

地球系统科学的研究范例

——青藏高原隆升的地貌、环境、气候效应*

孙继敏

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 如果说“大陆漂移与板块学说”是20世纪地质学最具代表性的学术创新的话,那么,进入到21世纪,国际地质学界正在经历着一场新的变革,即由过去单一的学科发展,向多学科交叉的“全球变化”与“地球系统科学”发展,而且这样的融合并不仅仅局限于地质学的各分支学科,而是包括了与大气学、海洋学、生物学等学科的交叉发展,更加发展壮大“地球系统科学”。事实上,发生在地球上的许多重大地质或气候事件,特别是新生代以来青藏高原的隆升,更是与岩石圈、水圈、大气圈、生物圈的层圈相互作用密切相关,如果还只是以传统的地质学观点审视高原隆升及其资源环境效应,很难获得新的突破。

关键词: 青藏高原; 新生代; 构造隆升; 环境效应

中图分类号: P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2014)06-0001-09

Case Study Based on Earth System Science Theory ——Geomorphic, Environmental, and Climatic Effects of the Tectonic Uplift of the Tibetan Plateau

SUN Jimin

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: If we think that the theory of “Continental Drift and Plate Tectonics” is the most representative geologic innovation of the 20th century, then, the international geological science is now undertaking a new reform, changing from a past sole science to interdisciplinary scientific research of “Global Change” and the “Earth System Science Theory”. Moreover, such kinds of multi-disciplinary integration not only involve geologic fields, but also integration with atmospheric science, oceanography, and biology, leading the “Earth System Science Theory” to a new stage. Actually, many significant geologic or climatic events on earth, especially the Cenozoic tectonic uplifts of the Tibetan Plateau, closely link to the interactions among lithosphere, hydrosphere, atmosphere, and biosphere. If we still take a conservative view to cope with the tectonic uplift of the Tibetan Plateau and its environmental effects, it will be difficult to have new development in geology science.

Key words: Tibetan Plateau; Cenozoic; tectonic uplift; environmental effect

纵观地球上的造山带,青藏高原以其最复杂的形成机制、最高的海拔、最大的面积、最重要的环境效应、最脆弱的生态环境成为全球地学关注的焦点,也是开展地球系统科学研究的最理想的实验

室。新生代以来印度板块的北向俯冲,导致了新特提斯洋的消亡以及印度板块与欧亚板块的碰撞,这一岩石圈的构造变动,进一步影响了北半球乃至全球尺度的大气环流,高原浅表层的剥蚀风化、地貌

* 收稿日期: 2014-08-10

作者简介: 孙继敏(1965年生),男;研究方向: 新生代地质与环境; E-mail: jmsun@mail.igcas.ac.cn

分异、水系调整、动植物演替,也影响到矿产资源的形成演化。因此,从这一意义上讲,青藏高原是开展新生代岩石圈-水圈-大气圈-生物圈各圈层相互作用的关键地区,也因此成为研究地球系统科学的典型范例。

新生代印度板块与欧亚板块的碰撞不仅导致了深部岩石圈的构造变形和青藏高原的隆升,而且在深部岩石圈构造变形及高原隆升的过程之中,对浅表层圈的大气圈、生物圈、水圈也产生了重要影响。早期的研究关注了青藏高原的隆起对大气环流的影响,特别是数值模拟的工作认为高原隆升是亚洲纬向风系向季风风系转变以及中纬度内陆干旱环境形成的原因。此后,也有观点认为高原隆升通过风化剥蚀过程加强硅酸盐化学而降低大气 CO_2 浓度,进而影响全球气候,而气候变化又可能通过剥蚀和地壳均衡反馈于高原隆升过程。这些早期的研究虽然也关注了岩石圈对大气圈的影响,但基本处于假说阶段。

进入到 21 世纪,地学研究需要从圈层耦合的地球系统科学角度重新审视青藏高原隆升及其对浅表层圈的影响这一重大科学问题。青藏高原深部岩石圈的构造变动对浅表层圈的影响与互馈是多方面的。高原隆升尽管会导致大气环流的改变,但亚洲季风的起源及演化过程中,全球尺度的气候变化,尤其是极地冰量的演化,也有不可忽视的作用。此外,高原隆升导致的剥蚀风化的加剧究竟在多大程度上影响了大气 CO_2 浓度的改变也是值得深入探索的问题,因为越来越多的证据表明高原隆升与大气 CO_2 浓度之间并非简单的线性关系。对中亚腹地干旱历史以及中国东西部气候格局的分异时间和机制仍不清楚,我们尚不知道高原隆升与全球变化各自扮演什么角色?各自的贡献有多大?从宏观尺度而言,对青藏高原隆升的研究也不应仅仅限于高原本身,其远程效应以及对亚洲宏观地貌格局演化的影响同样是深远的。对中国而言,西高东低地貌格局的形成以及长江、黄河最终东流入海的时间同样是尚存争议的问题。此外,古气候研究的终极目标之一就是解决古气候变迁的动力学机制,在此方面数值模拟是该项研究的重要研究手段。通过设计更符合实际的高原分区域、分阶段隆升方案,评估不同地质时期高原区域隆升对于亚洲季风-干旱环境的作用和影响机制,同时兼顾副特提斯海退缩的耦合效应及气候系统内部的各项反馈机制,将对新生代青藏高原隆升对亚洲气候环境演化的影响过程有更加全面、合理的认识。

1 国内外研究概况及发展趋势

青藏高原隆升是新生代具全球意义的重大地质-环境事件之一,也是中国的传统地学研究领域。1960-1980 年代的科考在国际上产生重大影响,譬如中国是世界上最早开展古高度研究的国家。1964 年西藏科学考察队曾在希夏邦马海拔 5 700 ~ 5 900 m 地带的晚上新世砂岩中,发现了高山栎的叶化石,据此徐仁教授等^[1]认为,青藏高原在 2 ~ 3 Ma 间,海拔升高了约 3 000 m。当然,现在来看,当时的古高度估算由于没有进行古气候校正,因而会高估了隆升高度。近年来,欧美科学家对青藏高原古高度开展了较多研究。Harrison et al.^[2]认为青藏高原整体部分在大约 8 Ma 前加速隆升了 1 000 ~ 2 000 m,已经达到和超过现今的高度。但最近的研究又对高原的隆升历史和高度提出了新的看法:Spicer et al.^[3]认为高原在 15 Ma 前已经达到现今的高度,并进一步认为这一高度在过去的 15 Ma 内保持不变;Rowley and Currie^[4]的研究认为高原表面在 35 Ma 前已经达到了 4 000 m 以上的高度。姑且不去评价这些新观点的科学性有多高,但无疑对以往传统意义上所认知的高原隆升历史和隆升高度的看法形成相当大的冲击。正是这些争议的存在,迫使我们必须重新开展青藏高原古高度研究。值得一提的是,前几年完成的中国科学院知识创新项目群“岩石圈过程对表层圈的影响”的实施为青藏高原古高度这一关键科学问题的突破带来了曙光,如火山岩气孔古气压、正构烷烃古高度计等正在高原上应用,并亟待有新的突破。

众所周知,青藏高原隆升的远程效应一直是国际上研究的热点问题。虽然高原西南缘由于地处碰撞带的前缘,其最早的隆升始于约 50 ~ 55 Ma 前^[5],但有关其它地区的隆升时间与抬升高度仍不清楚。对青藏高原北缘的构造变形与隆升历史而言,同样争议颇大。张培震等^[6]认为青藏高原东北缘在 5 ~ 10 Ma 前发生了准同期的构造变形。Li et al.^[7]对甘肃陇中盆地晚中新世以来沉积进行了研究,提出青藏高原东北缘在 3.6 Ma 前快速隆升。Métivier et al.^[8]认为柴达木盆地的沉积速率在上新世以来才快速增加。Zheng et al.^[9]通过对西昆仑山前晚新生代磨拉石建造的研究,指出青藏高原东北缘自 4.5 Ma 前开始隆升。金小赤等^[10]对西昆仑北坡的新生代沉积进行了研究指出从中新世后期开始的厚达 2 000 ~ 3 000 m 的磨拉石沉积,其粒度向上加大,显示从中新世后期到早更新世隆升速率高而

且是加速的。葛肖虹等^[11]通过对青藏高原东北缘新生代沉积的研究指出,最晚一期也是最强烈的一期隆升发生在1~0.8 Ma。Fang et al.^[12]通过对甘肃临夏盆地晚新生代沉积的研究提出高原隆升导致的构造变形在大约6 Ma前传递到临夏地区。Pares et al.^[13]对青海贵德盆地新生代沉积的研究揭示出此地直至上新世才开始隆升。Sun et al.^[14]通过对昆仑山前陆盆地生长地层的研究,认为5.3 Ma至早更新世是西昆仑发生地壳缩短与造山带复活的重要时期。Sun et al.^[15]通过对南天山库车前陆盆地的生长地层研究揭示出6.5 Ma至早更新世是南天山发生地壳缩短与造山带复活的重要时期。

从以上回顾不难看出,由于青藏高原地域十分辽阔,不同块体距离板块碰撞边界的距离也不相同,因此不同地块的隆升时间应当是穿时的^[16]。正如Tapponnier et al.^[17]所论及的那样,印度板块向亚洲板块的斜向俯冲必然导致高原不同块体的隆

升时间不尽相同,在空间上存在由南向北逐渐传递的过程,距离板块碰撞边界越远则构造变形的时间越晚。Rowley and Garziona^[18]也在已有的高原古高度资料基础上,认为高原的隆升有西南向东北变晚(图1)。总之,无论是高原本身不同块体的隆升时间与方式,还是其远程效应导致的高原北缘以及包括中亚造山带在内的新生代构造变形历史与期次的研究仍然亟待深入。在目前的研究阶段,将时间标尺更加细化、建立更加可靠的反映高原隆升的手段、不同方法之间的交叉检验是当务之急。对于前陆盆地而言,过去常用的仅仅依靠沉积速率、沉积相的变化推断高原隆升时间的方法,在现在看来存在很多问题。譬如:前陆盆地的构造变形复杂且多有逆冲断裂发育,由此会导致沉积间断的出现;此外,无论是沉积相、还是沉积速率本身既可以是气候变化导致,也可以是构造运动导致,抑或二者兼而有之,由此使解释出现多解性和不确定性。

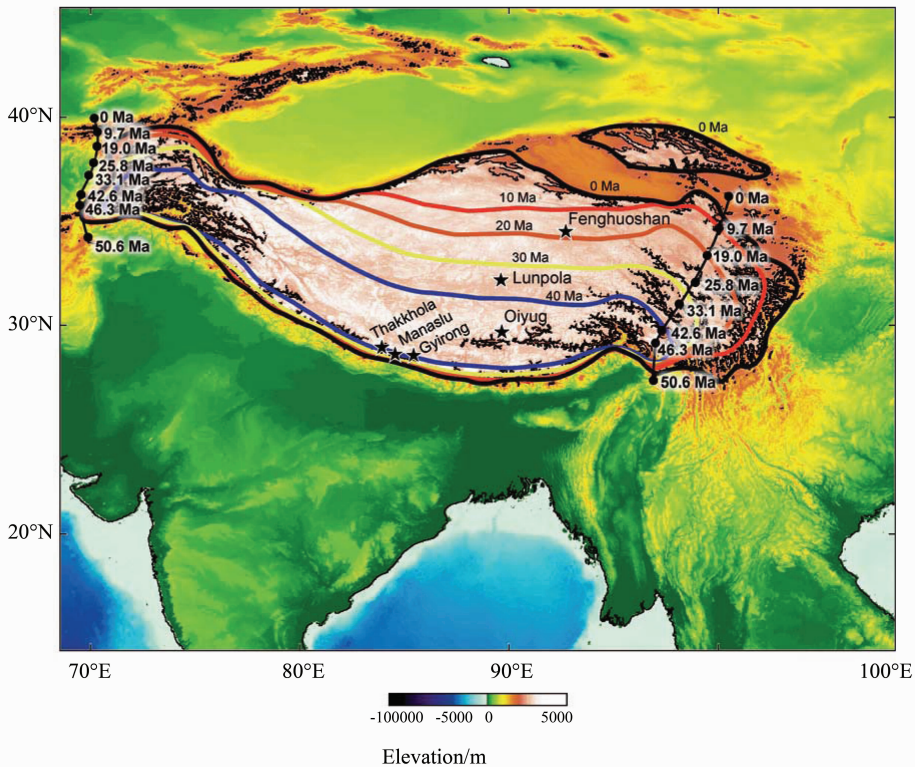


图1 依据青藏高原古高度估算推测的高原不同地块的隆升时间^[18]

Fig. 1 Diachronous tectonic uplift of different blocks on the Tibetan Plateau based on the paleoelevation estimation^[18]

高原隆升对地貌演化和亚洲巨型水系调整也有重要影响,但前人对长江、黄河东流入海的时间争议颇大。有人提出三个峡谷都是通过河流的溯源侵蚀和袭夺而形成的,瞿塘峡切开的时代最晚,三峡河段完全贯通的时限为2.0 Ma^[19]。Clark等^[20]提

出长江上游水系便是经过一系列连续的河流袭夺,首先是三峡地区西支流的反向,尔后是嘉陵江、泯江、大渡河、雅砻江被接连袭夺东流,最后止于金沙江的袭夺,由南流改向东流,而且河流袭夺都是发生在青藏高原东南缘晚第三纪末强烈构造隆升之

前或是同期。

近些年,随着低温热年代学技术和物源示踪技术的发展,科学家开展了地质体隆升、暴露和侵蚀速率的研究,这些成果为长江演化研究提供了新的思路。郑月蓉和李勇等^[21]利用多年年均输沙量计算出长江三峡地区极短周期内剥蚀速率。他们认为,三峡地区在地质历史上是一个准平原,经过长期的构造抬升及剥蚀下切,最终形成高低不平的峡谷地貌,利用高程差推断出三峡地区初始剥蚀下切时间应早于 32 Ma。

Richardson 等^[22]研究了四川盆地和三峡地区的低温热年代学,发现在 40 ~ 45 Ma 三峡地区有一次明显的冷却事件,认为是三峡被切穿的结果,这个时间与他们发现的四川盆地的大规模侵蚀作用开始的时间相吻合,所以推断在始新世的早期,由于三峡的切穿(起因于下游的溯源侵蚀),导致了长江的贯通和四川盆地沉积物的外泄。但 Zheng et al.^[23-24]曾对此观点提出了质疑,他们认为江汉盆地自晚白垩纪开始发育断陷型盆地,在新生代早期沉积了数千米的蒸发岩。如果三峡被切穿,四川盆地被强烈侵蚀(按照 Richardson 的估计^[22],始新世以来有数 km 的沉积物被侵蚀),这些沉积物首先会被输送到江汉盆地形成碎屑沉积。但是,江汉盆地新生代早期的蒸发岩沉积表明当时盆地属于内陆型咸化盆地,不应该存在大型贯穿型河流,尤其不存在携带大量沉积物的大型河流。因此,大型水系演化与高原隆升的关系仍需进一步开展研究。

以青藏高原为主体的我国西部新生代的剥蚀风化强度和过程,不仅与全球变化和亚洲季风气候演化密切相关,同时,又对全球气候产生重要的影响,而后者反过来又作用于亚洲季风。青藏高原的隆升可能是其中多个链接的终极驱动力。

以喜马拉雅-青藏高原为核心的新生代造山带的剥蚀风化消耗的 CO₂ 被用来解释晚新生代以来全球变冷和海洋 Sr 同位素组成的持续增加^[25-26]。但近来的研究发现,青藏高原风化似乎并没有像人们想象的那样大量消耗 CO₂, 构造活动并没有明显加速岩石化学风化。因此,青藏高原化学风化或高原整体地质过程的 CO₂ 源/汇机制是个需要重新认识的重要科学问题,若能建立有关“高原隆升-大陆风化-全球变化”新的理论模型,在科学上具有非常重要的意义。此外,青藏高原隆升加快了剥蚀作用的进行,也会进一步加强了有机质的埋藏。如 Galy et al.^[27]计算表明,孟加拉扇源自喜马拉雅流域,随河流带入海洋的有机碳通量可占全球

有机碳埋藏总量的 10% ~ 20%, 对降低大气 CO₂ 浓度有重要贡献。

从高原和周边盆地的沉积记录以及南海和孟加拉湾的深海沉积记录来看,中新世以来随青藏高原的隆升亚洲季风不是增强,反而是随全球变冷而减弱的,大陆和青藏高原的风化强度变化似乎也与全球温度和季风变化减弱的趋势同步^[28]。这与海洋 Sr、Os 和 Li 同位素记录^[29-30]所反映的趋势正好相反,从而对地球系统地质时期碳循环模型和青藏高原隆升-全球降温假说提出根本性挑战。

青藏高原的隆升对大气环流的影响已是不争的事实。我们知道,中国现今的气候格局表现为东部为季风区、西北内陆盆地为西风环流控制下的干旱区,这种东、西部分异的环境格局究竟是何时形成? 究竟是与高原隆升有关,还是受全球尺度的气候变冷有关? 均是悬而未决的问题。

长期以来,我国学者在该方面做了一些工作,譬如,周廷儒^[31-32]根据生物和沉积证据,认为第三纪晚期我国就以季风气候为主。张林源^[33-34]把新生代划分为早第三纪的基本无季风阶段、晚第三纪的古季风阶段和第四纪现代季风阶段。刘东生等^[35]根据我国第三纪具有环境指示意义的沉积物和动植物分布,绘制了古新世、始新世、渐新世、中新世、晚中新世-上新世和上新世 6 个时段的古环境图,揭示出我国东南季风的形成始于中新世初期。Sun and Wang^[36]也从空间上汇总了中国大陆 125 个地点的古植物和沉积资料,揭示出东亚季风系统的建立可能发生在晚渐新世时期。最近的研究则进一步揭示出早-中渐新世的干旱带依然呈大致东西的带状分布,环境格局仍属于“行星风系主控型”。晚渐新世的数据在数量上偏少,不足以清晰地定义不同环境单元的确切界限,但更多地显示了带状格局的特点^[37]。Sun et al.^[38]对新疆的准噶尔盆地开展了第三纪沉积的综合研究,在系统的磁性地层学和生物地层学基础上建立了晚渐新世以来的时间序列;在沉积学、微量元素地球化学、同位素地球化学研究基础上,论证了准噶尔盆地最早的风成沉积起始于 2 400 万 a 前,同时认为该地风成沉积的物源区为中亚哈萨克斯坦境内的干旱区,由西风气流携带而来,这不同于由北西向冬季风携带而来沉积在黄土高原的第三纪红粘土。他们进一步指出,类似中国现今东部为季风区、西北内陆盆地为西风气候控制区的气候格局至少在距今 2 400 万 a 前的晚渐新世既已形成。也由此将早第三纪行星风系向季风风系转变的时间至少上推到 2 400 万 a 前。

上述研究在探讨中国东、西部环境空间格局的分异时，基本上都是在空间尺度上通过对有明确的、环境指示意义的沉积譬如：膏盐、油页岩、煤层、植物化石等进行汇总，进而得出空间尺度的环境格局。无疑，这是一种非常重要的古环境研究手段。但也存在一些不足。中国早期的第三纪研究工作，受研究手段的限制，对精细年代学的重视不够，这也因此影响到盐类沉积、油页岩、煤层等第三纪沉积的年代学的精确程度，此其一；其二，以往对西北内陆盆地的新生代沉积的研究，多从勘探、找矿等实用角度入手，尚缺乏对重点剖面的高分辨率古环境重建。

事实上，我们不仅要了解中国东、西部环境分异时何时形成的？更要关注究竟是什么因素促使了中国西北干旱、东部湿润的气候格局的形成？现今，对亚洲季风和内陆干旱环境的形成存在不同观点。气候模式研究倾向于青藏高原隆升是亚洲季风和内陆干旱形成的主要原因^[39-42]。也有学者认为副特特斯海在渐新世晚期到中新世期间逐步关闭，加强季风环流和亚洲内陆的干旱程度^[43]。最近的气候模式研究则青藏高原的隆升和副特特斯海共同影响了东亚季风的形成，且副特特斯海的作用甚至比青藏高原的隆升更为显著^[44]。总结对东亚季风气候形成的动力机制方面的研究，我们不难看出，上述观点主要侧重构造作用对中国东、西部环境分异的影响。事实上，除了构造因素，新生代的全球气候变冷同样会影响到环境空间格局的改变。新生代气候变冷必然会导致全球海平面的下降、海陆对比度的改变，即便没有构造作用导致的新特地斯海的逐步关闭，海面下降也会促使副特地斯海向西退却。此外，北极的变冷、海冰和冰盖的最终出现，必然对北半球高纬度冷高压的形成和爆发以及大气环流产生重要影响。因此，要真正了解中国东、西部环境分异及其与高原隆升和全球变化的关系，必须更全面解剖西风区与季风区的高分辨率气候记录。

如何从数值模拟角度开展青藏高原对全球气候变化的影响程度？是否有反馈效应的存在？不同区域是否存在差异？这些问题一直以来得到了古气候学者们的广泛关注。从基于数理模型的计算到基于地质记录的猜测，大量的研究工作聚焦于此。目前人们对青藏高原生长气候效应的认识主要始于 20 世纪 70 年代。得益于基于大气动力学方程的环流模式的出现。人们利用气候模式对大地形对气候的影响进行了大量的理论研究^[45-46]。Manabe 等^[46]

利用大气环流模式对“有山”“无山”条件下气候系统的响应状况进行了模拟，首次揭示了高原大地形的存在对于维持北半球定常行星波和西伯利亚高压系统以及南亚季风的建立所起的重要作用。

此后，Kutzbach 和 Ruddiman 等^[47]真正将理论研究同构造学高原生长的概念相联系，应用更加复杂的大气环流模式分在“有山”“无山”“半山”情景下模拟了全球气候状况的改变，揭示了青藏高原和北美西部高地的隆起对全球气候变化的重要性，且不同地区响应差异明显。高原在冬夏季分别扮演了冷热源的角色，从而加剧了盛行风向的季节转换，对亚洲冬夏季风同时有显著的增强作用^[40]。在内陆，由于高原对来自热带印度洋水汽的阻隔，和地形强迫引起的强下沉气流使这些地区的干旱状况显著恶化^[48-49]。

随着计算条件的改善，更多复杂的试验设计被采用，最具代表性的是高原现代高度等间距递增试验。经过 10% 递增试验的检验，青藏高原的气候效应存在突变变化，且区域性差异明显^[42]。较之南亚季风，东亚季风对高原生长的响应更加敏感，东亚季风风向的季节性转换更加显著，只有在高原高度约为现代一半的条件下，东亚冬季风才逐渐建立起来^[42]。而后，Kitoh^[50]利用耦合海气模式扩展了递增试验，从而进一步揭示了海温变化对季风响应的反馈作用，结果表明考虑海温可以放大亚洲季风系统对高原生长的响应。

在过去 40 年中，青藏高原的动力和热力作用似乎已经得到人们的广泛认可，然而最近，青藏高原通过其热力效应作用于亚洲季风这一结论却受到一定的质疑。Boos 等^[51]在 Nature 上撰文指出，当喜马拉雅山存在时，青藏高原大地形对南亚季风的影响不明显，即喜马拉雅山的动力阻隔了高原对南亚季风的可能作用^[51]。这一研究极大的冲击了高原气候效应的传统观点，但随后有研究反对这个观点，并进一步强调高原的热力效应对于季风变化是十分重要的^[52]。这些发现揭示了青藏高原不同区域的生长可能对气候系统存在不同的影响。事实上，高原生长也不是一个简单的过程，越来越多的证据显示高原的中部南部和北部是分区域分阶段隆升的^[53-55]，这也要求我们必须同地质历史中青藏高原的实际隆升过程相联系，设计更加符合事实的隆升方案才更有实际科学意义，更有助于我们理解青藏高原的气候环境效应。已有研究表明，高原不同地区地形的垂直上升、水平扩张和生长以及主要隆升事件出现的时间都存在差异，因而对高原周边

不同地区会带来的气候环境效应也是不一样的^[56-57]。

此外,高原隆升的气候环境效应研究过去多集中在其动力和热力影响上。实际上高原隆升过程中存在一系列气候反馈机制可能进一步增强了高原隆升的作用。例如,随着高原隆升和地表气温降低,在青藏高原山区发育过多次冰川作用。因此,高原冰雪反馈可能进一步增强隆升中高原热力作用的影响^[58]。同时,高原隆升加剧了高原西侧和高原北侧的内陆干旱化,从而影响亚洲粉尘排放,大气粉尘循环通过改变大气辐射平衡、云物理结构、大气化学过程以及生物地球化学循环进一步影响气候^[59]。亚洲粉尘及其携带的铁元素甚至能够通过大气环流输送进入海洋,增加浮游生物产率,吸收大气中 CO₂, 从而通过影响全球生物地球化学循环过程导致全球气候变冷^[60]。此外,高原隆升会导致陆地硅酸盐岩在造山带和高原地区化学风化加强,加上山体剥蚀和有机碳的埋藏,从而消耗大气中的 CO₂ 并使气候变冷^[26]。一旦气候变冷,又会导致降水和植被覆盖减少,这样反过来又减弱了硅酸盐的风化,所以也减缓了大气中 CO₂ 含量的减少,故使气候变冷又得到了抑制。正是由于气候系统中大量存在的正、负反馈过程,使高原隆升与气候变化之间的关系变得异常复杂。

因此,在另外气候模拟上,必须设计更加符合实际的高原分区域分阶段隆升方案,评估不同地质历史时期高原不同区域隆升对于亚洲季风-干旱环境的不同作用和影响机制,同时兼顾副特提斯海退缩的耦合效应及气候系统内部的各项反馈机制,最终实现对新生代青藏高原隆升对亚洲气候环境演化的影响过程有更加全面合理的认识。

2 当前青藏高原隆升的地貌、环境、气候效应的热点问题

1) 青藏高原何时达到其隆升的最大高度? 如何开展不同区域的古高度重建?

众所周知,青藏高原的隆升高度是评价其环境效应及其剥蚀风化的关键,同时,古高度也是对板块碰撞过程的表征和计量,更是联系深部岩石圈地球动力学与浅表层演化的纽带,只有准确重建古高度才能正确评价高原隆升与扩展过程对区域与全球气候的影响。然而,截止目前,科学界并没有解决青藏高原具体高度的变化,已有的研究多是依据同位素高度效应^[61-62],基于现代自然背景的简单外推,相对于复杂的地质过程而言,这些研究缺乏说

服力,导致高原何时达到最大高度以及不同区域隆升高度的争论。以西藏中部的伦坡拉盆地为例,此前,Rowley & Currie^[4]利用土壤和湖泊碳酸盐同位素高度计的结果,认为在始新世末期(35Ma)高原就已经达到现今高度的看法。但我们最近对伦坡拉盆地的新生代沉积开展了磁性地层学、火山灰年代学、孢粉学研究^[63],提出了新的看法。首先,我们确定了伦坡拉盆地的丁青组至少含有渐新世地层,而并非 Rowley 和 Currie 认为的中新世-上新世地层^[4]。孢粉组合揭示的植被类型以森林植被为主,既有亚热带常绿阔叶林,也有温带落叶阔叶林,还有山地暗针叶林,说明当时已经有了山地植被垂直带的分异。在此基础上,利用 Mosbrugger & Utescher^[64]在 1997 年提出的共存分析法(The Co-existence Approach),依据化石植物群中各类群的现存最近高原亲缘类群对高度的耐受范围,获得对高度的共存区间,用该区间作为对高度的初步估测。在此基础上,考虑到地质时期的下垫面状况与现今的不同,特别是板块位置、海表温度、大气温度、气温垂直梯度的不同,利用国外模拟的温度和气温梯度的差异对共存高度进行校正,提出高原中部伦坡拉地区在晚渐新世-早中新世的古高度不超过 3 200 m,比 Rowley 和 Currie^[4]在同一地点利用土壤和湖泊碳酸盐氧同位素估算的高度至少低 1 500~2 000 m 的古高度。所以,我们的证据不支持 Rowley 认为的在始新世末期(35Ma)高原就已经达到现今高度的看法。同时,我们对当前西方比较流行的自生碳酸盐氧同位素古高度方法提出了质疑:① 氧同位素高度计的基础是瑞利模型,但 Hou et al.^[65]在喜马拉雅的实测结果表明 Rowley 利用的瑞利模型并不适合高海拔地区,其模拟结果高估了山体高度;② 同位素分馏模型是基于单一水汽来源,然而,无论是过去还是现在,伦坡拉盆地不存在单一水汽来源,近 40 年气象资料表明夏季的伦坡拉盆地既有西南季风也有西风带来的水汽;③ 碳酸盐是一种在表生环境下并不稳定的矿物,极易发生次生转化,成岩过程必定产生同位素的分馏;④ 无论是土壤或是湖泊碳酸盐,其氧同位素并不能直接代表大气降水氧同位素,其间存在复杂的分馏系数;⑤ 现在的地球温度比第三纪时期低很多,海表温度的差异必定导致分馏模型的差异,换句话说,不能将现今的同位素分馏模型直接用于地质时期的古高度估算。也就是说,尽管现在针对青藏高原的古高度已经有不同的重建方法和相应的结果(图 2),但必须承认我们要走的路还很远。

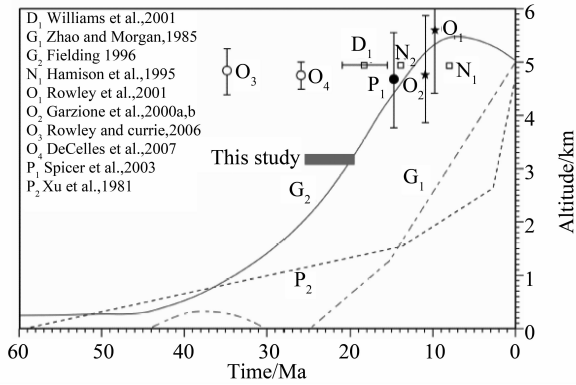


图 2 青藏高原不同作者的高原古高度重建结果 (来自 Sun et al. [63])

Fig. 2 Results of paleoelevation estimations of the Tibetan Plateau among different authors [63]

2) 印度与亚洲板块碰撞的远程效应如何?

印度与亚洲板块的碰撞不仅使靠近板块碰撞边界的喜马拉雅山系剧烈抬升为全球海拔最高的造山带, 同样导致了其周缘造山带的复活, 特别是高原东北缘在新生代的快速隆升。关键的问题是: 高原隆升的远程效应何时传递到高原的东北缘? 特别是研究程度相对薄弱的东昆仑、天山、祁连山、六盘山等山脉的构造隆升时间与期次? 新生代不同时期阿尔金断裂的走滑速率有无变化?

3) 高原隆升对亚洲宏观地貌格局与水系演化有何重要影响?

中国大陆的地貌格局在高原隆升前后有重大差异, 高原隆升前, 中国大陆继承了白垩纪的基本地貌和气候格局, 中国大陆的地形在总体上呈现向西倾斜。但伴随着印度和亚洲板块发生陆-陆碰撞以来, 中国大陆原来西倾的地形逐渐演变为向东倾斜, 而源自青藏高原的长江、黄河的形成与演化历史是探讨这一巨型地貌演变的关键。

4) 新生代青藏高原的隆升和扩展如何影响物质的剥蚀、风化作用?

新生代青藏高原的隆升是地球上最为显著的构造运动, 隆起后的高原其浅表层经历了剥蚀风化。因此, 定量估算高原周边新生代剥蚀量以及剥蚀速率的变化对于正确评价高原的隆升幅度与历史是十分重要的。其次, 加强的物理风化不仅影响到高原的剥蚀深度, 而且新鲜岩石的暴露和破碎大大增加了碎屑岩的比表面积, 也因此加速了化学风化作用的进行。而硅酸盐的化学风化无疑会因消耗大气 CO_2 从而对气候产生反馈作用 [25-26]。关键的科学问题是: 高原隆升如何导致剥蚀量与剥蚀速率的变

化? 风化剥蚀究竟在多大程度上影响了全球碳循环与气候变冷? 如何建立高原隆升-大陆风化剥蚀-全球变化的圈层耦合关系?

5) 高原隆升如何影响亚洲腹地干旱化和季风演化?

我们知道, 现今中国气候格局的空间特征表现为: 中国东部及西南地区为季风区, 而西北内陆盆地则为西风气候控制下的干旱区, 这显然不同于高原隆起前行星风系控制下的纬向环流。高原的隆升无疑改变了大气环流, 关键的科学问题是: 高原隆升如何影响亚洲腹地干旱化? 亚洲季风演化与高原隆升和全球变化存在怎样的动力学关联?

6) 如何更有效地利用数值模拟开展高原隆升环境效应的研究?

青藏高原在不同隆升阶段因其不同的高度必然对大气环流的影响程度不一样; 此外, 海陆分布格局、水汽通道、冰雪覆盖等因素也会对气候产生重要影响。而数值模拟是检验高原隆升环境效应的重要手段。关键的科学问题是: 关键时段 (隆升前、中、后) 高原古高度环境效应的 GCM 模拟; 海-气耦合模式模拟特地斯海退却的环境效应; 高原隆升对内陆干旱化和大气粉尘输送的数值模拟; 如何评价高原隆升在全球气候变化中的作用?

参考文献:

- [1] 徐仁, 陶君容, 孙湘君, 等. 希夏邦玛峰高山栎化石层的发现及其在植物学和地质学上的意义 [J]. 植物学报, 1973, 15 (1): 103-119.
- [2] HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: implications for uplift of the southern Tibet plateau [J]. Tectonics, 1995, 14: 658-676.
- [3] SPICER R A, HARRIS N B W, WIDDOWSON M, et al. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years [J]. Nature, 2003, 421: 622-624.
- [4] ROWLEY D B, CURRIE B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet [J]. Nature, 2006, 439: 677-681.
- [5] SEARLE M P, WINDLEY B F, COWARD M P, et al. The closing of the Tethys and the tectonics of the Himalaya [J]. Geol Soc Am Bull, 1987, 98: 678-701.
- [6] 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论 [J]. 第四纪研究, 2006, 26: 5-13.
- [7] LI J J, FANG X M, Van der VOO R., et al. Late Cenozoic magnetostratigraphy (11 ~ 0 Ma) of the Dongshanding and Wangjiashan sections in the Longzhong Basin, western China [J]. Geol Mij, 1997, 76: 121-134.

- [8] MÉRIVIER F, GAUDEMER Y, TAPPONNIER P, et al. Northeastward growth of the Tibet plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas; The Qaidam and Hexi Corridor basins, China [J]. *Tectonics*, 1998, 17: 823–842.
- [9] ZHENG H B, POWELL C M, AN Z S, et al. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau [J]. *Geology*, 2000, 28 (8): 715–718.
- [10] 金小赤, 王军, 陈炳蔚, 等. 新生代西昆仑隆升的地层学和沉积学记录[J]. *地质学报*, 2001, 75 (4): 459–467.
- [11] 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂[J]. *中国地质*, 2002, 29 (4): 346–350.
- [12] FANG X M, GARZIONE C, Van der VOO R, et al. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 210: 82–94.
- [13] PARES J M, Van der VOO R, DOWNS W R, et al. Northeastward growth and uplift of the Tibetan Plateau; Magnetostratigraphic insights from the Guide Basin [J]. *J Geophys Res*, 2003, 195: 113–130.
- [14] SUN J M, ZHANG LY, DENG C L, et al. Evidence for enhanced aridity in the Tarim Basin of China since 5.3 Ma [J]. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 1012–1023.
- [15] SUN J M, LI Y, ZHANG Z Q, et al. Magnetostratigraphic data on Neogene growth folding in the foreland basin of the southern Tianshan Mountains [J]. *Geology*, 2009, 37(11): 1051–1054.
- [16] CHUNG S L, LO C H, LEE T Y, et al. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago [J]. *Nature*, 1998, 394: 769–773.
- [17] TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 2001, 294: 1671–1677.
- [18] ROWLEY D B, GARZIONE C N. Stable isotope-based paleoaltimetry [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35, 463–508.
- [19] 杨达源. 长江研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004: 1–214.
- [20] CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 2004, 23: TC1006, doi:10.1029/2002TC001402.
- [21] 郑月蓉, 李勇. 长江水系在三峡段初始形成时间研究[J]. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2009 (6): 808–811.
- [22] RICHARDSON N J, DENSMORE A L, SEWARD D, et al. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene [J]. *Geology*, 2010, 38: 551–554.
- [23] ZHENG H, JIA D, CHEN J et al. Forum Comment: Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene[J] *Geology*, 2011, doi:10.1130/G31944C.1.
- [24] ZHENG H, CLIFT P, WANG P. et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J]. *PNAS*, 2013, 110: 556–7561.
- [25] RAYMO M E, RUDDIMAN W F, FROELICH P N. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles [J]. *Geology*, 1988, 16: 649–653.
- [26] RAYMO M E, RUDDIMAN W F. Tectonic forcing of Late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992, 359: 117–122.
- [27] GALY V, FRANCE-LANORD C, BEYSSAC O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system [J]. *Nature*, 2007, 450: 407–410.
- [28] CLIFT P D, HODGES K V, HESLOP D, et al. Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity [J]. *Nature Geosci*, 2008 (1): 875–880.
- [29] RICHTER F M, ROWLEY D B, DEPAOLO D J. Sr isotope evolution of sea water; The role of tectonics [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 109: 11–23.
- [30] MISRA S, FROELICH P N. Lithium isotope history of Cenozoic seawater; changes in silicate weathering and reverse weathering [J]. *Science*, 2012, 335: 818–823.
- [31] 周廷儒. 古地理学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1982:1–342.
- [32] 周廷儒. 新生代古地理[M]//中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理·古地理(上册). 北京: 科学出版社, 1984:1–231.
- [33] 张林源. 青藏高原上升对我国第四纪环境演变的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1981(3): 142–155.
- [34] 张林源. 关于亚洲季风的成因[C]//“青藏高原项目”1995年学术会议论文摘要汇编, 1995.
- [35] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其两级冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. *第四纪研究*, 1998(3): 194–204.
- [36] SUN X J, WANG P X. How old is the Asian monsoon system-Palaeobotanical records from China [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 222: 181–222.
- [37] GUO Z T, SUN B, ZHANG Z S, et al. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene [J]. *Climate Past*, 2008, 4 (3): 153–174.
- [38] SUN J M, YE J, WU W Y, et al. Late Oligocene-Miocene mid-latitude aridification and wind patterns in the Asian interior [J]. *Geology*, 2010, 38: 515–518.
- [39] RUDDIMAN W F, KUTZBACH J E. Forcing of Late Cenozoic Northern Hemisphere Climate by Plateau Uplift in Southern Asia and the American West [J]. *J Geophys Res*, 1989, 94:18409–18427.
- [40] RUDDIMAN W F, KUTZBACH J E. Late Cenozoic plateau uplift and climate change [J]. *Trans Roy Soc*

- Edinb (Earth Sci), 1990, 81: 301–314.
- [41] KUTZBACH J E, GUETTER P J, RUDDIMAN W F, et al. Sensitivity of Climate to Late Cenozoic Uplift in Southern Asia and the American West – Numerical Experiments [J]. *J Geophys Res* 1989, 94: 18393–18407.
- [42] LIU X D, YIN Z Y. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 183 (3–4): 223–245.
- [43] RAMSTEIN G, FLUTEAU F, BESSE J, et al. Effect of orogeny, plate motion and land-sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years [J]. *Nature*, 1997, 386: 788–795.
- [44] ZHANG Z S, WANG H J, GUO Z T, et al. What triggers the transition of palaeo-environmental patterns in China, the Tibetan Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 245: 317–331.
- [45] KASAHARA A, SASAMORI T, WASHINGTON W M. Simulation experiments with a 12-layer stratospheric global circulation model. I. Dynamical effect of the Earth's orography and thermal influence of continentality [J]. *J Atmos Sci*, 1973, 30: 1229–1251.
- [46] MANABE S, TERPSTRA T B. The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments [J]. *J Atmos Sci*, 1974, 31 (1): 3–42.
- [47] KUTZBACH J E, PRELL W L, RUDDIMAN W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau [J]. *J Geol*, 1993, 101: 177–190.
- [48] MANABE S, BROCCOLI A J. Mountains and arid climates of middle latitudes [J]. *Science*, 1990, 247 (4939): 192–194.
- [49] BROCCOLI A J, MANABE S. The effects of orography on Midlatitude Northern hemisphere dry climates [J]. *J Climate*, 1992, 5(11): 1181–1201.
- [50] KITO, A. Effects of mountain uplift on east Asian summer climate investigated by a coupled atmosphere-ocean GCM [J]. *J Clim*, 2004, 17: 783–802.
- [51] BOOS W R, KUANG Z M. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating [J]. *Nature*, 2010, 463 (7278): 218–222.
- [52] WU G X, LIU Y M, HE B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon [J]. *Scientific Reports*, 2012, doi:10.1038/srep00404.
- [53] AN Z S, KUTZBACH J E, PRELL W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411: 62–66.
- [54] MOLNAR P, BOOS W R, BATTISTI D S. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2010, 38: 77–102.
- [55] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21: 381–391.
- [56] 张冉, 刘晓东. 上新世以来构造隆升对亚洲夏季气候变化的影响 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53 (12): 2817–2828.
- [57] LIU X D, YIN Z Y. Forms of the Tibetan Plateau uplift and regional differences of the Asia monsoon-arid environmental evolution—A modeling perspective [J]. *J Earth Environ*, 2011(3): 401–416.
- [58] BUSH A B G. A positive climatic feedback mechanism for Himalayan glaciation [J]. *Quat Intern*, 2000, 65/66: 3–13.
- [59] SHI Z G, LIU X D, AN Z S, et al. Simulated variations of eolian dust from inner Asian deserts during late Pliocene-Pleistocene periods [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37: 2289–2301.
- [60] JICKELS T D, AN Z S, ANDERSEN K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate [J]. *Science*, 2005, 308: 67–71.
- [61] GARZIONE C N, QUADE J, DECELLS P G, et al. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from $\delta^{18}\text{O}$ versus altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 183: 215–229.
- [62] ROWLEY D B, PIERREHUMBERT R T, CURRIE B S. A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene [J]. *Earth Planet Sci Lett* 2001, 188: 253–268.
- [63] SUN J M, XU Q H, LIU W M, et al. Palynological evidence for the latest Oligocene-early Miocene paleoelevation estimate in the Lunpola Basin, central Tibet [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2014, 399: 21–30.
- [64] MOSBRUGGER V, UTESCHER T. The coexistence approach—a method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1997, 134, 61–86.
- [65] HOU S G, MASSON-DELMOTTE V, QIN D. Modern precipitation stable isotope vs. elevation gradients in the High Himalaya, Comment on “A new approach to stable isotope based paleoaltimetry: implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene” [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 209: 395–399.