

# 缅甸翡翠砾石中蓝雾和黑皮的成因探讨\*

闫薇薇<sup>1,2</sup>, 王建华<sup>1</sup>

(1. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275;  
2. 广州番禺职业技术学院珠宝学院, 广东 广州 511483)

**摘要:**通过对缅甸翡翠砾石产区地质背景、样品观察、矿物学及地球化学等分析,认为蓝雾以及黑皮是在沉积深埋成岩过程中,在有一定温度、压力和流体介质作用下形成的,硬玉的水解溶蚀和绿泥石的沉淀是蓝雾以及黑皮形成的主要原因,形成绿泥石的物质来源有来自硬玉水解溶蚀的组分和来自沉积层中的流体、填隙物中的Fe、Mg等元素的加入,有机质的存在可能促进了Fe、Mg等物质的迁移及沉淀作用。

**关键词:**翡翠;水岩作用;蓝雾;绿泥石;成因

**中图分类号:** P578.94 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)06-0107-07

## Origin of the Blue Fog Zone and Black Crust of Myanmar Jadeite Jade Boulder

YAN Weiwei<sup>1,2</sup>, WANG Jianhua<sup>1</sup>

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
2. Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou 511483, China)

**Abstract:** The analysis on the geological background, sample observations, mineralogical and geochemical characteristics of Myanmar jadeite jade boulder indicates that the blue fog zone and black crust of the boulder are formed in dipositional diagenetic process under the conditions of certain temperature, pressure and fluid interaction. The hydrolysis-dissolution of jadeite and precipitation of chlorite are the main causes of the formation of blue fog zone and black crust. The material sources of chlorite come from hydrolysis-dissolution of jadeite, and Fe, Mg and other elements in fluid and sediments. The presence of organic matter may promote the migration and precipitation of Fe, Mg and other materials.

**Key words:** jadeite jade; water-rock interaction; blue fog; chlorite; origin

20世纪中叶以来,水岩相互作用的研究成为固体地球科学及环境地球科学的热点和前沿领域研究内容<sup>[1-2]</sup>。缅甸次生翡翠矿床中的水岩反应效应,为油青色翡翠和黄色翡翠提供了来源<sup>[3-4]</sup>,并使得透明度有所改观。通过研究翡翠砾石蓝雾以及黑皮的形成过程,可以对翡翠的优化处理提供启示,同时为认识不同地质条件中水岩作用的研究提供科学依据。本文结合沉积盆地的演化,对来源于缅甸翡翠矿区的翡翠原石样品水岩反应前后的结构特征、矿物特征、化学成分特征变化进行研究,初步探讨了蓝雾及黑皮的形成过程。

缅甸次生矿床中产出的翡翠砾石中围绕外皮和

开放性裂隙两侧形成了油青色或者黄红色的色带。其中,油青色的区域称为蓝雾。具有蓝雾的翡翠砾石主要产于缅甸帕敢地区雾露巨砾岩的黑色层位中,该层目前位于当地的潜水面之下,常年浸泡在水中,属于较为还原的环境,翡翠蓝雾的保存与这一地质条件有密切的关系。

### 1 地质构造背景

第三纪的始新世时,由于大洋板块与大陆板块的俯冲-碰撞,洋底的拉斑玄武岩等被挤压形成蛇纹岩套,在高压变质作用下,在蛇纹岩中形成了翡翠矿脉,挤压带抬升为高山地形,抬升和断块作用

\* 收稿日期: 2011-04-07

基金项目: 广东省科技计划基金资助项目(0711220600019)

作者简介: 闫薇薇(1980年生),女,博士;通讯作者: 王建华; E-mail: adswjh@mail.sysu.edu.cn

造成第三纪的断陷盆地, 强烈的地形落差导致周围的岩石被风化剥蚀在盆地中沉积, 形成了盆地底部含有翡翠砾石的雾露巨砾岩, 残留砾岩厚度可达 300 m, 是最主要的翡翠次生矿床<sup>[5]</sup>, 根据其中的植物化石特点, 雾露巨砾岩形成于第三纪中新世<sup>[6]</sup>。此外, 区域地质资料还显示, 在上覆沉积岩中有砂岩、页岩、含煤地层、膏盐层等, 显示为沉积厚度大的陆相地层。

到上新世-早更新世时, 帕敢地区在渐新世-中新世阶段形成的断陷盆地因区域抬升作用不再沉降, 断陷盆地中形成的沉积物与地块整体一起抬升, 形成现在帕敢地区的丘陵地貌, 原来沉积断陷盆地中的砾岩也被剥蚀冲刷出露<sup>[7-8]</sup>。

雾露巨砾岩中的砾石成分主要有蛇纹岩砾石、结晶片岩砾石、石英岩砾石和大理岩砾石等, 较为细小的砾石、砂屑和黑色到墨绿色粘土物质充填在大砾石之间, 组成胶结物, 胶结比较疏松。

从开采的翡翠坑口形成的雾露巨砾岩剖面看(图 1), 岩层具有明显的颜色分带, 颜色分带从上至下在当地被称为黄层、红层和黑层。有人认为, 不同颜色的分层是由于沉积物的不同造成的。但是, 通过仔细的观察, 可以看出, 在近地表的黄色层基本是由风化强烈的砾石和黄色土组成; 中间的红色层, 砾石的风化程度较浅一些, 黄色层与红色层的界线呈渐变状, 红色层与下面的黑色层具有明显分界, 同时, 黑色层处有泉水流出。根据这些特征, 结合缅甸帕敢地区的气候特征, 更为合理的解释是: 雾露巨砾岩的颜色分带是风化造成的, 黑色层与红色层的分界代表潜水面, 黑色层是长期浸泡在地下水中的砾岩, 红色层与黄色层的分界面是雨季时的潜水面, 红色层的砾石季节性地被地下水浸

泡, 而黄色层暴露在空气中, 受到的风化作用也最为强烈。含有蓝雾的翡翠砾石即产于黑色层中<sup>[5]</sup>。

在这一系列的过程中, 雾露巨砾岩中的翡翠砾石遭受了风化、搬运和沉积、深埋和表生地质作用, 形成了蓝雾、黄雾、黑砂皮、黄砂皮和白砂皮等不同现象。本文对来自缅甸翡翠矿区的 200 多块翡翠样品的蓝雾和黑皮进行了研究。



图 1 雾露巨砾岩的剖面<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Section of Wulou boulder conglomerate

## 2 结果与讨论

### 2.1 翡翠的结构构造特征

对 200 多块来自缅甸翡翠矿区的样品进行了宏观结构特征及相应的偏光显微镜下的微观特征分析。

在翡翠砾石中蓝雾色带的形态受到翡翠砾石轮廓控制(图 2a), 或者分布在裂隙的两侧, 蓝雾的

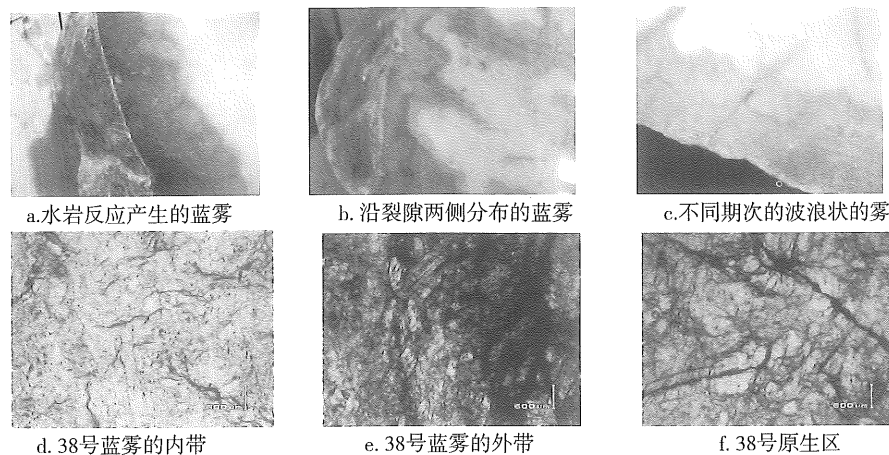


图 2 翡翠雾区及原生区的宏观结构 (a, b, c) 及偏光显微镜下的蓝雾区的分布 (d, e, f)

Fig. 2 Macroscopic structure (a, b, c) and microscopic texture (d, e, f) of blue fog zone of jadeite jade

颜色往往在靠近裂隙的部分颜色较深，远离裂隙的位置颜色较浅，表明受到开放性裂隙的控制，这些特征可以确切地证明这些蓝灰色色带是次生色。通过肉眼观察可看出，蓝雾有多次的叠置现象，形成不同期次的纹层状雾（图 2b, 2c）。

显微镜下观察发现，雾区常可划分为内带和外带，单偏光镜下靠近外皮的外带比靠近原生区的内带颜色要偏深偏黑，原生区与雾内带相比也略偏深偏黑，因此，雾内带也可称为洁净带，在其中很少有其他矿物明显的交代或沉积出现，同时，蓝雾区的开放性裂隙多于原生区（图 2d、2e、2f），但是，蓝雾区内的硬玉晶体内部并没有明显出现被原位交代蚀变的现象，而黑皮中则可出现硬玉被绿泥石蚀变交代的现象。

### 2.2 翡翠的矿物特征

对 50 多块来自缅甸翡翠矿区的翡翠样品进行矿物特征分析，电子探针测试在中山大学测试中心采用日本的 JXA-8800R 型电子探针进行，测试条件是：电压 15 kV，束斑直径 1 μm，测试放大倍数 500 ~ 1000，将有代表性的样品制成光薄片在偏光

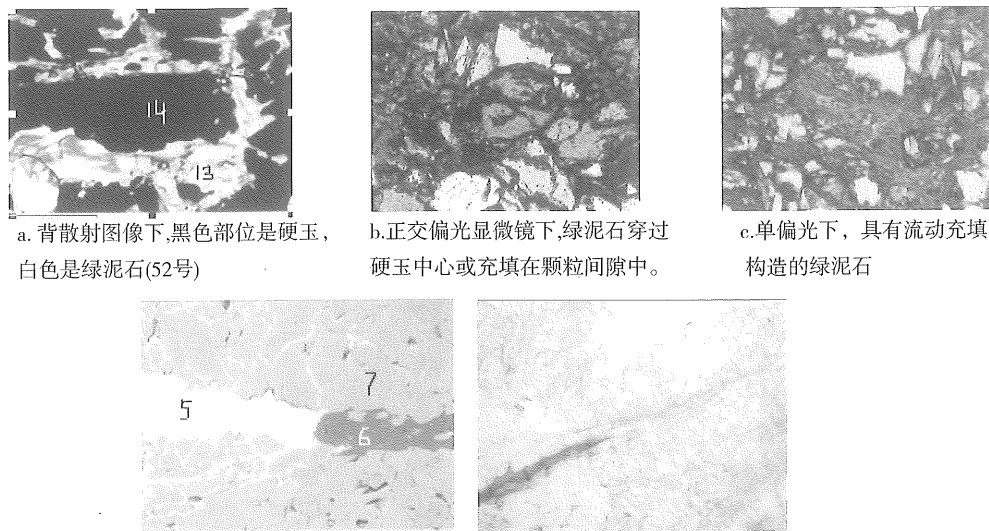
显微镜下选择 50 个特征点位进行测试；拉曼光谱的分析采用中山大学测试中心的 Renishaw inVia 显微共焦拉曼光谱仪，测试条件是：激发波长 785 nm，最佳光谱分辨率 1 cm<sup>-1</sup>，扫描范围 100 ~ 3 100 cm<sup>-1</sup>，将有代表性的样品制成双面抛光的光薄片，在偏光显微镜下选定有代表性的测试部位，共测试 20 个点位。

镜下观察和电子探针分析（表 1）显示，蓝雾区的充填物质大部分为绿泥石，绿泥石除了充填在硬玉晶体的解理缝之外，还集中出现在各种微小的裂隙中，镜下观察到裂隙中的绿泥石常呈波纹状层状分布，显示其沉积过程应与流体活动有关，大量的绿泥石形成网状包围硬玉晶体和充填孔隙裂隙。这些现象有异于一般的表生地质作用所形成的绿泥石粘土矿物的产出状态，表生风化作用形成的黏土矿物一般都是呈分散状散布在母岩晶体中，造成晶体的浑浊现象，如果它们出现在微裂隙中时，则常出现蜂窝状结构。种种迹象表明，这些绿泥石应该在深埋条件下，在有一定的温度压力和流体作用的环境中产生（图 3a、3b、3c）。

表 1 翡翠样品电子探针测试代表性数据

Table 1 Presentative EMPA test data of jadeite jade samples

样品	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	NiO	TiO <sub>2</sub>	Total
黑皮-14	15.956	0.021	0	0.017	0	62.493	25.978	0.238	0.07	0	0.005	104.778
黑皮-13	0.124	0.163	0.105	5.652	0.291	31.926	10.779	40.055	0.523	0.167	0	89.785
黑皮-9	0	0	0.012	0	0.008	100.008	0.006	0.184	0.009	0	0	100.227
蓝雾裂隙-5	0.062	0.006	0.11	9.533	0.352	32.171	18.076	30.962	0.103	0.089	0	91.464
原生区裂隙-6	10.164	0	0.107	0.023	0	58.023	30.356	0.127	0.022	0	0.039	98.861
原生区-7	15.274	0	0.02	0.425	0.061	59.699	24.04	0.277	0.62	0	0	100.416



a. 背散射图像下,黑色部位是硬玉,白色是绿泥石(52号)  
 b. 正交偏光显微镜下,绿泥石穿过硬玉中心或充填在颗粒间隙中。  
 c. 单偏光下,具有流动充填构造的绿泥石

图 3 黑色外皮、蓝雾裂隙处、原生区的背散射及偏光显微镜图像  
 Fig. 3 EPMA and Polarizing microscopic images of black crust, blue fog and origin zone

根据资料, 该区盆地沉积层中有过第三纪侵入的辉长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩脉岩, 虽然绿泥石的大量形成也可以与岩浆热液的蚀变作用有关, 但热液作用往往会带来广泛的钠长石化、硅化、绢云母化和绿帘石化等现象, 而在样品中, 这些现象不明显。

对黑皮的研究表明, 黑色外皮中的矿物主要是绿泥石及硬玉 (图 4b, 4c), 另外还分布有碎屑粘结状的石英砂 (图 4a) 和个别碎屑状的绿帘石 (图 4c), 它们都是各种原岩风化沉积的产物, 而不是后期热液蚀变的产物。在 47 号样品中, 蓝雾区的裂隙中充填有绿泥石, 而当同一裂隙穿至在原生区中时, 分布有钠长石及残晶状的硬玉 (见图 3d, 3e), 这表明原生翡翠矿脉在出露地表前曾经有过一定的钠长石化, 但与后期蓝雾中绿泥石的形成无明显联系, 蓝雾的形成与岩浆热液作用的关系

可能不大。

虽然电子探针分析不能区分  $Fe^{2+}$  和  $Fe^{3+}$ , 但是大量的文献均认为绿泥石中  $Fe^{3+}$  的含量小于总量的 5%<sup>[9-12]</sup>, 因此本文中直接按  $Fe^{2+}$  为 100% 计算全铁含量 FeO。

以 2 个点的电子探针分析为例, 黑皮 - 13 点绿泥石, 其分子式为  $(Na_{0.026681919}Cr_{0.014299927}K_{0.014865699}Mg_{0.934756679}Ca_{0.062188579}Ni_{0.014905779}Mn_{0.027353868}Al_{0.953103164}Fe_{3.717465191})_5.765620804(Si_{3.54290292}Al_{0.45709708})_4O_{10}(OH)_8$ , 蓝雾裂隙-5点绿泥石分子式为  $(Na_{0.012282747}Cr_{0.000484625}K_{0.014338284}Mg_{1.451558258}Mn_{0.030463295}Al_{1.464183656}Fe_{2.645621036}Ca_{0.011275988}Ni_{0.007313692})_5.637521582(Si_{3.286909586}Al_{0.71309041})_4O_{10}(OH)_8$ 。将各测试点的绿泥石晶体化学式计算结果进行绿泥石矿物分类投点<sup>[13]</sup>, 结果表明黑皮及蓝雾中的绿泥石属于辉绿泥石。

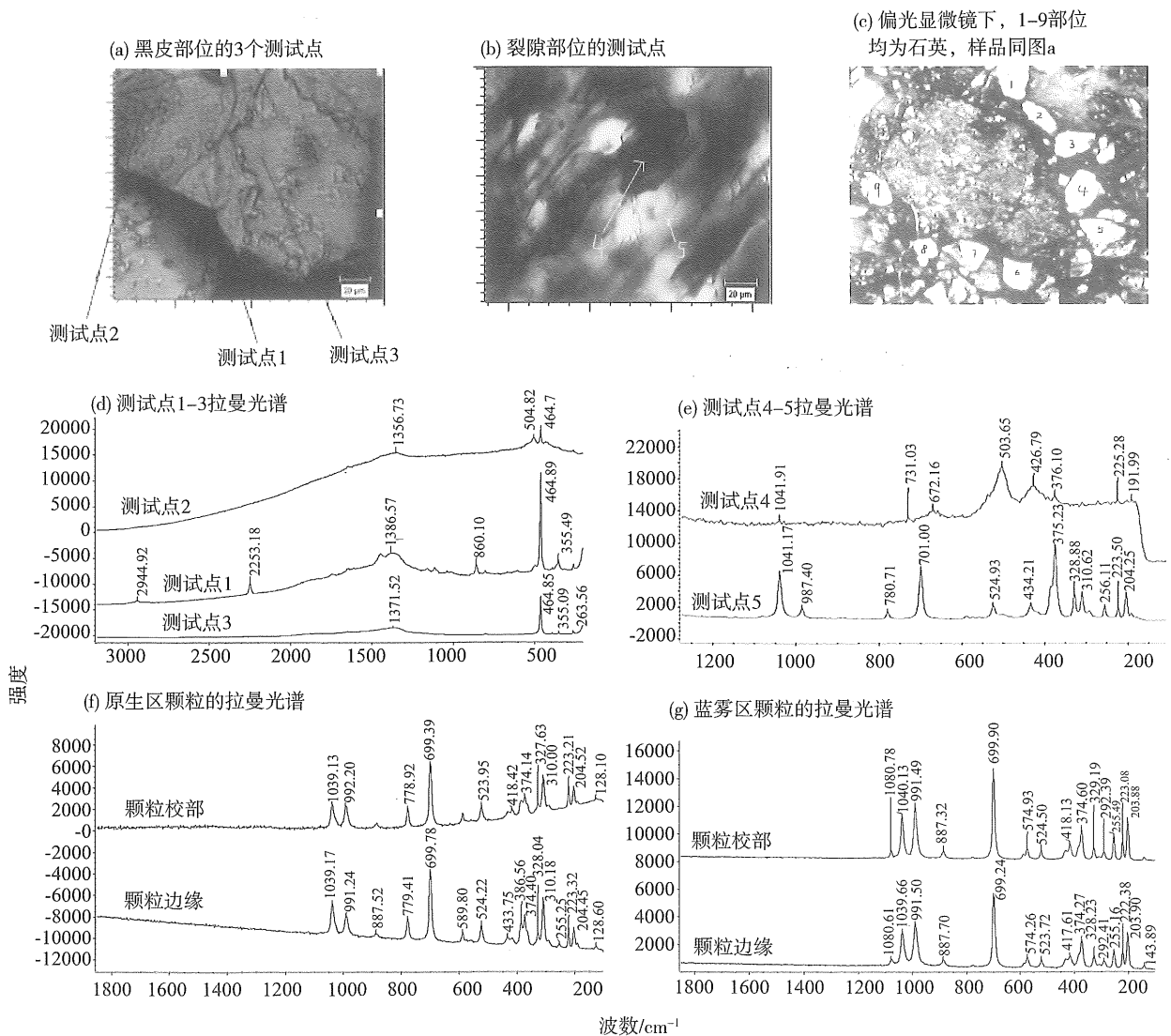


图 4 拉曼光谱测试部位示意图及相应的拉曼光谱测试结果  
Fig. 4 Raman spectra and positions of test of samples

文献 [14] 在 Los Azufres 地热体系研究基础上, 增加了 Salton Sea 地热体系数据, 基于氧原子数为 14, 对其之前的绿泥石温度计进行了修正, 修正后的温度计的表达式为:  $t/^\circ\text{C} = -61.92 + 321.98\text{Al}^{\text{IV}}$ , 据这一绿泥石形成温度计的计算公式, 计算出黑皮-13 点绿泥石的形成温度为 85.2  $^\circ\text{C}$ , 蓝雾裂隙-5 点绿泥石的形成温度是 167  $^\circ\text{C}$ , 52 号黑皮其它点位的绿泥石的形成温度是 71 ~ 117  $^\circ\text{C}$  之间, 平均温度是 92.77  $^\circ\text{C}$ 。

对黑皮、蓝雾区裂隙处、原生区分别进行拉曼光谱测试 (图 4d-g), 拉曼测试采用 785 nm 的激发波长, 以消除薄片上胶体对测试结果的干扰。

在黑皮部位, 测试点 1 中, 出现了 2 250  $\text{cm}^{-1}$  峰位和 2 944  $\text{cm}^{-1}$  峰位。其中 2 944  $\text{cm}^{-1}$  代表亚甲基基团拉曼效应, 2 250  $\text{cm}^{-1}$  代表烃中的无机-CN 基团的特征峰<sup>[15-16]</sup>, 根据研究, 亚甲基基团属于干酪根中的脂族成分<sup>[17]</sup>, 这表明在黑皮形成的外界环境中存在有机质的成烃作用。众所周知, 有机质在沉积物成岩过程中可以影响介质的酸碱度和氧化还原条件, 并可以与金属离子形成络合物促进元素迁移, 但有机质在黑皮及雾区形成中的具体作用机理仍有待今后进一步研究探讨。另外, 1 385  $\text{cm}^{-1}$ , 1 374  $\text{cm}^{-1}$  处的包峰代表玻璃的峰, 是基底玻璃薄片的干扰。464  $\text{cm}^{-1}$  的峰代表石英的特征峰<sup>[18]</sup>。860  $\text{cm}^{-1}$  峰是绿泥石的主要特征峰<sup>[19]</sup>。重复对该区 (白色调) 其他部位进行多点测试, 也均出现 C-H 峰。且测试部位均没有见到包裹体的

存在。测试点 2 中, 除了有石英的 460  $\text{cm}^{-1}$  的峰以及玻璃的干扰峰 1 385  $\text{cm}^{-1}$ , 还有代表赤铁矿的 504  $\text{cm}^{-1}$  的拉曼特征峰<sup>[20]</sup>。测试点 3 中, 主要是石英的 460  $\text{cm}^{-1}$  特征峰。

在蓝雾区裂隙部位, 测试点 5 是标准的硬玉拉曼光谱峰, 具有 1 041、987、700、375  $\text{cm}^{-1}$  四个明显的峰<sup>[21]</sup>。测试点 4 中, 除了可见到硬玉的特征峰外, 还有 672  $\text{cm}^{-1}$  的绿泥石最强特征峰以及 503  $\text{cm}^{-1}$  的赤铁矿最强特征峰。赤铁矿的出现, 说明该黑皮翡翠砾石后来被抬升到地表, 部分绿泥石开始发生氧化形成赤铁矿所导致。

在原生区部位, 颗粒由核部到外部均是标准的硬玉峰, 原生区的颗粒的边部与核部相比, 基本未发生位移。蓝雾区的颗粒, 颗粒由核部到外部均是标准的硬玉峰, 蓝雾的颗粒核部与边缘处相比基本无偏移。这些现象表明硬玉晶体的分解 (水解或交代) 并不是由外及里的分带渐变过程, 而是在晶体边缘通过水-矿物晶体界面进行的。

#### 4 化学成分变化

选取具有蓝雾的缅甸翡翠原石标本, 选择黑皮、蓝雾和原生部位取样, 置于玛瑙研钵中磨至 200 目以下, 取约 2 g 粉末在 100  $^\circ\text{C}$  低温下烘干, 在澳实分析检测实验室采用四酸消解法、电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测定 20 件样品的元素含量, 其中部分元素的含量测试结果见表 2。

表 2 部分元素的 ICP-MS 测试结果<sup>1)</sup>  
Table 2 Content of some elements by ICP-MS test

项目	43p	43lw	43r	43p-r	43lw-r	47lw	47r	47lw-r	52lw	52r	52lw-r	
Na	7.97	9.98	>10.0	< -2.03	< -0.02	9.68	>10.0	< -0.32	>10.0	>10.0		
Mg	%	1.93	0.56	0.26	1.67	0.3	0.31	0.17	0.14	0.1	0.12	-0.02
Al		9.69	10.5	10.65	-0.96	-0.15	7.48	7.53	-0.05	9.71	9.79	-0.08
Fe		5.72	0.71	0.34	5.38	0.37	0.9	0.2	0.7	0.43	0.09	0.34
Mn		425	67	49	376	18	103	33	70	90	55	35
Co	$10^{-6}$	32.2	2.7	1	31.2	1.7	5.9	1.3	4.6	3.2	1.2	2
Cr		10	6	3	7	3	2	2	0	2	2	0
Ni		452	54	7	445	47	174.5	5.9	168.6	55.3	3.4	51.9

1) p-黑皮, lw-蓝雾, r-原生区

以原生区的含量为本底, 雾区微量元素的含量减去相应样品原生区处的含量, 用差值对比元素在蓝雾上的变化情况显示, 铁族元素 (Fe、Mn、Co、Cr、Ni) 和 Mg 大量进入蓝雾及黑皮中, 如 Fe 在黑皮上的增加量为 5.38%, 蓝雾区的增加量为

0.37% ~ 0.7%; 而造岩元素 Na、Al 明显减少, 表明硬玉在蓝雾及黑皮中溶解后, 富 Fe、Mg 的绿泥石沉淀, 而 Na、Al 流失, 在砾石中的相对含量下降, 亲 Fe 的其他金属元素可以随 Fe 迁移, 以类质同象的离子形式进入绿泥石矿物中。根据分析结

果,原生区硬玉中 Fe 的含量一般在 0.09%~0.34%,而黑皮中的 Fe 含量为 5.72%,在蓝雾中为 0.43%~0.9%,因此,Fe 等元素的富集表明它们有很大一部分组分是来源于沉积物中的流体或填隙物的溶解,并非仅仅来自于硬玉的水解溶蚀。

### 2.3 翡翠蓝雾及黑皮的形成过程初探

综上,翡翠砾石中的蓝雾以及黑皮的形成是在沉积成岩过程中,在有一定温度、压力和流体介质作用下形成的。根据该区的地质资料,该区第三纪断陷盆地红层的沉积可能超过千米,仅仅底层的含翡翠砾石层的最大厚度就超过了 300 m,第三纪在断陷盆地中还有过岩浆的侵入活动,沉积层中还存在着含盐度较高的流体、有机质等物质。处于第三纪地层的底部,翡翠砾石在埋藏过程中,不仅承受了地热升温、巨大静压力的影响,而且受到层间流体的作用,使到以硬玉为主的矿物成分产生了各种水解溶蚀、交代,通过绿泥石的沉淀作用,产生了具有水岩作用特征的蓝雾和黑皮,这种作用应该有别于在低温、低压力作用下的水岩反应过程。

虽然原生区的裂隙中可出现在原岩形成后发生过的钠长石化微脉,但在砾石埋藏过程中目前尚未见有热液作用的明显迹象,但第三纪岩浆的侵入活动使盆地内的地热升高,超过一般地区的地热增温率,有利于水岩反应的进行。

分析表明,翡翠砾石发生过流体的水解溶蚀过程,硬玉的水解溶蚀作用形成了大量的孔隙,为流体的交换和绿泥石的形成提供了空间,绿泥石在一定的温压、偏碱性和弱还原的环境条件下在其中沉淀,形成蓝雾区。靠近原生区的蓝雾区内带较远离砾石边缘,水解溶蚀作用将其中硬玉和其他非硬玉杂质溶解后,由于溶蚀作用较弱,孔隙极为微小,后期与外界的通道很容易为新生矿物堵塞,故保留了浅颜色的洁净带。黑皮处于砾石最外部,与沉积物中的流体接触直接,水解溶蚀和蚀变交代作用强烈,加上砾石风化搬运过程中,由于撞击和风化等原因在砾石外层形成较多的微裂隙,水解溶蚀作用强烈产生大量孔隙,绿泥石大量聚集并可以粘结较多的其他沉积碎屑矿物。

各种观察和分析表明,蓝雾区中裂隙、硬玉颗粒的间隙、解理缝中出现有绿泥石,而硬玉晶体内部无明显变化,由晶体核部到边缘成分均匀,故可以认为,蓝雾区的矿物变化过程主要是在一定温压和流体作用条件下,通过硬玉晶体在流体—晶体界面的水解溶蚀,释放出一定量的 Fe、Mg,加上周围沉积物中存在有大量来源于含高 Fe、Mg 的硅酸

盐岩石的物质如蛇纹石等以及它们的风化产物,它们在沉积层中也发生了水解溶蚀,导致砾岩中孔隙流体中 Fe、Mg 含量不断升高,当孔隙流体中 Fe、Mg 等离子含量达到一定的程度,就会有绿泥石从碱性孔隙水中析出<sup>[22]</sup>。

黑皮部位中有机质峰的出现,说明了砾岩层中确实受到了有机质的作用,有机质可以和 Fe、Mg 等难迁移的元素结合成可溶的络合物促进物质的迁移,还可以在成岩阶段使孔隙中的流体形成碱性和弱还原环境,使绿泥石沉淀。

砾石层在抬升至地表附近后,受到当地湿热气候下形成的微酸性大气降水和地下水的淋滤作用,促使部分绿泥石在偏酸性的氧化环境中逐渐转化成赤铁矿或褐铁矿和高岭石,使早期形成黑皮蓝雾的翡翠砾石在剖面上部逐渐转变为黄皮和白皮的翡翠砾石。

## 3 结 论

1) 翡翠砾石中的蓝雾以及黑皮的形成是在沉积埋藏成岩过程中,在有一定温度、压力和流体介质作用下形成的,这种作用应该有别于在低温、低压力作用下的水岩反应过程,根据绿泥石温度计的计算结果,绝大多数绿泥石在 71~117℃ 温度下形成,最高形成温度可达 167℃;

2) 硬玉的水解溶蚀和绿泥石的沉淀是蓝雾(以及黑皮)形成的主要原因,这些绿泥石属于富铁的辉绿泥石;

3) 绿泥石的形成过程中,物质来源除了有来自硬玉水解溶蚀的组分外,也有大量来自沉积层中的流体和填隙物中的 Fe、Mg 等元素的加入;

4) 黑皮中属于干酪根脂族成分的亚甲基基团的发现表明,在蓝雾的形成过程中,有机质的演化可能对绿泥石形成所需的 Fe、Mg 等物质的迁移,同时对绿泥石结晶环境的形成起到促进作用。

### 参考文献:

- [1] 沈照理,王焰新.水-岩相互作用研究的回顾与展望[J].地球科学-中国地质大学学报,2002,27(2):127-133.
- [2] 刘宝珺.沉积成岩作用研究的若干问题[J].沉积学报,2009,27(5):787-791.
- [3] 胡楚雁,缅甸翡翠阶地矿床地质演化特征分析[J].超硬材料与宝石(特辑),2004,16(2):59-61.
- [4] 胡楚雁,陈钟惠.缅甸翡翠阶地矿床表生还原性水岩反应研究的宝石学意义[J].宝石和宝石学杂志,2002,4(2):1-7.

- [5] 袁心强. 应用翡翠宝石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [6] 邓燕华. 宝(玉)矿床[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.
- [7] 杨云保. 缅甸克钦邦-掸邦地区成矿与找矿[J]. 云南地质,2002,21(4):413-419.
- [8] PACKHAM G H, 项光. 东南亚西部右旋区的板块构造和沉积盆地发育[J]. 海洋石油,1994,5(3):1-4.
- [9] DEER W A, HOWIE R A, ZUSSMAN J. Rock Forming Minerals: 3 Sheet Silicates[M]. New York: John Wiley & Sons, 1962.
- [10] FOSTER M D. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites [J]. US Geol Surv Prof Pap,1962, 414A: 1-33.
- [11] SHIROZU H. Developments in Sedimentology (Chlorite minerals) [J]. New York: Elsevier, 1978, 26: 243-246.
- [12] 潘燕宁,周凤英,陈小明,等. 埋藏成岩过程中绿泥石化学成分的演化[J]. 矿物学报,2001,21(2):174-178.
- [13] 王濮,潘兆橹,翁玲宝,等. 系统矿物学中册[M]. 北京:地质出版社,1984.
- [14] CATHELINÉAU M, NIEVA D. Cationsite occupancy in chlorites and illites as a function of temperature [J]. Clay Miner,1988, 23: 471-485.
- [15] 张籍,田作基,冷莹莹,等. 烃和烃类包裹体的拉曼特征[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(7):900-907.
- [16] LIN V D, COLTHUP N B, FATELEY W G. The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules [M]. Boston: Academic Press, 1991:30-76.
- [17] 秦匡宗,吴肖令. 高磁场固态碳<sup>13</sup>核磁共振法研究干酪根的热降解成烃机理[J]. 沉积学报:1990,8(1):19-26.
- [18] 郭宁,郑海飞. 石英拉曼峰进行压力标定的误差研究[J]. 光谱学与光谱分析:2010,30(8):2161-2163
- [19] 谢超,杜建国,李营,等. 在200℃和0.95~7.70 GPa下天然斜绿泥石的拉曼光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析:2010,30(12):3232-3235.
- [20] 王桂华,施建成,杨海峰,等.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米粒子 Morin 相变的 Raman 光谱研究[J]. 光散射学报,2002,13(4):220-225.
- [21] 范建良,郭守国,刘学良,等. 天然与处理翡翠的光谱学研究[J]. 激光与红外,2007,37(8):769-772.
- [22] 田建锋,陈振林,凡元芳,等. 砂岩中自生绿泥石的产状形成机制及其分布规律[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(2):200-205.