构造运动是全球最为重要的构造运动之一。

## 8 结 论

泛非构造是新元古代晚期-早古生代期间、主要发生冈瓦纳古陆范围内的构造-热事件, 其表现既有板块或陆块间的缝合、碰撞, 也有古老造山带的重新活化, 如沿着早期格林威尔构造带的继发活动; 泛非构造之后冈瓦纳得以形成, 同时伴随其他大陆的裂解和全球海平面上升, 并可在全球范围内形成早古生代的重要不整合。

中国东北地区兴凯地块、佳木斯地块和布列

亚地块显示典型的泛非期变形-变质作用和花岗岩活动,而其他一些重要造山带多显示泛非期构造的影响,如新元古代早期片麻岩之中形成泛非期热事件迹象或花岗岩侵位,但缺乏明显的变形-变质记录,而与真正的泛非构造有所不同,如青藏高原、中央造山带和中亚造山带,甚至华夏地块、塔里木地块亦有泛非期记录,即中国境内几乎所有的早古生代造山带、部分的地块亦有泛非期事件或构造的记录。这些地区泛非期构造之后常发生更为剧烈的加里东期构造,即加里东构造影响范围对泛非期构造有很好的继承性。

泛非期事件的发生可能是多中心的。亚欧地区的泛非期物质可能源自该区造山带,并非源于冈瓦纳,不属于冈瓦纳古陆主体;这些造山带或地块在冈瓦纳形成时未必都并入冈瓦纳古陆,而是在冈瓦纳边缘造成一些松散陆块或造山带,即过渡区,其活动强度似乎介于活跃的大洋和稳定的大陆之间,与冈瓦纳主体的泛非构造相对应,并可出现拉张-挤压活动,形成一些盆地、裂谷或

洋盆,以及俯冲、碰撞,并造成相对稳定区与活动区可以相间分布。这里,泛非期事件的活动基本限于活动区中、下地壳,可能是板内为主的一种过程,并与引张、剪切活动有关,而限于水平方向的挤压、拼贴。除了稳定的克拉通外,地质活动区内可进一步分为相对稳定区和相对活跃带,其沉积建造、火山类型、不整合性质、构造变形强度、变质作用类型-级别和岩浆作用类型与强度均有显著区别。

泛非期构造既造就了冈瓦纳,亦影响到了其周边地质体,几乎波及到了全球所有大陆。冈瓦纳主体的形成、固结、周缘地质体的裂离以及可伴随显著的加里东期构造,均表明泛非期构造与现代板块机制的活动密切相关。而且,后期板块运动中可能会造成早期泛非构造带的俯冲、淹没或剥蚀,可能有隐藏或消失了的泛非构造带。此外,与冈瓦纳古陆有关的泛非构造带容易成为后期大陆裂解的部位,如大西洋的形成。

#### 参考文献:

- [1] KENNEDY W Q. The structural differentiation of Africa in the Pan-African ( $\pm 500$  Myrs) tectonic episode[J]. Leeds University Research Institute for African Geology Annual Report, 1964, 8: 48-49.
- [2] MEERT J G. A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana[J]. Tectonophysics, 2003, 362: 1-40.
- [3] KRÖNER A, STERN R J. Pan-African orogeny[M]//SELL-EY R C, et al, eds. Encyclopedia of geology. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [4] Le FORT P, DEBON F, PÉCHER A, et al. The 500 Ma magmatic event in Alpine southern Asia: A thermal episode at Gondwana scale[J]. Sciences de la Terre, 1986, 47: 191-209.
- [5] VEEVERS J J. Pan-African is Pan-Gondwanaland: Oblique convergence drives rotation during 650-500 Ma assembly[J]. Geology, 2003, 31: 501-504.
- [6] MURPHY J B, NANCE R D. Supercontinent model for the contrasting character of late Proterozoic orogenic belts[J]. Geology, 1991, 19: 469-472.
- [7] STERN R J. Arc assembly and continental collision in the Neoproterozoic East Africa Orogen: Implications of the consolidation of Gondwanaland[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 1994, 22: 319-351.
- [8] GOSCOMBE B, ARMSTRONG R, BARTON J M. Tectonometamorphic evolution of the Chewore inliers: Partial re-equilibration of high-grade basement during the Pan-African orogeny[J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 1347-1384.
- [9] MEERT J G, van der VOO R, AYUB S. Paleomagnetic investigation of the Neoproterozoic Gagwe lavas and Mbozi Complex, Tanzania and the assembly of Gondwana[J]. Precambrian Research, 1995, 74: 225-244.
- [10] GOODGE J W, HANSEN V L, WALKER N W. Neoproterozoic-Cambrian basement-involved orogenesis within the Antarctic margin of Gondwana[J]. Geology, 1993, 100: 91-106.
- [11] FOSTER D A, GRAY D R. Evolution and structure of the Lachlan fold belt (orogen) of eastern Australia[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 2000, 28: 47-80.
- [12] de BRITO NEVES B B, FUCK R A. The basement of the South American platform: Half Laurentian (N-NW) + half Gondwanan (E-SE) domains [J]. Precambrian Research, 2014, 244: 75-86.
- [13] BENTO dos SANTOS T M, TASSINARI C C G, FONSECA P E. Diachronic collision, slab break-off and long-term high thermal flux in the Brasiliano-Pan-African orogeny: Implications for the geodynamic evolution of the Mantiqueira Province[J]. Precambrian Research, 2015, 260: 1-22.
- [14] PAIXÃO M A P, NILSON A A, DANTAS E L. The Neoproterozoic Quatipuru ophiolite and the Araguaia fold belt, central northern Brazil, compared with cor-relatives in NW Africa[J]. Special Publications of the Geological Society of London, 2008, 294: 297-318.
- [15] KINNAIRD J, BOWDEN P. African anorogenic alkaline magmatism and mineralization — A discussion with reference to the Niger-Nigerian Province [J]. Geological Journal, 1987, 22: 297-340.

- [16] GOSCOMBE B, FOSTER D A, GRAY D, et al. Deformation correlations, stress field switches and evolution of anorogenic intersection: The Pan-African Kaoko-Damara orogenic junction, Namibia [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8 (6) : 1187-1232.
- [17] FOSTER D A, GOSCOMBE B D, NEWSTEAD B, et al. U-Pb age and Lu-Hf isotopic data of detrital zircons from Neoproterozoic Damara Sequence: Implications for pre-Gondwana proximity of Congo and Kalahari [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28: 179-190.
- [18] FRITZ H, ABDELSALAM M, ALI K A, et al. Orogen styles in the East African Orogen: A review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution [J]. *Journal of African Sciences*, 2013, 86: 65-106.
- [19] BOGER S D, HIRDES W, FERREIRA C A M, et al. The 580-520 Ma Gondwana suture of Madagascar and its continuation into Antarctica and Africa [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28: 1048-1060.
- [20] ASHWAL L D, SOLANKI A M, PANDIT M K, et al. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic Mt. Abu granitoids, NW India: Regional correlation and implications for Rodinia paleogeography [J]. *Precambrian Research*, 2013, 236: 265-281.
- [21] HANDLE M J, TUCKER R D, ASHWAL L D. Neoproterozoic continental arc magmatism in west-central Madagascar [J]. *Geology*, 1999, 27: 351-354.
- [22] TUCKER R D, ROIG J Y, MACEY P H, et al. A new geological framework for south-central Madagascar, and its relevance to the out-of-Africa hypothesis [J]. *Precambrian Research*, 2011, 185: 109-130.
- [23] SANTOSH M, MORIMOTO T, TSUTSUMI Y. Geochronology of the khondalite belt of Trivandrum Block, southern India: Electron probe ages and implications for Gondwana tectonics [J]. *Gondwana Research*, 2006, 9(3): 261-278.
- [24] SANTOSH M, TAGAWA T, YOKOYAMA K, et al. U-Pb electron probe geochronology of the Nagercoil granulites, southern India: Implications for Gondwana amalgamation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28: 63-80.
- [25] KRÖNER A, SANTOSH M, HEGNER E, et al. Palaeoproterozoic ancestry of Pan-African high-grade granitoids in southernmost India: Implications for Gondwana reconstructions [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 1-37.
- [26] MUKHOPADHYAY D, BASAK K. The Eastern Ghats Belt — A polycyclic granulite terrain [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2009, 73(4): 489-518.
- [27] ISLAM M S, SHINJO R, KAYAL J R. Pop-up tectonics of the Shillong Plateau in northeastern India: Insight from numerical simulations [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 395-404.
- [28] KRIEGSMAN L M. The Pan-African event in East Antarctica: A view from Sri Lanka and the Mozambique Belt [J]. *Precambrian Research*, 1995, 75: 263-277.
- [29] TAKAMURA Y, TSUNOGAE T, SANTOSH M, et al. Detrital zircon geochronology of the Lützow-Holm Complex, East Antarctica: Implications for Antarctica-Sri Lanka correlation [J]. *Geosci Front*, 2018, 9(2): 355-375.
- [30] ZHAO Y, SONG B, WANG Y, et al. Geochronology of the late granite in the Larsemann Hills, East Antarctica [M]// YOSHIDA Y, et al, eds. *Recent progress in Antarctic earth science*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1992: 155-161.
- [31] LIU X C, ZHAO Y, HU J M. The c. 1 000-900 Ma and c. 550-500 Ma tectonothermal events in the Prince Charles Mountains-Prydz Bay region, East Antarctica, and their relations to supercontinent evolution [J]. *Special Publications of the Geological Society of London*, 2013, 383: 95-112.
- [32] REN L D, ZONG S, WANG Y B, et al. Distribution domains of the Pan-African event in East Antarctica and adjacent areas [J]. *Advances in Polar Science*, 2018, 29 (2) : 87-107.
- [33] JACOBS J, FANNING C M, BAUER W. Timing of Grenville-age vs. Pan-African medium to high grade metamorphism in western Dronning Maud Land (East Antarctica) and significance for correlations in Rodinia and Gondwana [J]. *Precambrian Research*, 2003, 125: 1-20.
- [34] ESTRADA S, LÄUFER A, ECKELMANN K, et al. Continuous Neoproterozoic to Ordovician sedimentation at the East Gondwana margin — Implications from detrital zircons of the Ross Orogen in northern Victoria Land, Antarctica [J]. *Gondwana Research*, 2016, 37: 426-448.
- [35] CAWOOD P A, BUCHAN C. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly [J]. *Earth Sci Rev*, 2007, 82 (3/4): 217-256.
- [36] HARLEY S L, KELLY N M. Ancient Antarctica: the Archaeozoic of the East Antarctic Shield [M] // van KRAMENDONK M J, et al, eds. *Developments in Precambrian geology: Earth's oldest rocks*. Amsterdam: Elsevier, 2007: 149-186.
- [37] CLARK C, KINNY P D, HARLEY S L. Sedimentary provenance and age of metamorphism of the Vestfold Hills, East Antarctica: Evidence for a piece of Chinese Antarctica? [J] *Precambrian Research*, 2012, 196/197: 23-45.
- [38] RAVIKANT V. Palaeoproterozoic (1.9 Ga) extension and breakup along the eastern margin of the Eastern Dharwar Craton, SE India: New Sm-Nd isochron age constraints from anorogenic mafic magmatism in the Neoproterozoic Nellore greenstone belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37: 67-81.
- [39] WALSH A K, RAIMONDO T, KELSEY D E, et al. Duration of high-pressure metamorphism and cooling during the intraplate Petermann Orogeny [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(3/4): 969-983.
- [40] KSIENZYK A K, JACOBS J, BOGER S D, et al. U-Pb ages of metamorphic monazite and detrital zircon from the Northampton Complex: Evidence of two orogenic cycles in Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 2012, 198/199: 37-50.
- [41] VEEVERS J J. Emergent long-lived Gondwanaland vs sub-

- mergent short-lived Laurasia: Supercontinental and Pan-African heat imparts long-term buoyancy by mafic underplating [J]. *Geology*, 1995, 23: 1131-1134.
- [42] POWELL C McA, PISAREVSKY S A. Late Neoproterozoic assembly of East Gondwana [J]. *Geology*, 2002, 30: 3-6.
- [43] MERDITH A S, COLLINS, A S, WILLIAMS S E, et al. A full-plate global reconstruction of the Neoproterozoic [J]. *Gondwana Research*, 2017, 50: 84-134.
- [44] RAJESH H M, SANTOSH M, YOSHIDA M. The felsic magmatic province in East Gondwana: Implications for Pan-African tectonics [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1996, 14(3/4): 275-291.
- [45] SILVA L C, GRESSE P G, SCHEEPERS R, et al. U-Pb SHRIMP and Sm-Nd age constraints on the timing and sources of the Pan-African Cape Granite Suite, South Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000, 30: 795-815.
- [46] TURNER C C, MEERT J G, PANDIT M K, et al. A detrital zircon U-Pb and Hf isotopic transect across the Son Valley sector of the Vindhyan Basin, India: Implications for basin evolution and paleogeography [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 348-364.
- [47] MORTIMER N N, CAMPBELL H J, TULLOCH A J, et al. Zealandia: Earth's hidden continent [J]. *GSA Today*, 2017, 27: 27-35.
- [48] MEERT J G, van der VOO R. The assembly of Gondwana 800-550 Ma [J]. *Journal of Geodynamics*, 1997, 23: 223-235.
- [49] JAHN B, CABY R, MONIE P. The oldest UHP eclogites of the world: Age of UHP metamorphism, nature of protoliths and tectonic implications [J]. *Chemical Geology*, 2001, 178 (1/2/3/4): 143-158.
- [50] BEURLEN H, da SILVA FILHO A F, GUIMARÃES I P, et al. Proterozoic c-type eclogites hosting unusual Ti-Fe±Cr±Cu mineralization in northeastern Brazil [J]. *Precambrian Research*, 1992, 58: 195-214.
- [51] JOHN T, SCHENK V, HAASE K F, et al. Evidence for a Neoproterozoic ocean in south-central Africa from mid-oceanic-ridge-type geochemical signatures and pressure-temperature estimates of Zambian eclogites [J]. *Geology*, 2003, 31: 243-246.
- [52] SCHMÄDICKE E, WILL T. First evidence of eclogite-facies metamorphism in the Shackleton Range, Antarctica: Tracer of a suture between East and West Gondwana? [J]. *Geology*, 2006, 34: 133-136.
- [53] MYERS J S, SHAW R D, TYLER I M. Tectonic evolution of Proterozoic Australia [J]. *Tectonics*, 1996, 15: 1431-1446.
- [54] CAWOOD P A. Terra Australis orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic [J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 69: 249-279.
- [55] CAWOOD P A, STRACHAN R A, PISAREVSKY S A, et al. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: Implications for models of supercontinental cycles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 449: 118-126.
- [56] LI Z X, EVANS D A D. Late Neoproterozoic 40° intraplate rotation within Australia allows for a tighter-fitting and longer-lasting Rodinia [J]. *Geology*, 2011, 39: 39-42.
- [57] CONDIE K, PISAREVSKY S A, KORENAGA J, et al. Is the rate of supercontinent assembly changing with time? [J]. *Precambrian Research*, 2015, 259: 278-289.
- [58] DOIG R. An alkaline rock province linking Europe and North America [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1970, 7(1): 22-28.
- [59] BOND G C, NICKERSON P A, KOMINZ M A. Breakup of a supercontinent between 625 and 555 Ma: New evidence and implications for continental histories [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 70: 325-345.
- [60] NANCE R D, MURPHY J B, SANTOSH M. The supercontinent cycle: A retrospective essay [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 4-29.
- [61] GRUNOW A, HANSON R, WILSON T. Were aspects of Pan-African deformation linked to Iapetus opening? [J]. *Geology*, 1996, 24: 1063-1066.
- [62] VEEVERS J J, SAEED A. Age and composition of Antarctic bedrock reflected by detrital zircons, erratics, and recycled microfossils in the Prydz Bay-Wilkes Land-Ross Sea-Marie Byrd Land sector (70°-240° E) [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 710-738.
- [63] HUANG Q Y, KAMENETSKY V S, MCPHIE J, et al. Neoproterozoic (ca. 820-830 Ma) mafic dykes at Olympic Dam, South Australia: Links with the Gairdner Large Igneous Province [J]. *Precambrian Research*, 2015, 271: 160-172.
- [64] LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 179-210.
- [65] PANKHURST R J, RAPELA C W, FANNING C M, et al. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 76(3): 235-257.
- [66] XU X, SONG S G, SU L, et al. The 600-580 Ma continental rift basalts in North Qilian Shan, Northwest China: Links between the Qilian-Qaidam block and SE Australia, and the reconstruction of East Gondwana [J]. *Precambrian Research*, 2015, 257: 47-64.
- [67] MARUYAMA S, LIOU J G, SENO T. Mesozoic and Cenozoic evolution of Asia [M] // BEN-AVRAHAM Z, ed. The evolution of the Pacific Ocean margins. UK: Oxford Univ, 1989: 75-99.
- [68] DÖRR W, ZULAUF G, FIALA J, et al. Neoproterozoic to Early Cambrian history of an active plate margin in the Teplá-Barrandian unit—A correlation of U-Pb isotopic-dilution-TIMS ages (Bohemia, Czech Republic) [J]. *Tectonophysics*, 2002, 352: 65-85.
- [69] O'BRIEN S J, O'BRIEN B H, DUNNING G R, et al. Late Neoproterozoic Avalonian and related peri-Gondwana rocks of the Newfoundland Appalachians [M] // NANCE R D, et al,

- eds. Avalonian and related peri-Gondwana terranes of the circum-north Atlantic. USA: Geol Soc Am, 1996: 9-28.
- [70] RINO S, KON Y, SATO W, et al. The Grenvillian and Pan-African orogens: World's largest orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14: 51-72.
- [71] KEPPIE J D, NANCE R D, MURPHY J B, et al. Tethyan, Mediterranean, and Pacific analogues for the Neoproterozoic-Paleozoic birth and development of the peri-Gondwanan terranes and their transfer to Laurentia and Laurussia[J]. *Tectonophysics*, 2003, 365: 195-219.
- [72] ABBO A, AVIGAD D, GERDES A, et al. Cadomian basement and Paleozoic to Triassic siliciclastics of the Taurides (Karakahisar dome, south-central Turkey): paleogeographic constraints from U-Pb-Hf in zircons[J]. *Lithos*, 2015, 227: 122-139.
- [73] LINNEMANN U, GERDES A, HOFMANN M, et al. The Cadomian Orogen: Neoproterozoic to Early Cambrian crustal growth and orogenic zoning along the periphery of the West African Craton—Constraints from U-Pb zircon ages and Hf isotopes (Schwarzburg Antiform, Germany)[J]. *Precambrian Research*, 2014, 244: 236-278.
- [74] GÜRSU S. A new petrogenetic model for meta-granitic rocks in the central and southern Menderes Massif, W Turkey: Implications for Cadomian crustal evolution within the Pan-African mega-cycle [J]. *Precambrian Research*, 2016, 275: 450-470.
- [75] MALEK-MAHMOUDI F, DAVOUDIAN A R, SHABANIAN N, et al. Geochemistry of metabasites from the North Shahrekord metamorphic complex, Sanandaj-Sirjan Zone: Geodynamic implications for the Pan-African basement in Iran [J]. *Precambrian Research*, 2017, 293: 56-72.
- [76] LEELANANDAM C, BURKE K, ASHWAL L D, et al. Proterozoic mountain building in Peninsular India: An analysis based primarily on alkaline rock distribution [J]. *Geological Magazine*, 2006, 143: 195-212.
- [77] MILLER C, THÖNI M, FRANK W, et al. The early Paleozoic magmatic event in the Northwest Himalaya, India: Source, tectonic setting, and age of emplacement [J]. *Geological Magazine*, 2001, 138(3): 237-251.
- [78] 李才, 吴彦旺, 王明, 等. 青藏高原泛非-早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现 [J]. *地质通报*, 2010, 29(12): 1733-1736.
- [79] MYROW P M, CHEN J T, SNYDER Z, et al. Depositional history, tectonics, and provenance of the Cambrian-Ordovician boundary interval in the western margin of the North China block [J]. *GSA Bulletin*, 2015, 127: 1174-1193.
- [80] MARUYAMA S. Plume tectonics [J]. *Geological Society of Japan*, 1994, 100: 24-49.
- [81] PETERSSON C H, TEBENKOV A M, LARIONOV A N, et al. Timing of migmatization and granite genesis in the Northwestern Terrane of Svalbard, Norway: Implications for regional correlations in the Arctic Caledonides [J]. *Journal of the Geological Society of London*, 2009, 166: 147-158.
- [82] LI Z X, MITCHELL R N, SPENCER J, et al. Decoding Earth's rhythms: Modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes [J]. *Precambrian Research*, 2019, 323: 1-5.
- [83] MURPHY J B, NANCE R D. Do supercontinents introvert or extrovert? Sm-Nd isotope evidence [J]. *Geology*, 2003, 31: 873-876.
- [84] CONDIE K C, BEYER E, BELOUSOVA E, et al. U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: The search for juvenile Precambrian continental crust [J]. *Precambrian Research*, 2005, 139: 42-100.
- [85] VEEVERS J J, WALTER M R, SCHEIBNER E. Neoproterozoic tectonics of Australia-Antarctica and Laurentia and the 560 Ma birth of the Pacific Ocean reflect 400 m.y. Pangean supercycle [J]. *Journal of Geology*, 1997, 105: 225-242.
- [86] REES M N, ROWELL A J, COLE E D. Aspects of the late Proterozoic and Paleozoic geology of the Churchill Mountains, southern Victoria Land [J]. *Antarctic J of the United States*, 1989, 23: 23-25.
- [87] ROWELL A J, REES M N, DUEBENDORFER E M, et al. An active Neoproterozoic margin: Evidence from the Skelton Glacier area, Transantarctic Mountains [J]. *Journal of the Geological Society of London*, 1993, 150: 677-682.
- [88] KOMINZ M. Thermally subsiding basins and the insulating effect of sediment with application to the Cambro-Ordovician Great Basin sequence, western USA [J]. *Basin Research*, 1995, 7(3): 221-233.
- [89] LINDSAY J F, KORSCH R J, WILFORD J R. Timing the breakup of a Proterozoic supercontinent: Evidence from Australian intracratonic basins [J]. *Geology*, 1987, 15: 1061-1064.
- [90] von der BORCH C C. Evolution of late Proterozoic to early Palaeozoic Adelaide Foldbelt, Australia: Comparisons with post-Permian rifts and passive margins [J]. *Tectonophysics*, 1980, 70: 115-134.
- [91] FLÖTTMANN T, HAINES P, JAMES P, et al. The tectonic setting and internal structure of the Cambrian Kanmantoo Basin, southeast Australia [J]. *Geol Soc Australia Abs*, 1996, 41: 144.
- [92] FODEN J. Provenance of Neoproterozoic and Early Paleozoic sediments east Australia: Implications from Nd isotope and zircon studies [J]. *Geol Soc Australia Abs*, 1996, 41: 146.
- [93] MOORES E M. Southwest U.S.—East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis [J]. *Geology*, 1991, 19: 425-428.
- [94] DALZIEL I W D. Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent [J]. *Geology*, 1991, 19: 598-601.
- [95] SHERGOLD J H, JAGO J, COOPER R, et al. The Cambrian System in Australia, Antarctica, and New Zealand [C]// *Int Union Geol Sci, Pub 19*, 1985.
- [96] ERNST R E, WINGATE W T D, BUCHAN K L, et al.

- Global record of 1600–700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): Implications for the reconstruction of the pro-posed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 159–178.
- [97] YAKUBCHUK A. Evolution of the Central Asian Orogenic Supercollage since Late Neoproterozoic revised again [J]. *Gondwana Research*, 2017, 47: 372–398.
- [98] RIVERS T. Assembly and preservation of lower, mid, and upper orogenic crust in the Grenville Province—Implications for the evolution of large hot long-duration orogens [J]. *Precambrian Research*, 2008, 167: 237–259.
- [99] HORTON Jr J W, DRAKE Jr A A, RANKIN D W, et al. Preliminary tectonostratigraphic terrane map of the Central and Southern Appalachians—1: 2000000 [Z]. US Geological Survey, 1991.
- [100] GARÇON M. Episodic growth of felsic continents in the past 3.7 Ga [J]. *Science Advances*, 2021, 7(39): 1–11.
- [101] KRÖNER A, KOVACH V, ALEXEIEV D, et al. No excessive crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Further evidence from field relationships and isotopic data [J]. *Gondwana Research*, 2017, 50: 135–166.
- [102] JANOUŠEK V, JIANG Y D, BURIÁNEK D, et al. Cambrian–Ordovician magmatism of the Ikh–Mongol Arc System exemplified by the Khantashir Magmatic Complex (Lake Zone, south-central Mongolia) [J]. *Gondwana Research*, 2018, 54: 122–149.
- [103] TENG X, ZHANG J X, MAO X H, et al. The earliest Cambrian UHT metamorphism in the Qaidam block, western China: A record of the final assembly of Greater Gondwana? [J]. *Gondwana Research*, 2020, 87: 118–137.
- [104] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 古亚洲构造域侵入岩时空演化框架 [J]. *地质论评*, 2015, 61(6): 1211–1224.
- [105] KHAIN E V, BIBIKOVA E V, KRÖNER A, et al. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U–Pb and Pb–Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 199: 311–325.
- [106] MARUYAMA S, LIOU J G, TERABAYASHI M. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation [J]. *International Geology Review*, 1996, 38: 485–594.
- [107] STERN R J. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time [J]. *Geology*, 2005, 33(7): 557–560.
- [108] DUAN L, MENG Q R, ZHANG C L, et al. Tracing the position of the South China block in Gondwana: U–Pb ages and Hf isotopes of Devonian detrital zircons [J]. *Gondwana Research*, 2011, 19: 141–149.
- [109] 蔡志慧, 许志琴, 段向东, 等. 青藏高原东南缘滇西早古生代早期造山事件 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2123–2140.
- [110] CONDIE K C, ASTER R C. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: The supercontinent connection and continental growth [J]. *Precambrian Research*, 2010, 180: 227–236.
- [111] 万天丰. 中国大陆早古生代构造演化 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 30–42.
- [112] FYFE W S, LEONARDOS O H. Ancient metamorphic–migmatite belts of the Brazilian African coasts [J]. *Nature*, 1973, 224: 501–502.
- [113] ZHANG N, DANG Z, HUANG C, et al. The dominant driving force for supercontinent breakup: Plume push or subduction retreat? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(4): 997–1007.
- [114] FITZSIMONS I C W. Grenville–age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens [J]. *Geology*, 2000, 28: 879–882.
- [115] TALARICO F, CASTELLI D. Relict granulites in the Ross orogen of northern Victoria Land (Antarctica) I: Field occurrence, petrography and metamorphic evolution [J]. *Precambrian Research*, 1995, 75: 141–156.
- [116] CAWOOD P A, JOHNSON M R W, NEMCHIN A A. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255: 70–84.
- [117] 任留东, 李崇, 王彦斌, 等. 豫西秦岭杂岩变质带的分布及主期变质时代的限定 [J]. *岩石学报*, 2016, 32(7): 1934–1948.
- [118] GOODGE J W. Metamorphism in the Ross orogen and its bearing on Gondwana margin tectonics [J]. *GSA Special Papers*, 2007, 419: 185–203.
- [119] BRADSHAW J D, VAUGHAN A P M, MILLAR I L, et al. Permo–Carboniferous conglomerates in the Trinity Peninsula Group at View Point, Antarctic Peninsula: Sedimentology, geochronology and isotope evidence for provenance and tectonic setting in Gondwana [J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(4): 626–644.
- [120] RILEY T R, FLOWERDEW M J, WHITEHOUSE M J. U–Pb ion–microprobe zircon geochronology from the basement inliers of eastern Graham Land, Antarctic Peninsula [J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169: 381–393.
- [121] 高利娥, 曾令森, 许志琴, 等. 喜马拉雅造山带加里东期构造作用: 以马拉山–吉隆构造带为例 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(5): 1200–1218.
- [122] 郑艺龙, 王根厚, 郭志文, 等. 藏北羌塘泛非和印支事件的记录: 来自俄久卖变质杂岩地球化学与锆石 U–Pb 年代学的证据 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(4): 1137–1152.
- [123] HU P Y, ZHAI Q G, JAHN B M, et al. Early Ordovician granites from the South Qiangtang terrane, northern Tibet: Implications for the early Paleozoic tectonic evolution along the Gondwanan proto–Tethyan margin [J]. *Lithos*, 2015, 220/221/222/223: 318–338.
- [124] WANG X X, ZHANG J J, SANTOSH M, et al. Andean-type orogeny in the Himalayas of south Tibet: Implications for early Paleozoic tectonics along the Indian margin of Gondwana [J]. *Lithos*, 2012, 154: 248–262.

- [125] 李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(I): 碰撞型造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 945-967.
- [126] 李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(II): 俯冲-增生型造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 968-1004.
- [127] 李三忠, 赵淑娟, 余珊, 等. 东亚原特提斯洋(II): 早古生代微陆块亲缘性与聚合[J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2628-2644.
- [128] LIU S, HU R Z, GAO S, et al. U-Pb Zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, western Yunnan Province, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(2/3): 168-182.
- [129] LIN Y L, YEH M W, LEE T Y, et al. First evidence of the Cambrian basement in Upper Peninsula of Thailand and its implication for crustal and tectonic evolution of the Sibumasu terrane[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24: 1031-1037.
- [130] HU P Y, ZHAI Q G, ZHAO G C, et al. Cambrian and Cryogenian tectonothermal events in the Amdo microcontinent, Central Tibet: Implications for paleogeographic reconstruction and tectonic evolution of northern Gondwana [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 569: 110332.
- [131] 解超明, 李才, 苏犁, 等. 藏北聂荣微陆块泛非-早古生代构造热事件: 年代学与地球化学制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(3): 414-428.
- [132] 解超明, 李才, 王明, 等. 藏北聂荣微陆块的构造亲缘性—来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的制约[J]. 地质通报, 2014, 33(11): 1778-1792.
- [133] 解超明, 李才, 苏犁, 等. 青藏高原安多高压麻粒岩同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 912-922.
- [134] 何世平, 李荣社, 王超, 等. 昌都地块宁多岩群形成时代研究: 北羌塘基底存在的证据[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 15-24.
- [135] 彭智敏, 耿全如, 王立全, 等. 青藏高原羌塘中部本松错花岗质片麻岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 科学通报, 2014, 59(26): 2621-2629.
- [136] 谭富文, 王剑, 付修根, 等. 藏北羌塘盆地基底变质岩的锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 139-146.
- [137] 张泽明, 王金丽, 沈昆, 等. 环东冈瓦纳大陆周缘的古生代造山作用: 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的岩石学和年代学证据[J]. 岩石学报, 2008, 27(7): 1627-1637.
- [138] 苟正彬, 张泽明, 董昕, 等. 藏南亚东地区早古生代花岗质片麻岩的成因与构造意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3674-3686.
- [139] CHAPPELL B W, WHITE A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1992, 83(1/2): 1-26.
- [140] KEMP A I S, HAWKESWORTH C J, COLLINS W J, et al. Isotopic evidence for rapid continental growth in an extensional accretionary orogen: The Tasmanides, eastern Australia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(3/4): 455-466.
- [141] DECELLES P G, GEHRELS G, QUAADE J, et al. Tectonic implications of U-Pb zircon ages of the Himalayan orogenic belt in Nepal [J]. *Science*, 2000, 288: 497-499.
- [142] CANDAN O, KORALAY O E, AKAL C, et al. Supra-Pan-African unconformity between core and cover series of the Menderes Massif, Turkey and its geological implications [J]. *Precambrian Research*, 2011, 184: 1-23.
- [143] POGUE K R, HYLLAND M D, YEATS R S, et al. Structural framework of the Himalayan foothills, northern Pakistan [J]. *GSA Special Papers*, 1999, 328: 259-274.
- [144] GÜRSU S, MÖLLER A, GÖNCÜOĞLU M C, et al. Neoproterozoic continental arc volcanism at the northern edge of the Arabian Plate, SE Turkey [J]. *Precambrian Research*, 2015, 258: 208-233.
- [145] BAIG M S, LAWRENCE R D, SNEE L W. Evidence for late Precambrian to early Cambrian orogeny in northwest Himalaya, Pakistan [J]. *Geological Magazine*, 1988, 125: 83-86.
- [146] GANSSER A. *Geology of the Himalayas* [M]. New York: Interscience Pubs, 1964.
- [147] VALDIA K S, GUPTA V J. A contribution to the geology of northeastern Kumaon with special reference to the Hercynian gap in Tethys Himalayan [J]. *Himalayan Geology*, 1972, 2: 1-33.
- [148] McQUARRIE N, LONG S P, TOBGAY T, et al. Documenting basin scale, geometry and provenance through detrital geochemical data: Lessons from the Neoproterozoic to Ordovician Lesser, Greater, and Tethyan Himalayan strata of Bhutan [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1491-1510.
- [149] 肖文交, 敖松坚, 杨磊, 等. 喜马拉雅汇聚带结构-属性解剖及印度-欧亚大陆最终拼贴格局[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47: 631-656.
- [150] GEHRELS G, KAPP P, DECELLES P, et al. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen [J]. *Tectonics*, 2011, 30(5): TC5016.
- [151] 计文化, 陈守建, 赵振明, 等. 冈底斯构造带申扎一带寒武纪火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2009, 28(9): 1350-1354.
- [152] HU P Y, LI C, WANG M, et al. Cambrian volcanism in the Lhasa terrane, southern Tibet: Record of an early Paleozoic Andean-type magmatic arc along the Gondwana proto-Tethyan margin [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2013, 77: 91-107.
- [153] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin [J]. *Chemical Geology*, 2012, 328(18): 290-308.
- [154] 董春艳, 李才, 万渝生, 等. 西藏羌塘龙木错-双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式: 构造归属及物源区制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3):

- 299-308.
- [155] 解超明,李才,翟庆国,等.藏北羌塘早古生代岩浆作用及其地质意义[J].沉积与特提斯地质,2021,41(2):340-350.
- [156] WANG M, LI C, FAN J J. Geochronology and geochemistry of the Dabure basalts, central Qiangtang, Tibet: Evidence for ~550 Ma rifting of Gondwana[J]. *International Geology Review*, 2015, 57: 1791-1805.
- [157] LIU Y M, LI S Z, SANTOSH M, et al. The passive margin of northern Gondwana during Early Paleozoic: Evidence from the central Tibet Plateau [J]. *Gondwana Research*, 2020, 78: 126-140.
- [158] 杨学俊,贾小川,熊昌利,等.滇西高黎贡山南段公养河群变质基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质通报,2012,31(2/3):264-276.
- [159] 李才,程立人,张以春,等.西藏羌塘南部发现奥陶纪-泥盆纪地层[J].地质通报,2004,23(5/6):602-604.
- [160] 黄勇,郝家棚,白龙,等.滇西施甸地区晚泛非运动的地层学和岩石学响应[J].地质通报,2012,31(2/3):306-313.
- [161] 胡培远,李才,吴彦旺,等.龙木错-双湖-澜沧江洋的打开时限:来自斜长花岗岩的制约[J].科学通报,2014,59(20):1992-2003.
- [162] 吴彦旺.龙木错-双湖-澜沧江洋历史记录——寒武纪-二叠纪的蛇绿岩[D].长春:吉林大学,2013.
- [163] 杨耀,赵中宝,苑婷媛,等.藏北羌塘奥陶纪平行不整合面的厘定及其构造意义[J].岩石学报,2014,30(8):2381-2392.
- [164] 夏军,王陆太,钟华明,等.青藏高原龙木错地区志留纪大型古三角洲沉积体系的识别及其意义[J].地质通报,2009,28(9):1267-1275.
- [165] 陈能松,王勤燕,陈强,等.柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探[J].地学前缘,2007,14(1):43-55.
- [166] 王超,李猛,李荣社,等.青海柴达木盆地北缘全吉群内部存在区域性不整合[J].地质通报,2015,34(2/3):364-373.
- [167] 陈能松,孙敏,王勤燕,等.东昆仑造山带中带的锆石 U-Pb 定年与构造演化启示[J].中国科学:地球科学,2008,38(6):657-666.
- [168] 陈强,陈能松,王勤燕,等.秦岭造山带秦岭岩群独居石电子探针化学年龄:晚泛非期变质证据? [J].科学通报,2006,51(21):2512-2516.
- [169] 李怀坤,陆松年,相振群,等.东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J].地学前缘,2006,13(6):311-321.
- [170] 张建新,路增龙,毛小红,等.青藏高原东北缘早古生代造山系中前寒武纪微陆块的再认识——兼谈原特提斯洋的起源[J].岩石学报,2021,37(1):74-94.
- [171] 陆松年,于海峰,赵凤清,等.青藏高原北部前寒武纪地质初探[M].北京:地质出版社,2002.
- [172] 邬光辉,李浩武,徐彦龙,等.塔里木克拉通基底古隆起构造-热事件及其结构与演化[J].岩石学报,2012,28(8):2435-2452.
- [173] 陈能松,李晓彦,王新宇,等.柴南缘昆北单元变质新元古代花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J].地质通报,2006,25(11):33-36.
- [174] 史仁灯,杨经绥,吴才来.柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2003,22(3):229-236.
- [175] 朱小辉,陈丹玲,王超,等.柴达木盆地北缘新元古代—早古生代大洋的形成、发展和消亡[J].地质学报,2015,89(2):234-251.
- [176] 徐学义,何世平,王洪亮,等.早古生代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束[J].西北地质,2008,41(1):1-21.
- [177] 刘永江,NeubauerFranz,李伟民,等.柴北缘-南祁连地区构造热事件[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(5):1317-1329.
- [178] 林尚康,汤好书,任涛.西昆仑赞坎铁矿区英安班岩锆石 U-Pb 年代学研究[J].河南科学,2015,33(6):986-992.
- [179] 乔耿彪,王萍,伍跃中,等.西昆仑塔什库尔干陆块赞坎铁矿赋矿地层形成时代及其地质意义[J].中国地质,2015,42(3):616-630.
- [180] LIU X Q, ZHANG C L, YE X T, et al. Cambrian mafic and granitic intrusions in the Mazar-Tianshuihai terrane, West Kunlun Orogenic Belt: Constraints on the subduction orientation of the Proto-Tethys Ocean [J]. *Lithos*, 2019, 350/351: 105226.
- [181] YAN Z, AITCHISON J, FU C L, et al. Hualong Complex, South Qilian terrane: U-Pb and Lu-Hf constraints on Neoproterozoic micro-continental fragments accreted to the northern Proto-Tethyan margin [J]. *Precambrian Research*, 2015, 266: 65-85.
- [182] 李金平,张建新,于胜尧,等.北祁连榴辉岩相变沉积岩的特征及其构造意义[J].地质学报,2009,83(11):1667-1686.
- [183] 裴先治,李佐臣,李瑞保,等.祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄:源区特征和沉积时代的限定[J].地学前缘,2012,19(5):205-224.
- [184] 陆松年,于海峰,李怀坤,等.中央造山带(中-西部)前寒武纪地质[M].北京:地质出版社,2009.
- [185] LI C, REN L D, ZONG S, et al. Confirmation of the Major Grenville Event in the Qinling Complex of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J]. *Journal of Earth Science*, 2019, 30(3): 494-509.
- [186] ZHANG H F, YU H, ZHOU D W, et al. The meta-gabbroic complex of Fushui in north Qinling orogen: A case of syn-subduction mafic magmatism [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28: 262-275.
- [187] 耿元生,周喜文.阿拉善地区新元古代早期花岗岩的地球化学和锆石 Hf 同位素特征[J].岩石学报,2011,27(4):897-908.
- [188] 宫江华,张建新,于胜尧.阿拉善地块南缘龙首山东段“龙首山岩群”的再厘定——来自碎屑锆石 U-Pb 定年的证据[J].岩石矿物学杂志,2013,32(1):1-22.

- [189] 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息等[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2912-2934.
- [190] WILDE S A, WU F Y, ZHANG X Z. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi Massif[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122: 311-327.
- [191] WILDE S A, WU F Y, ZHAO G C. The Khanka Block, NE China, and its significance to the evolution of the Central Asian Orogenic Belt and continental accretion [J]. *Special Publications of the Geological Society of London*, 2010, 338: 117-137.
- [192] YANG H, XU W L, SOROKIN A A, et al. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Bureya Block, Russian Far East: Petrogenesis and implications for Rodinia reconstruction [J]. *Precambrian Research*, 2020, 342: 105676.
- [193] 周建波, 张兴洲, 郑常青. 中国东北~500 Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1235-1245.
- [194] TSUTSUMI Y, YOKOYAMA K, KASATKIN S A, et al. Zircon U-Pb age of Far East Russia [J]. *J Mineral Petrol Sci*, 2014, 109: 97-102.
- [195] KHANCHUK A I, VOVNA G M, KISELEV V I, et al. First results of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the rocks from the granulite complex of Khanka massif in the Primorye region[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2010, 434: 1164-1167.
- [196] 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [197] KOJIMA S. Mesozoic terrane accretion in northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 69: 213-232.
- [198] SCHEKA S A, VRZHOSEK A A (石渡明, 张哲, 编译). 俄罗斯远东滨海区寒武纪兴凯蛇绿岩[J]. *地质与资源*, 2004, 13(3): 189-191.
- [199] MILANOVSKY E E (陈正, 译). 俄罗斯及其毗邻地区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [200] 赵海滨, 莫宣学, 徐受民, 等. 黑龙江新开岭变质核杂岩的组成及其演化[J]. *地质科学*, 2007, 42(1): 176-188.
- [201] 王成文, 孙跃武, 李宁, 等. 中国东北及邻区晚古生代地层分布规律的大地构造意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, 52(5): 619-626.
- [202] 刘岚国, 张建东, 班建永, 等. 西天山那拉提岩群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *新疆地质*, 2016, 34(2): 157-163.
- [203] 钱青, 徐守礼, 何国琦, 等. 那拉提山北缘寒武纪玄武岩的元素地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 1708-1720.
- [204] CHEN C H, LIU Y H, LEE C Y, et al. Geochronology of granulite, charnockite and gneiss in the poly-metamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai massif), South China: Emphasis on the in-situ EMP monazite dating [J]. *Lithos*, 2012, 144/145: 109-129.
- [205] LI X H, LI Z X, LI W X, et al. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: A synthesis [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 1202-1215.
- [206] 姜杨, 赵希林, 李龙明, 等. 闽中南平-宁化构造带南华纪陆缘弧岩浆活动: 对武夷造山带构造演化的新启示[J]. *中国地质*, 2020, 47(4): 1010-1024.
- [207] 于涛, 王宗起, 马昌前, 等. 浙西北地区寒武系物源分析及古地理意义: 来自沉积学及碎屑锆石年代学的证据[J]. *地质学报*, 2021, 95(11): 3266-3281.
- [208] LI L M, LIN S F, XING G F, et al. First direct evidence of Pan-African Orogeny associated with Gondwana assembly in the Cathaysia Block of Southern China [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 794.
- [209] STERN R J. Neoproterozoic crustal growth: The solid Earth system during a critical episode of Earth history [J]. *Gondwana Research*, 2008, 14: 33-50.
- [210] TORSVIK T H. The Rodinia jigsaw puzzle [J]. *Science*, 2003, 300: 1379-1381.
- [211] MALLARD L D, ROGERS J J W. Relationship of Avalonian and Cadomian terranes to Grenville and Pan-African events [J]. *Journal of Geodynamics*, 1997, 23: 197-221.
- [212] 任留东, 王彦斌, 杨崇辉, 等. 麻山杂岩的两种变质作用及其与花岗岩的关系 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2855-2865.
- [213] ZHOU J B, WILDE A S, ZHAO G, et al. Pan-African metamorphic and magmatic rocks of the Khanka Massif, NE China: Further evidence regarding their affinity [J]. *Geological Magazine*, 2010, 147(5): 737-749.
- [214] DIDENKO A N, MOSSAKOVSKY A A, PECHERSKY D M, et al. Geodynamic of Palaeozoic oceans of central Asia [J]. *Geol Geophys*, 1994, 35: 59-75 (in Russian).
- [215] XIA L Q, XIA Z C, XU X Y, et al. Mid-late Neoproterozoic rift-related volcanic rocks in China: Geological records of rifting and break-up of Rodinia [J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3(4): 375-399.

(责任编辑 秦社彩)