祖母绿

现代宝石学

DIETMAR SCHWARZ & MARTIAL CURTI



目录

01	致谢 - M.P.H. Curti
02	前言9
03	简介 10
04	序文12
I	祖母绿14
II	内部特征分类
	地质成因52
IV	产地判定
V	阿富汗84
VI	巴西110
VII	哥伦比亚194
VIII	埃塞俄比亚
IX	马达加斯加
Х	尼日利亚
XI	巴基斯坦
XII	俄罗斯
XIII	坦桑尼亚
XIV	赞比亚
XV	津巴布韦
A1	中国460

05 后记	
06 致谢 - Dr. D. Schwarz	470
07 参考文献	



致谢 | M.P.H. Curti

首先,我要对所有过去和现在的宝石学家 表示最至诚的谢意,是他们的研究奠定了 坚实的基础,使我们可以在此基础上积累 更多的知识,在其宝贵的引导下延续他们 的工作,始终努力突破我们理解的界限并 永远瞄准更高的目标。

这里还要特别感谢我在宝石学方面的导师, 是他们教给我进行研究所需要的方法,让 我不停地对理论提出质疑,并尽可能清楚 地陈述事实;也是他们通过自己的活力、 远见、真诚和动力深深地激励着我。能够 在他们的指导下学习和工作,是一种莫大 的荣幸。

我也非常感谢 Bellerophon 团队的辛勤工作、 关怀态度和牺牲。没有他们,这一切都不 可能实现。特别感谢 Theodore Rozet 对每 一个步骤给予的协助;感谢 Ben Ploypailin Chaimart 在工作中的所有奉献,以及在摄 影和照片编辑方面的协助;感谢 Sumalee Tapprasert 在准备样品期间的协助。

我要由衷感谢 Bangrak Gems 团队在这次研究之前和研究期间所给予的不懈帮助。尤 其要感谢团队创始人 Michel Locow 与我们 分享了他宝贵的意见和建议,并感谢宝石 学家 Ben Douciere 在拍摄微观照片时提供 的技术指导。

我还要感谢 Sukhadia 宝石团队,特别是创 始人 Chiku Sukhadia 和 Kaimesh Sukhadia, 感谢他们分享了无数关于赞比亚祖母绿的 见解和知识。

我还要特别感谢 8th Dimensions 团队,特 别是创始人 Jeffery Bergman,感谢他在研 究之前和研究期间的定期指导,感谢他对 埃塞俄比亚祖母绿的深入见解和知识,感 谢他从一开始就给予我的帮助和支持。

我还想对 Crown Color 团队表示感谢,特别 是创始人 Lewis Allen,感谢他对哥伦比亚 祖母绿的深入见解和知识。

我还想向所有那些使这个项目能够在正确 的时间和正确的地点完成的人,表示衷心 的感谢。我由衷地感谢所有帮助开采、购 买、参考、取样、切割以及更重要的,是 在 40 年内收集这 1026 颗样本的人。

我想对所有在他们的国家接待过我们,并 与我们分享他们宝贵的信息以及他们对宝 石的热爱的人,表示衷心的感谢。

最后,非常感谢这个名单中没有提到的、 但在许多方面做出了贡献的所有人士。

Sant

前言

MARTIAL CURTI

这本书不是该类型书籍的第一本书,也不 会是最后一本书。 宝石的内部特征是一个 引人入胜的世界。 但是,您所持的这本书 与该主题的其它书籍不同,它的目的是展 示不同产地祖母绿的广泛特征和证据。 这 本书的唯一目的是:作为不同产地祖母绿 的内部特征的参考数据集合。

这本书是我们两年前开始的这段旅程的升 华。宝石学家工程大师系统(GEM)是一种 人工智能专业系统软件,我们运用这个系 统来帮助和指导研究以及实验室的工作。 基于化学和光谱学领域的相关分析,更重 要的是,在内含物的识别方面,这个专家 系统分析了大量的数据,以确保标准差和 平均偏差,尤其是在微观图片方面,因为 宝石学的核心仍然是来自显微镜下的视觉 输入。

图片可以传达千言万语。在宝石学中,许 多常见的宝石学特征并没有明确的定义或 广泛接受的术语。此外,正确识别这些特 征所需的技术也超出了目前宝石学的日常 实践范围。解决这些问题并不是本研究的 目的。相反,包裹体的生长特征、演替、 积累和重复出现是本书的主题。这些特征 在产地判定中发挥着重要作用,但仍缺乏 科学术语去定义,目前更多的是用富有诗 意的名词来描述。 每个地区都有其独特的历史,地理,地质 学和宝石学特征。 其各部分之间的联系是 牢不可破的。 我们区分的宝石产地可能是 一个人为的地缘政治结构,但其中许多国 家的边界是由地理特征和地质事件设计而 成的。

宝石通常是在山脉形成过程中的压力和断裂中产生的,它们可能被河流冲刷,跨越 了巨大的自然地缘政治边界。由于地球板 块不断移动,今天在地理上相距甚远,甚 至被大洋隔开的国家,在遥远的过去可能 有着共同的边界。尽管它们的地理位置相 距甚远,其矿床可能是由同一地质事件创 造的,并有共同的化学和内部特征。

我们现在开始的第二段伟大旅程,也就是 通过这本书与您分享的这个部分,是一个 源自好奇心的旅程。宝石学是一个通往宝 石核心的探索。像侦探一样,我们必须收 集事实和证据,以得出关于宝石性质的结 论。

我们可以花几个小时在一个微小的晶体中 来回穿梭,就像一个以显微镜为飞船的宇 航员,在一个不同的宇宙中遨游,这个宇 宙是微观的、晶体的。

当代的宝石学 | Dietmar Schwarz

如今,高级别宝石学实验室的主要任务是提供一项服务,其中包括出具一张说明宝石产地的报告,即 "产地报告";同时,这份报告也将阐述宝石是否经过了优化处理。

出具"产地报告"要求实验室的基础设施具备三方面的必要条件,即"三脚架体系"。"宝石学的 三条腿"包括: [1a]物理空间/场所, [1b]基础行政设施,以及[1c]特定的宝石学仪器/设备; [2] 合格的员工(不同级别:操作员,分析师,科学家);以及[3]完整的参考标样库,包含与产 地判别相关的彩色宝石标本。

产地判别过程中的第[1]必要条件主要取决于实验室的财力背景。如果有足够的资金,则可以 轻松快捷地租用场地,购买设备并雇用行政人员。然而第[2]必要条件,也就是在技术部门中 聘用合适的员工,不仅取决于财力状况。通常,这里主要局限于国内和国际市场上是否有合格 的专业人员。在实践中,这可能会在时间计划/时间管理以及实验室的期望/要求的专业水平方 面造成严重的限制。

回到"三脚架体系",我们须牢记,只有三条腿的长度和强度相当时,三脚架才能稳定。对于 "实验室三脚架"来说,这意味着仪器,人员资格和参考标样/数据库这三个部分都应处于同一 (较高)级别。例如,仅拥有高级仪器和高素质的专业人员是不够的。

对于条件[3] -参考标样库及与之相关的因素-一个全面的数据库同样重要。 令人惊讶的是,在 讨论实验室为提供宝石产地辨别高级服务所必须满足的基本前提条件时,常常会低估条件[3]在 产地辨别过程中的重要性。 实际上,满足条件[3]可能是最难实现的。 它不仅需要大量的资金 投入,而且还需要花费大量的时间来搭建一个足够完整的参考标样库,从而可以建立一个全面 的数据库。 其中包括数据的收集,评估/处理和数据解读,这些都为实验室宝石学家的日常活 动奠定了基石。

彩色宝石的产地判别起源于欧洲。 1950 年代初,被认为是该领域的先驱者, Eduard Gübelin 博 士开始对宝石矿床进行系统化表征研究。他的工作为其它宝石学信息铺平了道路:宝石产地。 最初,实验室应用"经典方法"去确定产地。 这包括尝试在未知宝石中查找被认为是特定产地的 宝石属性(这是指确定特定地理区域的典型属性)。传统上,实验室的鉴定程序主要侧重于通 过宝石学显微镜研究包裹体特征。例如长期以来,"经典的","气-固-液"三相包裹体一直被认为 是产自哥伦比亚东科迪勒拉山脉的祖母绿的特定特点。

如今,高级别产地判别实验室遵循"现代方法",即产地判定是基于未知宝石的完整档案。 这意 味着在实验室的检测过程中会收集待测宝石的所有相关数据。 收集完有关待测宝石的完整档案 后,将其数据集与经过精确记录和解读的参考标样中的样本属性进行比较。 基于此评估,待测 宝石可能与某种特定的地质成因环境有关,最后确定其特定的地理位置。 我第一次收集矿物标本的经验可以追溯到我在德国美因茨大学学习矿物学和宝石学的时候。当 我作为学生,第一次实地考察挪威米约萨的祖母绿矿区(1978年),和斯里兰卡的宝石矿区时 (1980年),我已经意识到需要自己收集参考样标。如今,经过四十年和无数次实地考察, 我的标本库已经涵盖了数千颗有据可查的不同彩色宝石的标本。

1983 年至 1991 年期间,我在巴西米纳斯吉拉斯州欧鲁普雷图联邦大学担任德国学术交流服务 (DAAD)的科学讲师,这也是我迈向建立高级别标本库的第一步。作为矿物学和宝石学教授, 我意识到有必要在大学的宝石学实验室中,将样本材料用于培训和教学目的。由于乌鲁普雷图 位于帝王托帕石矿区的中心位置,且前往整个米纳斯吉拉斯州的宝石矿区都特别便捷,这使标 本库的建立和升级都得以稳步进行。当时收集的重点主要是欧鲁普雷图附近的帝王托帕石标本; 来自米纳斯吉拉斯州,圣伊斯皮里图州和巴伊亚州的伟晶岩矿物标本;最后,且同样重要的是, 来自巴西的其它祖母绿矿区的标本:米纳斯吉拉斯州的 Itabira-Nova Era 矿区,巴伊亚州的 Carnaíba-Socotó矿区,戈亚斯的 Santa Terezinha (Campos Verdes)矿区(以及位于同一州的 Itaberaí和 Pirenópolis 矿区),塞阿州的 Tauá矿区,以及后来的 Caiçarado Rio dos Ventos / RN。

1990 年代初,在德国,我有机会在自己就读的大学--美因茨大学从事几个关于祖母绿的研究项目。这些项目得到了德国研究基金会(DFG)的支持,使我有机会参观了世界各地大量的祖母 绿矿区,例如位于东科迪勒拉山脉的矿区(哥伦比亚)、恩多拉 Rural Emerald Restricted Area 和米库-卡富布矿区(赞比亚)、桑达瓦纳-马奇韦矿区(津巴布韦)、马南加里地区矿区(马 达加斯加)、东部沙漠矿区(埃及)、南非的莱兹多普矿区、斯瓦特河谷矿区(巴基斯坦)和 乌拉尔山脉矿区(俄罗斯)。在瑞士的卢塞恩,在我担任著名的古柏林宝石实验室的研究主管 期间(1993-2013),我的研究重点转向了红宝石和蓝宝石。

除了在不同的宝石实验室工作(从 1993 年在 GGL 实验室开始),我还与许多不同国家的政府 机构合作,参与了各种教学活动,例如巴西的 DNPM 和 CAPES-CNPq,哥伦比亚的 ECOMINAS, 法国的 CRPG/CNRS/IRD,巴基斯坦的 GSP,中国的 NGTC。此外,我还在巴西和泰国的许多大 学,以及哥伦比亚波哥大的哥伦比亚国立大学,葡萄牙的波尔图大学,肯尼亚的内罗毕大学, 坦桑尼亚的达累斯萨拉姆大学和马达加斯加的塔那那利佛大学进行了研究和学术项目。我曾在 中国武汉和北京的中国地质大学(CUGB)担任客座讲师,并在上海的同济大学担任宝石学兼 职教授。我还参加了许多国际会议,科学研讨会,委员会等。并在许多国家的数个宝石学课程 /研讨会/讲习班担任协调人和/或讲师,且在最重要的宝石学杂志和期刊中发表了大量的文章。



- 序文 彩色宝石

"第一件被我们拾起,并说 '它有价值,不为别的,只为它的美' 的物 品,不是食物,不是燃料,不是药品; 而是彩色宝石"

-作者未知



Be₃ Al₂[Si₆O₁₈] +Cr,V, Fe, Mn, Mg, Na, Cs, Rb, Li, ...

"祖母绿是一种透明、艳绿色且富含铬和/或钒的绿柱石"。

祖母绿-绿柱石家族的一员-是一种由环状单元构成的铍铝硅酸盐。 晶体结构为 硅氧环沿 C 轴形成柱状空管结构(图 1.1)。 在掺入一些不能被绿柱石晶格容 纳的离子时,这些柱状空管结构便起着至关重要的作用。 外来离子如钠和铯, 由于其尺寸而不能占据正常晶格的位置,这些通道就可以将其容纳其中。 在整 个分子的整合中,例如水或二氧化碳,这些通道也起着重要作用。

绿柱石是一种他色矿物。 化学上纯的绿柱石是无色的。绿柱石品种(海蓝宝石,摩根石,金绿柱石等)的颜色范围由内置在晶格中的那些外来元素决定。 其中最重要的是铁(致蓝色,绿色和黄色),锰(致粉红色和红色),铬和钒(都致绿色)。 虽然钒也可以产生几乎相同的色泽,但大多数祖母绿的主要致色元素是铬。 掺入不同量的三价铁和二价铁会在祖母绿颜色中添加所谓的海蓝宝石的颜色,从而产生不被青睐的蓝色调。

祖母绿中还可以存在其他元素,例如镁和钠,这些元素并不会影响其颜色。它 们含量的范围区间很大,差距可以达到几个重量百分比。镁含量高表明该晶体 是在变质片岩中形成的。钠是镁不可或缺的伙伴,因为它们共同构成了铝的类 质同象替代物。当一个二价镁离子替换掉一个八面体位置上的三价铝离子时, 矿物的结构中就缺少了一个正电荷。此时,结构通道中掺入的一价原子(例如 ,钠,锂或铯)便可以将其中和以达到电荷平衡,通常还伴随着一或两个水分 子。用二价离子(例如 Mg²+和/或 Fe²+)替代 Al³+需要伴随另外一个替代过程 以维持电中性,通常利用 Na¹⁺以以下方式实现:

 $AI^{3+,VI} = Mq^{2+,VI} + Na^{1+(iii)}$ 或 $AI^{3+,VI} = Fe^{2+,VI} + Na^{1+(iii)}$



图 1.1: 绿柱石晶体结构的(001)平面

与其它宝石矿物相同,祖母绿可以通过以下矿物学-宝石学标准来描述其特征:

- [1] 内部特征。
- [2] 化学指纹图谱。
- [3] 光谱指纹图谱-紫外-近红外。
- [4] 振动指纹图谱: FTIR 和拉曼。
- [5] 同位素指纹图谱。
- [6] 物理-光学特征。

上述标准中,内部特征,化学指纹图谱,以及在较小程度上,紫外-近红外的光谱指纹图谱和 振动指纹图谱(FTIR和拉曼),是针对祖母绿的"宝石学描述"中,最具有价值的特征。刻面 宝石中同位素比率的确定,在实验室行业中仍不被视为一项常规的分析操作。使用 L.A.-I.C.P.-M.S.(激光烧蚀-电感耦合等离子体质谱法)的化学指纹图谱被认为是"接近无损",因为 激光在宝石表面(通常在腰棱区域)烧出了一个微小的坑。

[1] 内部特征

本书第二章详细讨论了世界范围内,最重要的祖母绿矿区出产的天然祖母绿的包裹体特征,包括特征的记录,描述和解读。

[2] 化学指纹图谱

祖母绿的化学指纹图谱反映了其形成时的地质-矿物环境(矿化流体的成分,宿主岩石的成分, 温度和压力条件)。例如,来自巴基斯坦斯瓦特河谷和巴西 Santa Terezinha 矿区的祖母绿 中(均产自富含铁和镁的滑石碳酸盐片岩),杂质元素的含量是所有祖母绿中最高的。相反, 产自哥伦比亚东科迪勒拉山脉的黑色页岩中的祖母绿,其杂质元素的含量就非常低。

由于平行于 C 轴的管状通道的存在,绿柱石/祖母绿的结构被认为是"开放性"结构,可以容纳 许多杂质元素。这使祖母绿的晶体化学非常复杂,同时,化学指纹图谱也为实验室宝石学家在 尝试鉴定祖母绿产地的过程中,提供了非常强大的工具。

在天然祖母绿中,三价离子和二价离子(例如 Mg 和/或 Fe) 替代 Al³+是最常见的替代现象。 三价离子取代八面体晶格位置中的 Al³+不需要电荷补偿:

Al^{3+((Mm)} → [V, Cr, Mn, Fe]^{3+((Mm)}

Mg²⁺ 和 Fe²⁺ 的介入需要伴随其它替代过程来保持电中性。这通常需要 Na¹⁺来完成,但很多其它的元素也可以参与这个过程:

Al<sup>3+(
$$\Lambda$$
 mathbb{(} harpoonup Al, K, Cs]^{1+ (M mathbb{(} harpoonup Al, K) (M mathbb{(} harpoonup Al, K) (M mathbb{(} harpoonup Al, K)) (M mathbb{(} harpoonup Al, K) (M mathbb{(} harpoonup Al, K)) (M mathbb{(} harpoonup Al, K))) (M mathbb{(} harpoonup Al, K)) (M mathbb{(} harpoonup Al, K))) (M mathbb{(} harpoonup Al, K)) (M mathbb{(} harpoonup Al, K)) (M mathbb{(} harpoonup Al, K)}</sup>

经发现,除了上述替代现象,祖母绿中还发生了其它的交换反应 (Schmetzer et al., 1994)。这包括 Al³⁺ 和/或 Si⁴⁺异价类质同象替代四面体位置上的 Be²⁺,以及 Al³⁺异价类质同象替代四面体

^{第四章} 地理产地判定

> 彩色宝石产地判定起源于 1950 年代的欧洲,最早提供这项服务的实验室是 Gübelin (GGL) 和 SSEF,其总部都在瑞士。从一开始,宝石的产地判定就是一个 在市场上非常有争议的话题,有强大的支持者,也有反对者。最初,产地报告 只是针对几种特定的宝石品种,和几个非常著名的产地,尤其是抹谷(缅甸) 的红宝石,和克什米尔 Sumjam (印度)的蓝宝石。而如今,一些实验室也针对 祖母绿,亚历山大变石,尖晶石和石榴石(翠榴石;沙弗莱)提供产地判定服 务。

确定彩色宝石产地的标准

在谈到宝石(包括祖母绿)的产地判定时,三个问题至关重要:

- [1] 判定一颗未知祖母绿的产地的可行性条件有那些?
- [2] 实验室如何确定产地?
- [3] 彩色宝石产地判定有哪些局限性?

与所有彩色宝石一样,祖母绿也有其一系列的宝石学-矿物学特征。祖母绿的宝 石学特性是由其生长的地质-矿物环境直接决定的。这些特性总是可以体现祖母 绿晶体在自然界生长过程中的生长条件。遗传环境,尤其是包括母岩的矿物成 分在内的自然环境,与祖母绿的矿物宝石学特性之间存在着密切的关系,宝石 学家可以在实验室研究它们之间的关系,从而使产地判定成为可能。



产地判定的"经典方法"包括尝试在未知宝石中查找被认为是特定产地的特征(即特定产地的 典型特征)。 传统上,实验室中的鉴定程序主要侧重于通过宝石学显微镜研究包裹体特征。 例如长期以来,"经典的金红石针包裹体场景"被认为是缅甸抹谷红宝石典型的鉴定特征;同 样,所谓的"三相包裹体"-尤其是在空洞中,且有锯齿状轮廓的-被认为是产自哥伦比亚东 科迪勒拉山脉祖母绿典型的鉴定特征(图 2.13)。

"现代方法"判定产地是基于未知宝石的完整档案。这意味着在实验室的检测过程中会收集待测宝石的所有相关数据。通常来说,这包括了包裹体+化学指纹图谱+光谱指纹图谱(紫外-近红外/FTIR/拉曼)。收集完有关待测宝石的完整档案后,将其数据集与经过精确记录和解读的参考标样库中的样本属性进行比较。对检测过程中收集的矿物-宝石学性质的解读可以找出自然界中与其相关的特定环境。最后,通过这种特定的地质环境确定其产出的地理位置。

与宝石生长的自然环境最相关的因素有: 母岩的性质; 母岩与周边岩石之间的"交互事件"(例 如流体流动产生的交换反应,从而引入或带走宝石生长所必需或不希望存在的化学成分); 压力 和温度条件; 以及溶液/液体的性质和成分,这些溶液/液体将负责溶解,运输和沉淀宝石晶体 生长所需要的化学元素。

用于描述宝石的矿物学-宝石学特征的标准/分析方法有:

[1] 包裹体场景研究*, 使用

[1a] 光学显微镜的现象学描述和

- [1b] 拉曼显微光谱和 SEM (扫描电子显微镜) 用于固体包裹体的鉴定。
- *在宝石内部观察到的特征的总和:固体包裹体,包含流体填充物的空洞,原生和次生的生长特征。
- [2] 化学指纹图谱, 使用 EDXRF X 射线光谱 或 L.A.-I.C.P.-M.S.

(化学数据,例如元素绝对浓度;浓度范围;元素比率或相关性图表;微量元素的形式)。

[3] 紫外-可见-近红外范围内的光谱指纹图谱。

紫外可见近红外光谱 (UV-vis-NIR 或 UV/Vis/NIR) 是指在紫外-可见-近红外光谱区域中的吸收光谱或反射光谱。在电磁波谱的该波段中,分子经历电子跃迁。

[4] 振动指纹图谱: 拉曼和 FTIR 光谱

[4a] FTIR 光谱

宝石材料在电磁光谱的红外区域中的吸收是由于晶体结构的振动引起的。 电磁光谱的 红外区域是恰好超出可见光谱红光端的能量范围。

[4b] 拉曼光谱

拉曼光谱法是一种分子光谱技术,是利用光与物质的相互作用来深入了解材料的组成或特性,与 FTIR 类似。 拉曼光谱提供的信息来自光的散射过程,而红外光谱则依赖于光的吸收过程。

[5] 同位素研究

微束技术是使用激光或离子束从样品的小坑点(即直径几十微米)中喷出离子化的粒子。然而,这些技术的(微观)破坏性,以及有限的可用性和费用,仍然限制了它们在 宝石学上的应用。

[6] 光学性质 (折射率,双折射)

这些标准中,内部特征,化学指纹图谱,以及 -相对不那么重要的- 紫外-可见-近红外区域的 光谱指纹图谱和振动光谱是确定祖母绿产地的最有价值的特征/分析方法。 刻面宝石中同位素 比率的确定在实验室行业中仍不视为常规分析程序。 使用 L. A. -I. C. P. -M. S. (激光烧蚀-电 感耦合等离子体质谱法)的化学指纹图谱被认为是 "近无损"或"微破坏",因为激光在宝 石表面(通常在腰棱处)烧出了一个微小的坑。

第五章至第十六章详细介绍了以下国家/地区的祖母绿相关信息:

- [第五章] 阿富汗(潘杰希尔山谷)
- [第六章-A 巴西 (Bahia 州的 Carnaíba-Socotó; Minas Gerais 州的 Itabira-Nova Era;
- to C] Goiás 州的 Santa Terezinha)
- [第七章] 哥伦比亚(东科迪勒拉山脉)
- [第八章] 埃塞俄比亚(Shakiso)
- [第九章] 马达加斯加(Mananjary/Ianapera)
- [第十章] 尼日利亚 (Kaduna-Plateau 州)
- [第十一章] 巴基斯坦(斯瓦特河谷)
- [第十二章] 俄罗斯(乌拉尔山脉)
- [第十三章] 坦桑尼亚 (Lake Manyara/Sumbawanga)
- [第十四章] 赞比亚 (Ndola Restricted Rural Area)
- [第十六章] 津巴布韦 (Sandawana/Machingwe)

这些是都是最有经济价值的祖母绿产地。包括那些之前非常有市场影响力的产地,例如 Sandawana (津巴布韦);也包括那些为全球市场生产和提供大量不同品质的祖母绿原石和裸石的 产地,例如东科迪勒拉山脉(哥伦比亚),Ndola Restricted Rural Area (赞比亚),Minas Gerais 的 Itabira-Nova Era (巴西);以及那些有潜力,能为将来的市场做出更多贡献的产地,例如 Mananjary/Ianapera (马达加斯加),Lake Manyara/Sumbawanga (坦桑尼亚),达布达尔和麻栗坡(中国)。

基于评估,解读和研究这一章节提供的信息,我们要牢记的是宝石的矿物学-宝石学特征和宝 石形成的地质成因环境条件之间有着直接的关系。如上所述,产地判别的"关键特征"包括内 部特征,化学指纹图谱,以及光谱/振动指纹图谱(详见第一章)。通常情况下,未知祖母绿 的地质成因类型(基于 Giuliani et al., 2019 提出的祖母绿矿床新分类方法)的判定可以通过对 比未知祖母绿完整的信息和全球所有相关祖母绿产地的数据库中的信息而得出结论。因此,整 个测试流程的最终目的-即判断产地-也就变得可行了。

关于第三个核心问题-"判断祖母绿,或者彩色宝石的产地,通常有哪些局限性?"-我们已 经了解了祖母绿在自然界中形成的地质成因环境条件直接决定了其矿物学-宝石学性质。如果 地质环境条件相差特别大(例如哥伦比亚是黑色页岩,巴西 Santa Terezinha 是金云母片岩和碳 酸盐滑石片岩),那么这些产地出产的祖母绿,其矿物学-宝石学特征也会相差特别大,因此 就可以轻松将其分辨。但如果两个产地的地质环境条件是一样的,或者很类似(例如 Santa Terezinha 矿区和巴基斯坦斯瓦特河谷矿区),这些矿区出产的祖母绿,其特征就会大量重叠的 部分。区分这些祖母绿的产地将变得非常困难,甚至不可能。

祖母绿产地

第五章到第十六章研究的产地



^{第五章} 阿富汗 ^{历史}

Pliny 在其公元一世纪编写的"自然历史"中提到了 Bactria 地区的"smaragdus", 该地区包括当今的伊朗和阿富汗。 尽管有记载, 该地区出产祖母绿已经有数千年历史, 但阿富汗潘杰希尔山谷大规模出产祖母绿是从 1970、1980 年代以来的近几十年(Bowersox et al., 1991)开始的。 如今, 已被广泛接受的是, 那些被称为古老的(可追溯至公元 1000 年)印度教宝藏 Bactria 祖母绿, 很可能是阿富汗和巴基斯坦的老矿出产的。

据报道,俄罗斯地质学家在 1970 年代初的一次系统性运动中发现了祖母绿矿区; 然而,通过分析历史上的祖母绿发现,一些印度首饰上的"老矿祖母绿"其实是出 产于阿富汗。尚不确定潘杰希尔矿区最早的开采时间,但有迹象表明,开采时 间是在 18 世纪之前 (Giuliani et al., 2000)。

潘杰希尔山谷是阿富汗塔吉克族人民最集中的区域。 在 1979-1989 年苏联阿富汗 战争中, 指挥官 Ahmad Shah Massoud (被誉为"潘杰希尔雄师")将这里用作北方 联盟的基地。潘杰希尔山谷是阿富汗唯一成功抵抗苏联控制的区域。 1996 年, 塔利班掌权阿富汗后,潘杰希尔山谷成为主要的抵抗根据地,也是抵抗运动领导 人 Ahmad Shah Massoud 的重要据点。 据说 Massoud 通过出售潘杰希尔祖母绿为 其军事活动提供了部分资金。 尽管贸易路线从巴基斯坦转移到塔吉克斯坦,但该 地区的祖母绿产量在 1999 年有所增加。 阿富汗祖母绿矿区一直是由塔利班的敌 人,潘杰希尔塔吉克人控制的。

Bowersox et al. (2015)将阿富汗祖母绿矿区的近代历史总结如下。阿富汗潘杰希尔山谷的商业化 开采始于1980年代初,主要是由阿富汗的企业和个人进行的,其中大部分都是基于历史习俗, 部落和家庭活动。阿富汗居民在整个山谷的数百条隧道和竖井中发现了大颗、深绿色的晶体。 非正式开采和销售这些祖母绿为苏联占领阿富汗(1979-89)期间的圣战者("自由战士")提供 了资金支持。自此之后,在那里开采的祖母绿一直为当地阿富汗人提供了一个非正式的,即使 收益并不是非常可观的商业机会。阿富汗的祖母绿开采从未正式化;没有合法的祖母绿矿区开 采许可证。尽管如此,由当地阿富汗人开采的祖母绿每年估计创收 1000 万美元,且收入没有 被正式征税。

阿富汗祖母绿矿区位于 Kabul 东北部约 70 英里(113 公里)处,从 Khenj 村一直延伸到 Dest-e-Rewat 村。祖母绿矿区的已知海拔范围大约为 2,135 – 4,270 米,处于潘杰希尔山谷 东部的山地中。



大约 20 亿年前, 一个古老的超级大陆-冈瓦纳大陆开始解体。冈瓦纳陆块与欧 亚板块发生碰撞和侵入, 从而形成了喜马拉雅山脉。这些碎片形成了一个地质 镶嵌结构, 就是如今的阿富汗。

潘杰希尔山谷是这两个板块碰撞后主要的断层带:其西北部是欧亚大陆板块, 东南部是一个小型史前大陆,辛梅利亚大陆。潘杰希尔山谷就位于古特提斯古 洋盆闭合的遗址。





阿富汗祖母绿矿床属于 IIC 亚型 (构造-变质-相关,寄宿于非 M-UMR 与黑色页岩的变质岩)。这种类型的矿床包括含祖母绿的石英矿脉和细矿脉,位于中压变质岩中,从绿色岩相到麻粒岩相。

阿富汗潘杰希尔祖母绿矿床位于沿着潘杰希尔山谷的赫拉特-潘杰希尔缝合带。这个缝合带标志着 印度-巴基斯坦板块与科希斯坦岛弧系列之间的碰撞,包含了很多个断层,例如赫拉特-潘杰希尔横 移断层,这个断层基本只在渐新世-中新世时期非常活跃。祖母绿矿床位于 Khendj, Saifitchir 和 Dest-e-Rewat 山谷的赫拉特-潘杰希尔缝合带的东南边。它们寄宿于变质片岩中,这些变质片岩曾受 强烈断裂、流体循环、以及热液蚀变的影响,发生了严重的钠长石化作用以及白云母-电气石的交 代作用。

祖母绿被发现于晶洞和石英矿脉中,伴生矿物有白云母,电气石,钠长石,黄铁矿,金红石,白云石和氯-磷灰石。通过对一颗产自 Khendj 矿区的含祖母绿的石英矿脉中出产的白云母进行 Ar-Ar 定年显示,其形成于渐新世,23±1 Ma 之前。如今,Cr 和 Be 的来源仍未可知 (Giuliani et al., 2019)。



宝石学



潘杰希尔祖母绿 4.88 ct Bellerophon Gemlab 收藏 产自潘杰希尔 (阿富汗) 的祖母绿

内部特征

[1] 固体包裹体 (见包裹体图集,图 AFG-01-05)

关于潘杰希尔祖母绿中固体包裹体的现有信息并不是很多。Bowersox (1991) 有提到褐铁矿,绿柱石,黄铁矿,碳酸盐菱面体和长石。Moroz 和 Eliezri (1999) 只检测到 Fe-Cr 氧化物和绿柱石 固体包裹体。 Sabot et al. (2001) 有提及天然有机化合物和石墨包裹体(与有机物对硫酸盐的热化学还原有关)。Schwarz 和 Pardieu (2006) 发现的潘杰希尔祖母绿中最常见的包裹体矿物是碳酸盐,石英,黄铁矿和电气石。报告中提及的"内部矿物组合"与潘杰希尔祖母绿的母岩性质一致。

下文描述是基于 200 多颗潘杰希尔祖母绿的显微镜下检查结果 (Schwarz, 2018/2019)。"内部矿 物组合"的描述如下:

- 无色透明,短棱镜-长棱镜形绿柱石/祖母绿晶体。透射光下很难观察到这些包裹体;但在 正交偏光下,清晰可见,因为其消光的位置与祖母绿主体不同。
- 无色透明,无规则形状(圆形)或发育完好的(菱形)碳酸盐晶体。这些碳酸盐晶体在祖母绿中形状分明,清晰可见。它们没有明显的结晶学定向,是原生的。
- 原生的、大小各异的黄铁矿晶体。这些黄铁矿通常形状不规则;有时,它们有很多(微圆的)晶面。光纤灯照明下,这些黄铁矿包裹体表面呈现典型的黄铜状金属光泽。
- 原生电气石包裹体, 晶体呈绿棕色, 透明, 短棱镜-长棱镜形(图 5.1)。
- 黑色不透明矿物包裹体;以下述形式呈现:

(1) 表面"粗糙的"不规则圆形晶体; 或

(2)小颗粒,角状晶体,表面呈现"亚金属"光泽(石墨?)。

- 无色矿物包裹体在潘杰希尔祖母绿中很常见;它们属于不同的品种(碳酸盐,石英,长石以及不明确晶体)。它们的透明度(透明到灰白色)、大小(大部分都很小,有些呈糖粒状)、形状(不规则圆形到角状;极少见发育理想的)、以及整体轮廓的清晰程度(相对于祖母绿主体,弱到强)都差异很大。通常,这些晶体单独存在;一部分是以簇状或紧凑的团簇形式排列。
- 褐色到橙-褐色,透明到半透明,不规则形状的(角状的)不明晶体。
- 目前为止, 唯一发现的潘杰希尔祖母绿独有的矿物包裹体, 是一种磷酸盐矿物, 拉曼分析 其有两种可能性: 独居石或曙光石 (Schwarz 和 Pardieu, 2009), (图 5.2)。



图 5.1: 阿富汗祖母绿中发育完好的电气石晶体。



图 5.2: 原生管状空洞/流体包裹体,伴随一块无色透明 晶体(拉曼光谱显示其为磷酸盐类矿物,最有可能是独 居石,或曙光石)。

[2] 有流体充填的空洞 (见包裹体图集, 图 AFG-06 - 22)

阿富汗潘杰希尔祖母绿中含有很多不同类型的流体包裹体(例如两相,三相,或多相包裹体)。 空洞/流体包裹体大部分都是原生的,且定向平行于 c 轴。它们与哥伦比亚祖母绿中"经典的""sl-g "三相流体包裹体外观特别相似。但它们内部经常含有多种固相/子晶体(通常是钾盐和石 盐)。因此,它们被称为"多相流体包裹体"(图 2.16)。

Bowersox et al. (1991) 指出, 阿富汗潘杰希尔祖母绿中的多相包裹体中最多可包含八个子矿物, H₂O 主导的卤水, 以及有些情况下, CO₂-液体和气体。呈立方体结晶形态的固体包裹体数量最 多,其为石盐(NaCl)。另一种均质体的折射率较低,可能是钾盐(KCl),是数量排名第二的子 矿物,形状为等径半自形颗粒。大部分多相包裹体也包含最多两个额外的均质体子晶体,其中 一个或者两个的双折射率很高,呈半自形到自形菱面体(碳酸盐)。同时也观察到,一些包裹 体是细小颗粒状,品种未知的非均质体固体。固体包裹体的总量可占多相包裹体体积的 50%以 上。

根据 Vapnik 和 Moroz (1991)的描述, 潘杰希尔祖母绿的多相流体包裹体包含气相和液相 (V + L), 石盐立方体(H), 一个通常是原生的, 有时是圆形的钾盐颗粒(Syl), 以及多个非均质体颗粒的聚形 (S)。 NaCl 和 KCl 的体积和浓度与哥伦比亚祖母绿不同。总体盐度预计在 30 - 33 wt.% eq. NaCl 。

Saeseaw et al. (2014) 基于对阿富汗潘杰希尔祖母绿的观察,得出的总结是其中包裹体是多相的。 它们典型的特征是细长的针形(很普遍),但也可能呈现不规则或者甚至锯齿状形态(比较少 见)。这些包裹体内部通常有几个(最多 10 个)立方体到圆形的透明晶体,有时也会有很小 颗,黑色不透明晶体。正交偏光下观察,立方体晶体是单折射,而圆形小颗粒晶体是双折射。 这些观察结果与 Bowersox et al. (1991) 之前得出的结论一致,他们认为气泡的体积比主要的晶 体包裹体(通常是立方体)要小一些。 Giuliani et al. (2019) 也陈述到,在潘杰希尔祖母绿内部,原生、多相、含有石盐-钾盐的流体包 裹体很普遍。与祖母绿伴生的流体中,总溶解盐量(TDS)在 300 至 370 g/L 之间,流体被捕 获的温度大概为 400 °C。流体中 Cl-Na 含量很高,而且含硫酸盐(140 < SO₄ < 4300 ppm)和 锂 (170 < Li < 260 ppm),但氟含量特别低,甚至可能为零。高 Cl/Br 比率与石盐溶解一致。I/Cl 与 Br/Cl 比率图也显示出流体包裹体中 I 含量很低,这也是蒸发岩溶解而来的卤水的典型特征。

阿富汗潘杰希尔祖母绿中的原生流体包裹体通常定向平行于祖母绿的 c 轴。其特征如下:

- (1) 细小的针状或管状空洞,长度和厚度不一("生长管状体");其中包含的流体充填 物可能是 "s-l-g" 三相或"s_x-l-g" 多相型;
- (2) 形状不规则的长形空洞,有时轮廓为锯齿状。这些空洞通常非常扁平,轮廓不明显; 总体来说,它们包含"s-l-g"三相或"s_x-l-g"多相充填物。
- (3) 极为少见长矩形空洞("负晶")(Schwarz 1918/1919)。

[3] 原生和次生生长特征 (见包裹体图集,图 AFG-23 - 29)

生长管状体和负晶

生长管状体/通道在阿富汗祖母绿中很常见。它们定向平行于祖母绿的 c 轴,长度和厚度各不相同。总体来说,生长管状体中包含各种类型的流体充填物。生长管状体可能集中分布于祖母绿主体的某个区域(例如底部),或者分布于与底轴面平行排列的"生长带"中。原生(通常扁平的)空洞/流体包裹体也可能形成于平行底面的生长面上。其它原生空洞通常是不规则的细长形,经常呈扁平以及锯齿状的轮廓。长矩形("负晶")非常罕见。

区域性结构

阿富汗祖母绿晶体中可见独特的区域性结构特征,例如有些晶体是由"底部区域"和"顶部区域" 组成的。这两块区域被一个生长面隔开,这个生长面是接近平面的,且基本与祖母绿的底面平 行。在这个分区平面上分散排布大量的矿物包裹体。这两个晶体部分的内部特征完全不同,颜 色也不同(底部区域接近无色,顶部区域是绿色)。由此便形成了双色祖母绿。

平行底面或者棱柱面的生长带通常含明显的色域,或者包含了不同数量的裂隙,固体包裹体, 或者生长管状体。每条生长带内部也常见"不规则的生长结构",且基本都成轻微朦胧状。很多 晶体通常呈分区状,包含"内核区","中区"和"外区"。例如:

[a] 一个晶体中含有

(1)一个"内核区域",包含大量原生空洞,大小形状不一(平行 c 轴定向排列的细长形空 洞和不规则形状的大型空洞;这些空洞内有不同类型流体充填物),以及

(2) 一个相对干净的"外部区域"。

[b] 一个晶体中含有

(1) 一个几乎无色(浅黄色)的"内核区域",

(2) 一个浓绿色的"中间环状区域",和

(3) 一个无色, 六边同心"边缘区域"。

结构性特征

阿富汗潘杰希尔祖母绿基本属于结构性特征最明显的祖母绿;而且这些结构性特征通常棱角分明,分布均匀。垂直祖母绿 c 轴观察,可见下述生长特征:平行于底面、棱柱面的直线/角状 生长线/带,或平行锥面的生长线(呈锯齿状)(对比图 2.26)。沿 c 轴观察,可见明显的生 长结构呈六边同心"生长环"分布,其厚度不一(对比图 2.27)。生长环的边界可能会很清 晰,或稍微朦胧。这些环状体是由平行于一级棱柱面和二级棱柱面的平面组成的(一级棱柱面 通常主导)。

裂隙

Bowersox et al. (1991) 提出, 包含假-次生多相包裹体的斜裂隙很常见。此外, 潘杰希尔祖母绿还可能含有大量次生或假-次生两相(H2O – 液体和气体)包裹体, 沿斜裂隙面分布。

通过显微镜下检测 200 多颗产自潘杰希尔不同矿区的祖母绿标本,发现了如下的"裂隙场景 "(Schwarz, 2018/2019):愈合裂隙通常非常细腻。它们大部分没有结晶学定向;有时会呈现面纱 状。通常,它们包含不规则形状,或圆形(通常发育不理想)的空洞,空洞中含有"s-l-g"型三 相流体充填物。裂隙的特征可能与哥伦比亚祖母绿非常类似,甚至完全相同。有时,愈合裂隙 基本平行于 c 轴 (平行于棱柱面)或者平行于底轴面。与棱柱面平行的裂隙面上的空洞通常是 扁平的,形状不规则或呈锯齿状。与底轴面平行的裂隙面通常含有大且扁平的空洞。有些裂隙 呈近似薄膜状,边界不清晰,而且有干涉色(使用光纤灯照明)。通常不呈现典型网格状或指 纹状排列。

未愈合-反光或灰色-磨砂状应力裂隙的大小和形状各有不同;光纤灯下呈镜子状外观。通常, 这些裂隙没有结晶学定向;有时,平行于底面排列。

化学指纹图谱

当对比阿富汗潘杰希尔祖母绿文献中的数据时,可以明显发现,不同文献给定的含量范围(尤 其是铬,钒和铁的含量范围)相差很大。导致差异的主要原因是所分析标本的"宝石学品质"不 同。如果仅考虑高品质宝石,铬和钒的平均含量将明显高于中低品质的材料。另一方面,"商 业级"祖母绿中铁的平均含量通常要比顶级祖母绿高得多。我们可以断言,例如在曼谷市场上 交易(并在当地的宝石实验室进行检测)的阿富汗祖母绿,其内部元素含量变化幅度可能大于 下文列举的文献中汇总的数据范围。其它产地的祖母绿,尤其是哥伦比亚,也是如此。 表 5.1 Saeseaw et al. (2014) 和 Karampelas et al. (2019) 发现的阿富汗潘杰希尔祖母绿元素含量区间(单位: ppmw)。

	Saeseaw et al. (2014)	Karampelas et al. (2019)
Na ₂ O	2′470 - 15′600	6′300 – 19′100
MgO	1′790 - 15′700	7′100 – 24′500
Li	78 - 254	85 - 162
Sc	49 - 2′290	148 - 2′390
V	255 - 3'680	557 - 3′130
Cr	118 - 4′730	500 - 3′8 4 0
Fe	1′010 - 9′820	781 - 2′530
Rb	4 - 110	11 - 98
Cs	11 - 97	22 - 76
Cr/V	0.3 - 3.3	0.83 - 2.64

表 5.1: 阿富汗潘杰希尔祖母绿中元素含量范围 (单位: ppmw)

•

Karampelas et al. (2019) 检测的 9 颗祖母绿中,计算水的含量范围为 1.93 - 2.54 wt.%。Na₂O 含量 为低-中等(0.63 - 1.91 wt.%); MgO 含量区间为 0.71 - 2.45 wt.%; Na₂O/MgO 比值 < 1。所有碱金 属 [Li + Na + K + Rb + Cs] 含量总和范围为 0.49 - 1.60 wt.%。 这属于"低到中"级别。阿富汗 的九颗标本中,只有两颗的 Cr/V < 1, 其它标本的此比值最高可达 2.64。

图 5.3 为亚洲出产的祖母绿中的铷 vs 钴的元素相关图。这个图表中,阿富汗潘杰希尔祖母绿 所覆盖的区域与巴基斯坦斯瓦特祖母绿,以及俄罗斯乌拉尔祖母绿所覆盖的区域完全不同 (Schwarz and Klemm, 2012 - GGL)。



光谱指纹图谱 (紫外-可见-近红外吸收光谱)

阿富汗潘杰希尔祖母绿的主要吸收特征是强的[Cr³⁺]的吸收带。[V³⁺]的吸收带可能叠加在了铬 的吸收带上。光谱中铁的吸收带较弱:大约 372 nm 处的 [Fe³⁺]的吸收带非常弱; [Fe²⁺]在红区/ 近红外区域引起的吸收带通常弱到中等强度。通常来说,紫外区的吸收为中等强度;紫外吸收边缘通常处于大约 320 nm (图 5.4)。

Saeseaw et al. (2014) 提供的潘杰希尔祖母绿的紫外-可见光谱中, 常光下 372 nm 处显示一个 [Fe³⁺] 的吸收峰, 以及 810 nm 处显示 [Fe²⁺] 的中等吸收, 与 Kafubu 祖母绿类似。然而, 一些潘 杰希尔的标本中不含 [Fe³⁺], 因为它们的铁含量很低, 它们在 810 nm 处也显示吸收峰, 但比 Kafubu 标本中的要弱。

Karampelas et al. (2019) 记录的所有阿富汗祖母绿的光谱都显示了 [Cr^{3+}] 的吸收。有些研究标本 也显示了[V^{3+}] 的吸收带,且在大约 830 nm 处有相对弱的 [Fe^{2+}]相关吸收带,以及大约 370 nm 处有非常弱的[Fe^{3+}]的吸收带 (正常光下基本观察不到)。



图 5.4: 阿富汗 (潘杰希尔山谷)祖母绿典型吸收 光谱。

光学数值:折射率 (ne 和 no) 和双折射率 (Δ n)

阿富汗祖母绿的光学数值通常属于中区;在高区的情况特别少见;对比表 5.2 和 5.3。

表 5.2: 天然祖母绿光学数值的经验区间 (低区,中区,高区; Schwarz, 2001)。

	Low	Medium	high
n _e	< 1.570	1.570 - 1.580	> 1.580
no	< 1.580	1.580 - 1.590	> 1.590
Δn	< 0.006	0.006 - 0.008	> 0.008

表 5.3: 阿富汗潘杰希尔祖母绿的光学数值。

	Saeseaw et al. (2014)	Bowersox et al. (1991)
n _e	1.572 - 1.580	1.574 - 1.582
no	1.580 - 1.590	1.580 - 1.588
Δn	0.007 - 0.010	-

包裹体图集 INCLUSIONS GALLERY

Afghanistan Panjshir 阿富汗潘杰希尔



上页

AFG01:黑色不透明矿物包裹体,属性未知

AFG02:细腻的板状矿物包裹体,属性未 知;以不同方向定向排列。针状生长管状 体定向平行于祖母绿 c 轴



AFG03:黑-橙色不透明矿物集合,属性未知



AFG04:裸露到表面的外来透明寄生晶体





AFG06:沿祖母绿 c 轴定向排列的原生空洞 AFG07:细长的空洞,内含流体充填物 AFG08:细长空洞,内含多相充填物;裸露到表面的晶体包裹体 AFG09:平行 c 轴排列的多相包裹体 AFG10: 空洞团 AFG11:被困的流体包裹体,有反光



AFG12:有流体充填的原生空洞 AFG13:有多相充填物的原生空洞



有流体充填的原生空洞与流体包裹体组成的愈合裂隙图集



AFG18:不规则形状的原生空洞 AFG19&20:愈合裂隙,伴有不规则形状的空洞/流体包裹体



AFG21:原生空洞,内含有多相充填物



AFG22:细长的多相包裹体序列



大量不同长度的针状包裹体图集(有/无流体填充的生长管状体)。它们定向平行于祖母绿的 c 轴, 内含多相充填物。



细长的原生空洞序列,以生长管状体形式出现,平行于祖母绿 c 轴。