

缅甸翡翠形成时代和成因的锆石U-Pb年龄与Hf同位素制约

丘志力, 吴福元*, 杨树锋, 朱敏, 孙金凤, 杨萍

中山大学地球科学系, 广州 510275;

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

浙江大学地球科学系, 杭州 310027;

广东有色地质勘察研究院, 广州 510080

* 联系人, E-mail: wufuyuan@mail.igcas.ac.cn

2008-06-03 收稿, 2008-09-25 接受

国家自然科学基金(批准号: 40673039)和广东省科技计划(编号: 0711220600019)资助项目

摘要 缅甸翡翠(硬玉岩)以其巨大的经济价值和出露于印度-欧亚板块碰撞带附近的构造位置著称. 长期以来, 由于研究区地形复杂, 气候条件恶劣, 加上经常出现局部的军事冲突, 该地翡翠成因及其动力学意义的研究仍然较为薄弱. 利用激光等离子体质谱仪(ICP-MS)和配有激光器的多接收等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)对市场筛选收集到的一块缅甸翡翠玉器中的锆石进行了微量元素组成、U-Pb 年龄和 Hf 同位素的原位测试. 该锆石的 CL 图像显示典型的变质锆石特点, 且其内部含有硬玉和绿辉石等矿物包裹体. 对其中 16 颗锆石进行的 75 次激光原位 U-Pb 测定获得的年龄为 (158 ± 2) Ma. 尽管这些锆石的重稀土元素(HREE)明显富集, 表现出与其他类型锆石相同的特点, 但它没有明显的 Eu 异常而与其他岩浆锆石有所不同. 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 $0.282976 \sim 0.283122$, 其平均值为 (0.283066 ± 7) , 相对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $(13.8 \pm 0.3)(n=75)$. 上述新的证据显示, 缅甸宝石级翡翠主体形成于晚侏罗世, 是大洋板块俯冲情形下释放出的流体与地幔楔相互作用的产物, 与印度和欧亚板块的陆-陆碰撞无关.

关键词
Hf 同位素
U-Pb 年龄
锆石
缅甸翡翠

位于缅甸北部坎底江上游地区的缅甸翡翠(硬玉岩), 以其优良的品质著称, 是当今国际市场上优质翡翠的典型代表. 对于具有如此重要经济价值的翡翠而言, 它的成因及地球动力学意义显然是非常具有吸引力的重要研究课题^[1~3]. 特别是其成因的研究, 对在相关地区寻找类似的宝石资源具有重要的启示意义. 但长期以来, 由于该地地形复杂, 气候条件恶劣, 加上经常出现的局部军事冲突, 关于该地翡翠的直接地质观察和科学研究较为薄弱, 对其成因及其动力学过程的研究也十分有限. 目前研究的主要问题集中在其形成时代和机制两个方面^[2,4~8]. 由于翡翠定年上的困难, 目前多是通过其他间接证据推定其形成时代. 但由于区内基础地质研究程度极低, 所

认定的形成时代从前寒武纪至新生代^[5,9,10]. 关于其成因, 目前提出的观点有岩浆、变质、流体交代等不同认识, 远没有达成统一的认识^[2,4,5,8,10~12].

近年来, 有多个研究者发现缅甸翡翠中存在锆石包裹体, 为讨论它的形成时代和成因提供了重要机会^[13~16]. 特别是最近, Shi等人^[8]通过分选翡翠中的锆石获得其形成于 (146.5 ± 3.4) Ma的认识, 为缅甸翡翠成因和构造意义的研究提供了重要资料. 但由于从大样中选取的锆石成因复杂, 是否能对翡翠的形成时代提供直接约束仍值得进一步研究. 本文希望通过对新发现的一块宝石级缅甸豆青种翡翠(玉器)中众多锆石包裹体的REE, U-Pb年龄及Hf同位素的原位分析, 为缅甸翡翠的形成时代、成因机制及其形成

的地球动力学过程提供新的制约。

1 样品的来源及其产地特征

缅甸翡翠产地属于东南亚地块, 但对该地质单元的内部构造划分长期存在分歧。目前大多数学者认为, 该块体可以莫谷(Mogok)和那加山(Naga Hills)断裂划分为三大块体(图 1)^[3,17~21]。那加山断裂为印度和印缅地体的分界线, 相当于藏南的雅鲁藏布缝合带。莫谷断裂以东为掸泰(Shan-Thai)地体, 相当于我国西南境内的宝山-腾冲地体, 它又以昌宁-孟连缝合线与我国西南的思茅地体相隔。莫谷与那加山断裂所限定的范围就是缅甸翡翠所产出的中缅地块(又称东缅地块^[22]), 它大体相当于藏南的拉萨地块。印度与亚洲碰撞以后, 由于新生代期间的强烈走滑作用, 莫谷构造带的西侧发育右行走滑的实皆断裂, 该断裂向南与安达曼海的扩张脊相连^[23]。

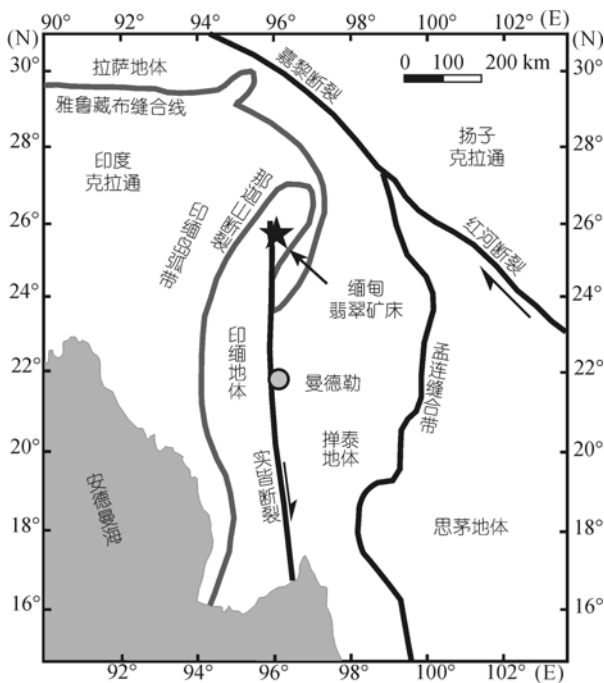


图 1 缅甸翡翠产地地质构造简图

缅甸翡翠主要产于中缅地块北部的帕敢(Hpakan)地区, 可能是实皆构造带北部的一部分^[3], 但也有学者认为是莫谷构造带的组成部分, 只是后来的构造才将其推覆至现在的位置^[21]。组成翡翠主体的硬玉岩以脉状产于蛇纹石化橄榄岩中, 后者的围岩为经历过低温高压变质的蓝片岩、云母片岩、石英岩、斜长角闪岩和大理岩等^[1,7,15,24]。

本文所研究的样品收集自国际上翡翠交易历史最悠久和著名的广州翡翠玉器集聚市场。该地区翡翠玉器主要由当地的玉石商人从缅甸或云南购回翡翠毛料, 然后在当地开料加工而成。作者在 10 倍放大镜下曾有目的地观察过上万件来自“缅甸产地”的各种质量翡翠原料及玉器成品, 并筛选出有十多件样品含有锆石包裹体。选择本样品(Jz0201)进行深入研究的原因是因为它含有数量最多的锆石, 且晶形规则完整, 可方便地进行各类研究及测试。

苹果绿色的“豆青种”“男装”马鞍型戒面分析样品(Jz0201)是缅甸翡翠中最为典型的类型, 它长 20 mm, 宽 9 mm, 厚 2 mm。经过良好抛光, 呈玻璃光泽, 折射率 1.66, 相对密度 3.33, 玉质润泽, 是标准的翡翠玉。样品具有粒状变晶结构, 硬玉矿物颗粒大小约在 0.2~1 mm 之间, 颜色相对均匀, 是品质较好的缅甸“豆青种”翡翠, 也是国际市场上最受欢迎的缅甸宝石级翡翠的主体组成^[25]。在该样品的 6 个抛光面上, 可见数十颗锆石成群分布。锆石晶形以粒状、柱状形态为主, 长宽比变化在 1~3 之间, 大多数晶形完整, 双锥及四方柱发育, 可以观察到具有多晶面结构, 大小变化在 2~0.2 mm, 可以直接在颗粒上进行各种分析。

至今为止, 尽管出产翡翠的产地有十几个国家和地区, 但缅甸仍然是世界翡翠原料的主要来源, 约占市场份额的 98%以上, 而且是世界上优质翡翠的唯一产地。同时, 缅甸宝石级的翡翠通常由单一的硬玉矿物组成(硬玉可到 98%以上), 与世界其他地区的翡翠在矿物组合标型特征上存在很大的区别^[26,27]。但为进一步验证来源, 我们对样品中主体翡翠进行了电子探针成分测定(表 1)。结果显示, 其化学成分和其他相关几个产地翡翠的成分相比, Ca、Mg和Fe含量相对较低, 和缅甸“豆青”翡翠具有相似的元素组成。因此, 研究样品虽然不是直接采自缅甸野外, 但可以判定它来自于缅甸北部的硬玉岩产区。

2 分析方法

本实验研究在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行。锆石 CL 图像在 CAMECA-SX-51 电子探针上进行, 加速电压为 10 kV。锆石微量元素、U-Pb 年龄和 Hf 同位素在 MC-ICPMS 实验室进行。该实验室配备有 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS), Agilent 7500a 型四

表 1 研究样品及国际不同产地绿色(豆青)翡翠的化学成分对比(wt%)^{a)}

	本文样品	缅甸 [28-31]	危地马拉 [28,31]	哈萨克斯坦 [32]	俄罗斯 [33,34]
分析点数	4	8	3	6	5
SiO ₂	59.12	59.29	58.39	56.69	58.70
Al ₂ O ₃	22.42	23.19	21.18	21.35	17.28
TiO ₂	0.06	0.01	0.08	0.17	0.00
Fe ₂ O ₃ *	0.68	0.73	2.55	1.21	2.42
Cr ₂ O ₃	0.05	0.10	/	0.16	0.68
MnO	0.02	0.01	0.06	0.01	0.10
MgO	1.45	1.39	1.86	2.12	3.62
CaO	2.19	1.77	2.59	2.83	5.33
Na ₂ O	13.19	13.40	12.92	13.54	11.50
K ₂ O	0.02	0.06	0.05	0.00	0.05
P ₂ O ₅	0.03	0.00	0.08	/	/
总量	99.21	99.92	99.73	98.08	99.68

a) *, 全铁; wt%为质量分数

极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICPMS)和 193 nm 激光取样系统, 这些仪器的基本情况已在相关文献中作过详细介绍 [35-37].

与其他实验不同的是, 本次研究采用的是锆石 U-Pb 年龄、微量元素与 Hf 同位素联合同时测定的分析方法. 所使用的激光剥蚀直径为 60 μm, 频率为 8 Hz, 采样方式为单点剥蚀, 并以 He 作为剥蚀物质的载气. 激光剥蚀直接在翡翠表面的锆石上进行, 剥蚀的物质通过三通管分别送入 Q-ICPMS 和 MC-ICPM. 每测定 5 个样品点测定一个锆石 91500 和一个 NIST SRM 610. 每个分析点的气体背景采集时间为 20 s, 信号采集时间为 40 s. ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷U/²³⁵U (²³⁵U = ²³⁸U/137.88), ²⁰⁸Pb/²³²Th 的比值则采用标准锆石 91500 为外部标准进行校正. 分馏校正和结果的计算采用 GLITTER 4.0 软件. 样品校正后的同位素比值误差计算中, 除了考虑样品和外标锆石 91500 同位素比值在测定过程中产生的标准偏差外, 91500 同位素比值的推荐值的标准偏差(2%)也被考虑在内. 各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver 3.0)程序. 元素浓度采用 GLITTER(ver 4.0)程序进行计算, 以 NIST SRM 610 作外标, 锆石以 Si 作为内标.

MC-ICPMS的Lu-Hf同位素分析采用Wu等人 [36] 介绍的方法与步骤. 静态信号采集模式, 背景采集时间 30 s, 积分时间为 0.131 s, 采集 200 组数据, 总计约 30 s. ¹⁷⁶Lu对 ¹⁷⁶Hf的干扰采用 ¹⁷⁵Lu/¹⁷⁶Lu=0.02655 进行校正, 并假设Lu的分馏与Hf的分馏情形相同. ¹⁷⁶Yb对 ¹⁷⁶Hf的干扰采用实测Yb的分馏系数, 并假设 ¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb=0.5887. 实际测定过程中以 91500 为外部

标准.

3 分析结果

3.1 锆石的 CL 图像特征与成因判定

在外表观察的基础上, 本文对 Jz0201 样品 6 个界面上可能存在的锆石进行了仔细的检查, 共发现有 25 颗锆石(图 2). 其中最大的锆石长约 1.2 mm (颗粒 23), 最小的仅 0.06 mm(颗粒 19), 但大部分在 0.3~0.5

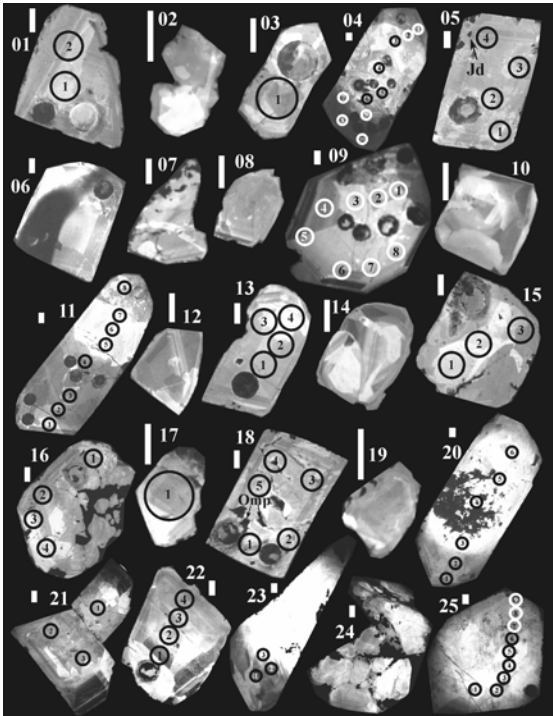


图 2 缅甸翡翠(Jz0201)中锆石的 CL 图像
锆石图中的白色线段长度为 0.05 mm, 未标记的圆形坑为前期激光分析点

mm 左右, 其长宽比大部分为 2~3.

在CL图像上(图 2), 这些锆石大多晶形完整, 并具有特征的锥面. 和大多数岩浆锆石所具有的特征性振荡环带不同, 这些锆石阴极发光程度多不均匀, 显示不规则或补丁状的内部结构. 在颗粒 5 和 18 中还分别发现有硬玉和绿辉石矿物包裹体. 这些特征都表明, 本文研究的锆石和主体硬玉具有共生关系, 属于变质热液成因 [1,38].

3.2 锆石的稀土元素成分特征

尽管我们在 Jz0201 翡翠样品中鉴定出 25 颗锆石,

但部分颗粒由于未露出样品表面而无法进行激光分析, 所分析的出露表面的 16 颗锆石的稀土元素配分型式如图 3 所示. 对单颗锆石进行的多次测定发现, 每颗锆石内部的不同区域, 其稀土元素含量有较大的变化范围, 但均表现为轻稀土(LREE)亏损、而重稀土(HREE)富集的特点(表 2). 同时值得注意的是, 这些锆石均不显示明显的 Eu 负异常, 其 Ce 的正异常和 HREE 含量也较常见的岩浆锆石明显偏低 [39,40], 但与热液锆石, 如伟晶岩中结晶的 91500 锆石, 却极为类似 [41,42].

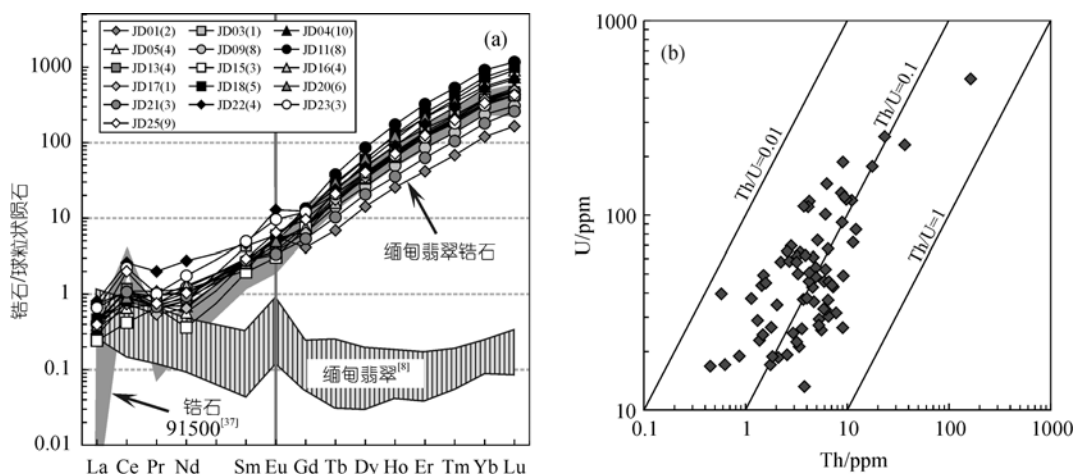


图 3 缅甸翡翠锆石的稀土元素配分型式(a)与 Th-U 含量(b)

表 2 缅甸翡翠(Jz0201)锆石的稀土元素成分(单位: ppm)

分析样品 ^{a)}	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Jz0201 01(2)	0.21	0.90	0.12	0.70	0.40	0.41	1.06	0.34	4.62	1.89	8.89	2.19	24.9	5.33
Jz0201 03(1)	0.13	0.91	0.07	0.49	0.82	0.43	3.09	1.22	15.7	6.84	32.8	7.46	78.2	15.0
Jz0201 04(10)	0.11	0.76	0.08	0.42	0.51	0.31	2.10	0.91	13.0	5.62	29.4	7.22	79.7	16.9
Jz0201 05(4)	0.11	0.54	0.08	0.34	0.52	0.27	2.03	1.12	17.5	8.17	46.4	12.0	137	29.4
Jz0201 09(8)	0.13	0.90	0.09	0.73	0.53	0.40	1.67	0.69	8.54	3.66	18.2	4.36	49.1	9.88
Jz0201 11(8)	0.09	0.65	0.07	0.49	0.46	0.40	3.47	1.85	27.9	12.8	68.7	17.1	190	37.7
Jz0201 13(4)	0.13	0.96	0.08	0.53	0.46	0.33	2.05	0.83	10.8	4.74	25.3	6.19	70.8	15.1
Jz0201 15(3)	0.08	0.34	0.08	0.22	0.37	0.22	1.93	0.86	12.3	4.94	25.3	6.14	68.4	13.9
Jz0201 16(4)	0.14	0.87	0.10	0.77	0.57	0.36	1.97	0.79	11.2	4.93	27.3	6.65	75.2	15.3
Jz0201 17(1)	0.14	0.60	0.06	0.39	0.54	0.26	1.67	0.86	11.3	5.54	27.9	6.75	77.6	15.9
Jz0201 18(5)	0.15	0.66	0.11	0.62	0.52	0.40	3.06	1.38	19.4	9.46	52.3	13.5	153	32.2
Jz0201 20(6)	0.12	0.74	0.11	0.61	0.49	0.36	3.02	1.46	20.0	9.07	45.7	11.0	116	23.7
Jz0201 21(3)	0.23	0.87	0.08	0.56	0.53	0.24	1.39	0.50	6.70	2.64	13.4	3.36	37.5	8.41
Jz0201 22(4)	0.26	2.11	0.23	1.65	0.88	0.93	3.21	1.18	15.4	6.70	37.5	9.44	109	22.2
Jz0201 23(3)	0.21	1.82	0.11	1.05	0.95	0.69	3.11	1.02	13.0	5.02	25.1	5.81	65.1	13.6
Jz0201 25(9)	0.12	1.63	0.09	0.62	0.56	0.47	2.49	1.03	13.1	5.29	26.6	6.41	69.5	13.9

a) 括号内数字代表分析次数

锆石 Th 的含量变化范围为 0.4~163 ppm (1 ppm = 1 $\mu\text{g/g}$,下同), 但绝大部分(~90%)小于 10 ppm; U 含量为 13~502 ppm, 但大多小于 100 ppm, 由此导致其 Th/U 比值的变化范围为 0.01~0.34, 其平均值为 0.10 (图 3(b)), 也显示流体存在情况下的热液成因特点。

3.3 锆石 U-Pb 同位素分析

对上述 16 颗锆石 75 个点的 U-Pb 同位素分析发现(附表 1), 它们基本都位于谐和线上(图 4(a)). 所有分析点都具有非常一致且年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其变化范围为 $(148 \pm 12) \sim (189 \pm 14)$ Ma, 平均值为 (158 ± 2) Ma(图 4(b)). 对比发现, 锆石的 U-Pb 年龄与 Th/U 比值之间并不存在明显的相关性, 反映这些锆石可能是在同一介质中形成的。

3.4 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素的分析结果如附表 2 所示. 所有

被分析的锆石具有相对均一的 Hf 同位素组成, 其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.00004~0.00107, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.282976~0.283122. 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的平均值为 (0.283066 ± 7) (图 5(a)), 相对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 (13.8 ± 0.3) ($n=75$)(图 5(b)). 同 U-Pb 年龄类似, 锆石的 Hf 同位素组成与 Th/U 比值之间不存在任何相关性(图 5(b)).

4 讨论

4.1 缅甸翡翠的形成时代

缅甸翡翠由于位于印度与亚洲的碰撞部位, 且矿区发育高压变质岩系, 因而人们大多怀疑它的形成可能与印度与亚洲的碰撞有关 [3,9]. 但真正能约束该矿床形成时代的资料极为有限. 前已述及, 本文分析的翡翠玉器中的锆石晶形完整, CL 图像显示它们大多具有复杂的不规则内部结构, 显示其变质成因

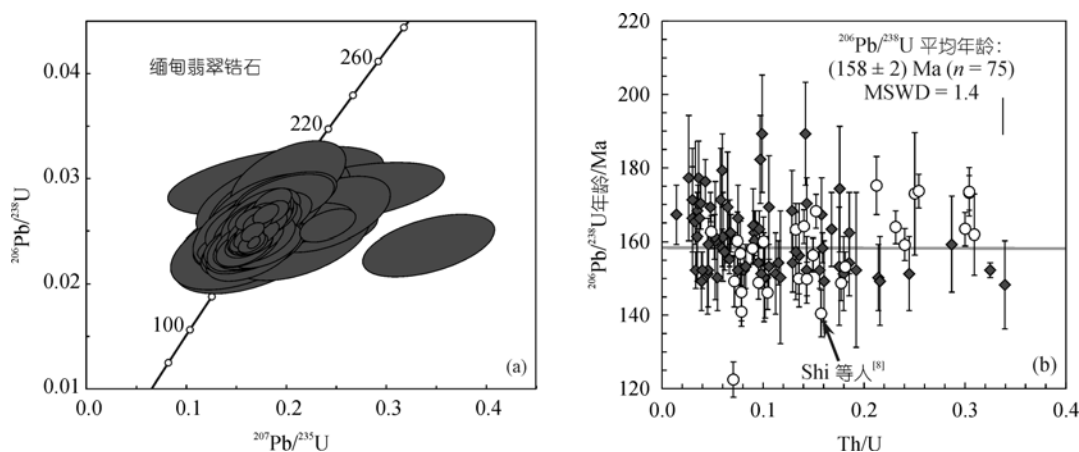


图 4 缅甸翡翠锆石的 U-Pb 年龄图

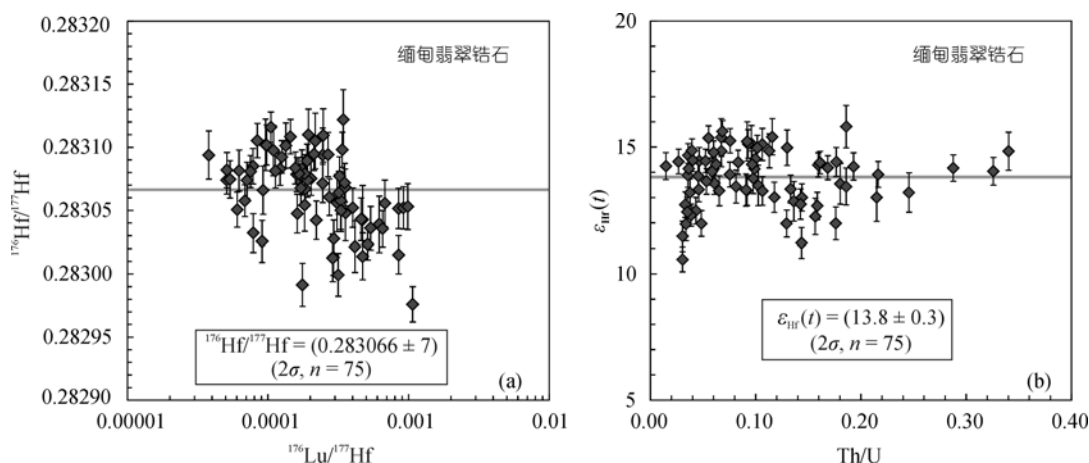


图 5 缅甸翡翠锆石的 Lu-Hf 同位素特征

的特点。同时, 锆石中所含的硬玉及绿辉石矿物包裹体也表明锆石是在硬玉形成的同时结晶的。因此, 我们认为缅甸宝石级翡翠主体形成于晚侏罗世的(158 ± 2) Ma 左右(图 4)。

Shi等人 [8]运用SHRIMP技术在缅甸翡翠(硬玉岩)中鉴定出三组不同年龄的锆石, 其中第一组锆石(Group-)含有无Na富Mg的包裹体和具有典型的振荡生长环带, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(163.2 ± 3.3) Ma, 被认为是与硬玉密切相关的超基性岩或蛇纹石化的形成时代。第二组锆石(Group-)主要围绕第一组锆石生长, 没有生长环带和具有比较低的Th/U比值, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(146.5 ± 3.4) Ma, 该年龄被解释为硬玉岩的变质年龄, 即缅甸翡翠的形成年龄。第三组锆石(Group-)具有最低的Th/U比值, 可以切穿前面两组锆石生长, 单点分析给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(122.2 ± 4.8) Ma, 代表了硬玉形成后的一次热事件。但本文分析的结果与之有所不同。首先, 尽管本文所分析的锆石也具有一定的年龄变化, 但没有出现 122 Ma左右的年龄。仔细检查Shi等人 [8]的分析点, 该锆石显示流体渗透的特点, 与本文研究的锆石颗粒 15 中 1 和 2 分析点的情况类似, 但本分析给出的上述两点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为(162 ± 9)和(167 ± 8) Ma, 与其他分析点获得的年龄一致。第二, 本研究中的锆石基本未发现有明显的振荡环带, 也没发现锆石的U-Pb年龄与Th/U比值之间存在相关性(图 4)。考虑超镁铁岩锆的含量较低而难以有锆石的晶出, 我们倾向于认为, Shi等人 [8]文中的所有锆石都是在流体存在情况下交代成因的, 因为少量的振荡环带在热液锆石中也是经常见及的 [43,44]。如果将Shi等人 [8]中除(122.2 ± 4.8) Ma的所有锆石进行加权平均的话, 其获得的年龄为(157 ± 4) Ma, 与本文(158 ± 2) Ma的年龄结果完全一致。由于本文研究样品是市场上收集的较好的豆青种翡翠, 在品质上属于缅甸翡翠中最典型的宝石级玉石, 因而在翡翠的锆石样品上直接获得的(158 ± 2) Ma 的年龄应该更可靠地代表了缅甸宝石级翡翠主体的形成时代。

上述年龄为讨论缅甸翡翠形成的地球动力学背景提供了重要约束。根据目前的资料总结 [45], 印度与亚洲的碰撞大约发生在 55 Ma 左右, 这就从根本上限定出, 它的形成与印度和亚洲板块碰撞无关。

4.2 缅甸翡翠成因的锆石 Hf 同位素制约

硬玉一般被视为低温高压变质的特征矿物, 尽管

近年来对世界不同产地硬玉岩产出条件的研究显示, 硬玉稳定的温压条件变化范围较大, 但绝大部分硬玉的形成仍与高压环境关系密切 [27]。但从另一方面来看, 硬玉岩经常出现的脉状产状, 及硬玉岩富含轻稀土(LREE)和大离子亲石元素Li, Ba, Sr和亏损高场强元素(HFSE)等特征, 显示出它的形成和流体关系密切。但对这种流体的性质, 目前并没有明确的认识 [2,26,46,47]。

锆石是最重要的Hf元素寄主矿物, 岩浆岩中锆石的Hf同位素组成可对岩浆的源区提供很好的制约 [48]。但对变质或热液锆石而言, Hf同位素组成的意义取决于锆石形成的具体机制 [49]。本文分析的锆石晶形完整, 属于典型的流体交代而成的变质热液锆石, 显然所获得的Hf同位素组成可反映流体的性质。首先, 本研究锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 平均值为(0.283066 ± 7), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为(13.8 ± 0.3), 与亏损地幔或者年轻洋壳的Hf同位素特征基本一致。第二, 锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值(0.00004~0.00107)明显高于含石榴石岩石样品中锆石的比值, 反映流体在析出过程中不存在石榴石残留。考虑到缅甸翡翠矿体主要呈构造透镜体、不规则块状、脉状分布在强烈蛇纹石化的超基性岩中, 翡翠存在复杂的生长结构, 并结合近几年来获得的流体包裹体、微量元素及氧同位素证据, 我们认为, 该流体应该是洋壳俯冲过程中脱水形成的, 或者说洋壳俯冲可能是缅甸翡翠形成非常重要的地球动力学背景。

从区域地质情况来看, 缅甸翡翠位于东侧莫谷和西侧那加山构造带所限制的中缅地块范围内, 它的围岩为蛇纹石化橄榄岩, 推测为蛇绿岩的组成部分, 但它形成的真正地球动力学意义并不明朗。根据目前的研究成果 [3,18], 莫谷带中至目前为止还未发现有蛇绿岩存在的迹象 [3], 只发现在个别岩石的内部存在中侏罗世(~170 Ma)岩浆作用的痕迹 [18], 组成该带的岩石和变形主要发生在新生代 [3,18]。因此, 缅甸翡翠的形成与莫谷带无关。

但是, 在莫谷带以北的Kath-Gangaw 山脉地带却存在大量的晚三叠世的复理石、侏罗纪的蛇绿岩与硅质岩等 [21], 这些岩石还可连续追索到缅甸翡翠所在区域西侧的那加山一带, 沿印缅山脉的东侧一直向南分布, 其上不整合覆盖有大面积的晚白垩世-古近纪的海相沉积。目前认为, 该构造带可能是雅鲁藏布构造带的南延所在 [3,21], 它在越过印缅岛弧带向东拐弯后沿莫谷带北侧分布, 只是由于后来的构造作

用才形成目前复杂的分布格局(图 1). 由于露头有限, 目前对该带地质演化历史的认识存在较大分歧^[20,21], 有限的讨论基本集中在新生代地质演化上, 而对早期的地质历史知之甚少. 而本文的研究发现, 该构造至少从 158 Ma 开始就已发育大洋俯冲作用, 这也和目前在藏南冈底斯地区发现侏罗纪岩浆作用的观察一致^[50,51], 从而表明印度与亚洲之间新特提斯洋的俯冲历史远比我们以前认识的要早.

5 结论

() 本文对市场收集到的一块优质翡翠玉器中锆石的研究表明, 缅甸宝石级翡翠主体形成于晚侏罗纪, 年龄为 (158 ± 2) Ma, 其形成与新生代的印度与欧亚板块的陆-陆碰撞无关;

() 缅甸宝石级翡翠主体为流体存在情况下的热液交代产物, 与大洋板块俯冲过程中的脱水流体有关.

参考文献

- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures. In: Hanchar J M, Hoskin P W O, eds. *Zircon. Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 468—500
- Sorensen S, Harlow G E, Rumble D III. The origin of jadeitite-forming subduction-zone fluids: CL-guided SIMS oxygen-isotope and trace-element evidence. *Am Mineral*, 2006, 91: 979—996[doi]
- Searle M P, Noble S R, Cottle J M, et al. Tectonic evolution of the Mogok metamorphic belt, Burma (Myanmar) constrained by U-Th-Pb dating of metamorphic and magmatic rocks. *Tectonics*, 2007, 26: TC3014 [doi]
- 崔文元, 施光海, 杨富绪, 等. 一种新观点——翡翠新的岩浆成因说. *宝石和宝石学杂志*, 2000, 3: 16—22
- 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷. 缅甸翡翠原生矿床成因机制新探. *上海地质*, 2005, 1: 58—61
- Harlow G E, Sorensen S S. Jade: Occurrence and metasomatic origin. *Aust Gem*, 2001, 21: 7—10
- Shi G H, Cui W Y, Tropper P, et al. The petrology of a complex sodic and sodic-calcic amphibole association and its implications for the metasomatic processes in the jadeitite area in northwestern Myanmar, formerly Burma. *Contrib Mineral Petrol*, 2003, 145: 355—376[doi]
- Shi G H, Cui W Y, Cao S M, et al. Ion microprobe zircon U-Pb age and geochemistry of the Myanmar jadeitite. *J Geol Soc London*, 2008, 165: 221—234[doi]
- Goffe B, Rangin C, Maluski H. Jade and associated rocks from the jade Mines area, Northern Myanmar as record of a polyphased high pressure metamorphism. *J Asian Earth Sci*, 2002, 20(Supp): 16—17
- 张位及. 缅甸北部帕敢地区翡翠矿床地质. *云南地质*, 2002, 21: 378—390
- 于波. 缅甸原生翡翠成因研究发展与思考. *珠宝科技*, 2003, 15(5): 31—34
- 张良钊. 缅甸纳莫原生翡翠矿体特征与成因研究. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23: 49—53
- 丘志力, 陈炳辉. 翡翠中的包体及其对鉴定 A、B、C 货的意义. *中国宝玉石*, 1996, 1: 56—57
- 丘志力. 宝石学包裹体概念及玉石包体分类. *中山大学学报(自然科学版)*, 1998, 增刊 1: 104—108
- 彭卓伦, 彭明生. 缅甸硬玉中的包裹体. *中山大学学报(自然科学版)*, 2004, 4: 98—101
- 施光海, 崔文元. 缅甸含硬玉的蛇纹石化橄榄岩及其围岩的岩石学研究. *岩石学报*, 2001, 17: 482—490
- 摩太. 帕岗地区硬玉矿床地质特征剖析. 见: 吴瑞华, 主编. *缅甸翡翠研究最新成果*. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003. 22—28
- Barley M E, Pickard A L, Khin Z, et al. Jurassic to Miocene magmatism and metamorphism in the Mogok metamorphic belt and the India-Eurasian collision in Myanmar. *Tectonics*, 2003, 22: 1019—1029[doi]
- Morley C K. Nested strike-slip duplexes, and other evidence for Late Cretaceous-Palaeogene transpressional tectonics before and during India-Eurasia collision, in Thailand, Myanmar and Malaysia. *J Geol Soc London*, 2004, 161: 799—812[doi]
- Acharyya S K. Collisional emplacement history of the Naga-Andaman ophiolites and the position of the eastern Indian suture. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29: 229—242[doi]
- Mitchell A H G, Htay M T, Htun K M, et al. Rock relationships in the Mogok metamorphic belt, Tatkon to Mandalay, Central Myanmar. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29: 891—910[doi]
- 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1998. 231
- Curray J R. Tectonic and history of the Andaman sea region. *J Asian Earth Sci*, 2005, 25: 187—232[doi]
- 李平, 崔文元. 一个翡翠新品种的发现. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(2): 241—246
- Htein W, Naing A M. Mineral and chemical composition of jade of Myanmar. *J Gem*, 1994, 24: 269—276
- 施光海, 崔文元, 王长秋, 等. 缅甸帕敢地区硬玉岩中的流体包裹体. *科学通报*, 2000, 45(17): 1896—1900

- 27 Harlow G E, Sorensen S S. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: Metasomatic connections. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 113—146[[doi](#)]
- 28 奥岩, 陈进. 缅甸各种颜色翡翠化学成分分析. *珠宝科技*, 1997, 4: 37—40
- 29 黄凤鸣, 古清慧, 邹严寒. 翡翠的成分和结构特征及其与种或地的关系. *宝石和宝石学杂志*, 2000, 2(1): 7—14
- 30 谢星, 王瑄荣, 王崇礼. 浅析缅甸翡翠的颜色. *西安工程学院学报*, 2000, 22(4): 40—45
- 31 袁心强. 翡翠宝石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003
- 32 狄敬如, 吕福德, 周守云, 等. 哈萨克斯坦翡翠成分特征及成因初步研究. *珠宝科技*, 2000, 2: 38—39
- 33 陈克樵, 马春学, 栗日坚. 翡翠的物质组分结构构造特征与成因关系. *云南地质*, 1998, 17(3-4): 350—355
- 34 欧阳秋眉, 曲懿华. 俄罗斯西萨彦岭翡翠矿床特征. *宝石和宝石学杂志*, 1999, 1(2): 5—11
- 35 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素. *科学通报*, 2004, 49(14): 1403—1410
- 36 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2006, 234: 105—126[[doi](#)]
- 37 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 等. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. *科学通报*, 2008, 53(2): 220—228
- 38 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 2004, 49: 1589—1604
- 39 Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143: 602—622
- 40 Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher J M, Hoskin P W O, eds. *Zircon. Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 27—62[[doi](#)]
- 41 Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69: 637—648[[doi](#)]
- 42 Pellerer E, Cheilletz A, Gasquet D, et al. Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit-Morocco). *Chem Geol*, 2007, 245: 135—161[[doi](#)]
- 43 Dubínska E, Bylina P, Kozłowski A, et al. U-Pb dating of serpentinitization: Hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland). *Chem Geol*, 2004, 203: 183—203[[doi](#)]
- 44 Pettke T, Audétat A, Schaltegger U, et al. Magmatic to hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized Mole Granite (NSW, Australia): Part II: Evolving zircon and thorite trace element chemistry. *Chem Geol*, 2005, 220: 191—213[[doi](#)]
- 45 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 等. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升. *岩石学报*, 2008, 24: 1—30
- 46 Sorensen S S, Barton M D. Metasomatism and partial melting in a subduction complex: Catalina schist, southern California. *Geology*, 1987, 15: 115—118 [[doi](#)]
- 47 Morishita T A, Arai S, Ishida Y. Trace element compositions of jadeite (+ omphacite) in jadeitites from the Itoigawa-Ohmi district, Japan: Implications for fluid processes in subduction zones. *Island Arc*, 2007, 16: 40—56[[doi](#)]
- 48 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其在岩石学应用. *岩石学报*, 2007, 23: 185—220
- 49 Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, et al. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 240: 378—400[[doi](#)]
- 50 Chu M F, Chung S L, Song B, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of Southern Tibet. *Geology*, 2006, 34: 745—748[[doi](#)]
- 51 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. *岩石学报*, 2007, 23: 1347—1353

附表 1 缅甸翡翠(Jz0201)锆石的 U-Pb 同位素成分

样品编号	Th/ ppm	U/ ppm	Th/U	同位素比率								同位素年龄/Ma							
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
Jz0201 01-1	1.4	22.8	0.06	0.0511	0.0092	0.1979	0.0341	0.0281	0.0016	0.0131	0.0073	244	275	183	29	179	10	263	145
Jz0201 01-2	3.7	37.1	0.10	0.0490	0.0100	0.2010	0.0380	0.0298	0.0025	0.0083	0.0042	146	254	186	32	189	16	166	85
Jz0201 03-1	12	84.5	0.14	0.0489	0.0052	0.1801	0.0176	0.0267	0.0012	0.0049	0.0013	144	138	168	15	170	7	98	26
Jz0201 04-1	6.5	67.3	0.10	0.0484	0.0038	0.1605	0.0117	0.0241	0.0008	0.0065	0.0013	117	105	151	10	154	5	131	26
Jz0201 04-2	2.1	18.6	0.11	0.0481	0.0082	0.1570	0.0243	0.0237	0.0017	0.0136	0.0039	105	213	148	21	151	11	273	78
Jz0201 04-3	1.3	28.9	0.05	0.0507	0.0084	0.1659	0.0248	0.0238	0.0017	0.0102	0.0071	228	207	156	22	151	11	205	141
Jz0201 04-4	11	72.6	0.16	0.0504	0.0040	0.1657	0.0121	0.0239	0.0008	0.0074	0.0012	213	107	156	11	152	5	149	24
Jz0201 04-5	7.8	31.6	0.25	0.0506	0.0082	0.1653	0.0245	0.0237	0.0016	0.0060	0.0018	223	210	155	21	151	10	121	36
Jz0201 04-6	9.0	26.5	0.34	0.0519	0.0106	0.1656	0.0309	0.0232	0.0020	0.0048	0.0017	282	262	156	27	148	12	97	33
Jz0201 04-7	6.1	52.8	0.12	0.0488	0.0048	0.1628	0.0149	0.0242	0.0009	0.0096	0.0017	137	134	153	13	154	6	193	33
Jz0201 04-8	8.7	130	0.07	0.0482	0.0032	0.1617	0.0099	0.0244	0.0007	0.0119	0.0018	109	86	152	9	155	4	239	36
Jz0201 04-9	4.6	42.8	0.11	0.0491	0.0052	0.1622	0.0159	0.0240	0.0010	0.0078	0.0024	154	142	153	14	153	6	157	49
Jz0201 04-10	4.7	36.1	0.13	0.0489	0.0071	0.1628	0.0222	0.0242	0.0012	0.0089	0.0022	143	211	153	19	154	8	179	43
Jz0201 05-1	1.8	17.1	0.10	0.0506	0.0106	0.1641	0.0324	0.0235	0.0017	0.0114	0.0033	224	291	154	28	150	11	230	67
Jz0201 05-2	3.6	26.2	0.14	0.0493	0.0125	0.1665	0.0398	0.0245	0.0022	0.0069	0.0036	163	310	156	35	156	14	139	72
Jz0201 05-3	6.5	30.3	0.21	0.0549	0.0080	0.1782	0.0240	0.0236	0.0014	0.0082	0.0017	407	194	166	21	150	9	165	34
Jz0201 05-4	5.3	29.3	0.18	0.0507	0.0088	0.1652	0.0264	0.0236	0.0016	0.0072	0.0022	228	234	155	23	151	10	145	45
Jz0201 09-1	2.0	34.8	0.06	0.0489	0.0113	0.1813	0.0391	0.0270	0.0023	0.0148	0.0073	143	289	169	34	171	14	297	146
Jz0201 09-2	4.0	114	0.04	0.0476	0.0031	0.1733	0.0105	0.0265	0.0008	0.0127	0.0024	78	84	162	9	168	5	254	47
Jz0201 09-3	0.9	18.9	0.05	0.0480	0.0086	0.1570	0.0264	0.0238	0.0015	0.0166	0.0087	98	241	148	23	152	10	332	172
Jz0201 09-4	4.2	118	0.04	0.0504	0.0032	0.1852	0.0108	0.0267	0.0008	0.0105	0.0026	215	82	173	9	170	5	211	52
Jz0201 09-5	0.6	17.1	0.04	0.0514	0.0091	0.1972	0.0331	0.0279	0.0017	0.0168	0.0128	260	265	183	28	177	10	337	254
Jz0201 09-6	1.5	24.4	0.06	0.0494	0.0094	0.1723	0.0305	0.0253	0.0019	0.0074	0.0051	168	252	161	26	161	12	149	102
Jz0201 09-7	0.4	16.8	0.03	0.0486	0.0140	0.1862	0.0508	0.0278	0.0028	0.0103	0.0250	129	343	173	43	177	17	208	501
Jz0201 09-8	37	230	0.16	0.0484	0.0024	0.1657	0.0076	0.0249	0.0006	0.0079	0.0007	119	65	156	7	158	4	159	14
Jz0201 11-1	3.4	21.2	0.16	0.0494	0.0092	0.1776	0.0312	0.0262	0.0017	0.0087	0.0028	165	258	166	27	167	10	174	56
Jz0201 11-2	6.3	145	0.04	0.0489	0.0036	0.1856	0.0126	0.0276	0.0009	0.0229	0.0036	141	94	173	11	176	6	457	71
Jz0201 11-3	9.0	187	0.05	0.0490	0.0025	0.1790	0.0085	0.0266	0.0006	0.0087	0.0017	147	67	167	7	169	4	175	33
Jz0201 11-4	5.9	45.8	0.13	0.0484	0.0076	0.1753	0.0252	0.0263	0.0018	0.0118	0.0030	118	199	164	22	168	11	237	61
Jz0201 11-5	4.0	37.6	0.11	0.0494	0.0093	0.1808	0.0311	0.0266	0.0022	0.0130	0.0048	166	236	169	27	169	14	261	96
Jz0201 11-6	1.1	37.4	0.03	0.0495	0.0104	0.1770	0.0343	0.0260	0.0022	0.0062	0.0069	170	259	165	30	166	14	126	138
Jz0201 11-7	1.4	43.7	0.03	0.0503	0.0050	0.1796	0.0164	0.0260	0.0010	0.0097	0.0045	208	135	168	14	165	6	196	89
Jz0201 11-8	2.2	57.6	0.04	0.0493	0.0044	0.1813	0.0148	0.0268	0.0011	0.0077	0.0034	160	113	169	13	170	7	155	68
Jz0201 13-1	3.3	50.2	0.07	0.0657	0.0126	0.2409	0.0412	0.0266	0.0024	0.0684	0.0148	798	214	219	34	169	15	1337	279
Jz0201 13-2	3.4	64.5	0.05	0.0466	0.0114	0.1615	0.0365	0.0251	0.0025	0.0041	0.0049	30	265	152	32	160	16	82	99
Jz0201 13-3	2.7	58.1	0.05	0.0481	0.0051	0.1654	0.0162	0.0249	0.0012	0.0086	0.0039	103	133	155	14	159	7	173	79
Jz0201 13-4	11	119	0.09	0.0481	0.0030	0.1713	0.0099	0.0258	0.0007	0.0084	0.0013	102	82	161	9	164	4	169	26
Jz0201 15-1	1.8	26.6	0.07	0.0583	0.0118	0.2053	0.0399	0.0255	0.0014	0.0079	0.0021	542	423	190	34	162	9	159	43
Jz0201 15-2	0.6	39.6	0.01	0.0481	0.0063	0.1739	0.0215	0.0262	0.0012	0.0389	0.0131	105	190	163	19	167	8	771	255
Jz0201 15-3	4.1	110	0.04	0.0457	0.0032	0.1646	0.0107	0.0261	0.0007	0.0080	0.0027	-18	88	155	9	166	5	160	53
Jz0201 16-1	6.6	45.7	0.14	0.0507	0.0116	0.1670	0.0370	0.0239	0.0014	0.0075	0.0026	227	415	157	32	152	9	152	52
Jz0201 16-2	6.5	36.8	0.18	0.0643	0.0152	0.2136	0.0455	0.0241	0.0025	0.0161	0.0047	753	283	197	38	153	16	323	93
Jz0201 16-3	1.5	49.2	0.03	0.0504	0.0099	0.1873	0.0337	0.0270	0.0022	0.0537	0.0190	213	250	174	29	171	14	1057	365
Jz0201 16-4	1.6	45.1	0.04	0.0483	0.0087	0.1686	0.0279	0.0253	0.0018	0.0192	0.0102	116	231	158	24	161	12	384	201
Jz0201 17-1	6.1	32.9	0.19	0.0461	0.0089	0.1620	0.0290	0.0255	0.0018	0.0128	0.0049		329	152	25	162	11	257	97
Jz0201 18-1	3.2	22.4	0.14	0.0461	0.0177	0.1887	0.0712	0.0297	0.0022	0.0100	0.0080		628	176	61	189	14	200	160
Jz0201 18-2	2.9	24.9	0.12	0.0490	0.0163	0.1592	0.0497	0.0236	0.0028	0.0303	0.0091	147	379	150	44	150	18	604	179
Jz0201 18-3	1.8	18.8	0.10	0.0668	0.0164	0.2632	0.0620	0.0286	0.0019	0.0087	0.0016	832	520	237	50	182	12	175	33
Jz0201 18-4	2.6	19.2	0.13	0.0595	0.0181	0.2017	0.0589	0.0246	0.0020	0.0076	0.0027	584	590	187	50	157	13	153	54
Jz0201 18-5	4.2	45.9	0.09	0.0684	0.0059	0.2405	0.0184	0.0255	0.0010	0.0118	0.0030	882	93	219	15	162	6	237	59
Jz0201 20-1	5.9	33.1	0.18	0.0498	0.0126	0.1881	0.0444	0.0274	0.0026	0.0123	0.0041	183	312	175	38	174	17	248	82

附表 1(续)

样品编号	Th/ ppm	U/ ppm	Th/U	同位素比率								同位素年龄/Ma							
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
Jz0201 20-2	3.8	13.2	0.29	0.0484	0.0121	0.1666	0.0392	0.0250	0.0021	0.0080	0.0023	118	304	156	34	159	13	161	45
Jz0201 20-3	3.7	111	0.03	0.0494	0.0041	0.1627	0.0124	0.0239	0.0008	0.0120	0.0037	164	111	153	11	152	5	242	74
Jz0201 20-4	4.9	54.0	0.09	0.0475	0.0069	0.1684	0.0226	0.0257	0.0015	0.0107	0.0033	72	189	158	20	164	10	215	66
Jz0201 20-5	9.8	120	0.08	0.0512	0.0038	0.1686	0.0116	0.0239	0.0008	0.0076	0.0015	249	101	158	10	152	5	154	30
Jz0201 20-6	9.1	48.9	0.19	0.0518	0.0076	0.1728	0.0234	0.0242	0.0015	0.0136	0.0026	277	193	162	20	154	9	273	52
Jz0201 21-1	4.6	61.0	0.08	0.0492	0.0064	0.1776	0.0212	0.0261	0.0014	0.0087	0.0029	158	173	166	18	166	9	175	58
Jz0201 21-2	6.1	101	0.06	0.0512	0.0035	0.1751	0.0111	0.0248	0.0007	0.0131	0.0023	248	91	164	10	158	5	263	46
Jz0201 21-3	3.2	61.6	0.05	0.0488	0.0043	0.1708	0.0139	0.0253	0.0009	0.0128	0.0032	139	119	160	12	161	6	257	64
Jz0201 22-1	7.3	43.0	0.17	0.0499	0.0077	0.1763	0.0252	0.0256	0.0015	0.0061	0.0017	191	211	165	22	163	10	123	34
Jz0201 22-2	5.6	25.8	0.22	0.0513	0.0113	0.1659	0.0343	0.0234	0.0019	0.0140	0.0030	256	295	156	30	149	12	281	60
Jz0201 22-3	5.3	27.3	0.19	0.0513	0.0181	0.1697	0.0556	0.0239	0.0033	0.0073	0.0048	255	399	159	48	152	21	146	97
Jz0201 22-4	4.9	48.4	0.10	0.1048	0.0157	0.3416	0.0434	0.0236	0.0020	0.1040	0.0133	1711	120	298	33	150	12	2000	243
Jz0201 23-1	5.1	74.5	0.07	0.0504	0.0042	0.1770	0.0139	0.0254	0.0009	0.0124	0.0024	213	117	166	12	162	5	249	47
Jz0201 23-2	23	254	0.09	0.0480	0.0036	0.1662	0.0113	0.0251	0.0008	0.0105	0.0016	98	95	156	10	160	5	211	31
Jz0201 23-3	18	178	0.10	0.0510	0.0030	0.1671	0.0091	0.0237	0.0006	0.0097	0.0012	239	77	157	8	151	4	196	25
Jz0201 25-1	163	502	0.33	0.0505	0.0014	0.1667	0.0042	0.0239	0.0004	0.0080	0.0003	220	31	157	4	152	2	160	5
Jz0201 25-2	8.9	92.0	0.10	0.0513	0.0038	0.1812	0.0123	0.0256	0.0008	0.0070	0.0014	255	99	169	11	163	5	141	29
Jz0201 25-3	9.4	124	0.08	0.0500	0.0030	0.1646	0.0090	0.0239	0.0006	0.0091	0.0014	193	78	155	8	152	4	183	27
Jz0201 25-4	7.1	43.9	0.16	0.0489	0.0087	0.1580	0.0259	0.0234	0.0017	0.0062	0.0023	142	233	149	23	149	11	125	45
Jz0201 25-5	4.2	50.8	0.08	0.0491	0.0044	0.1627	0.0135	0.0240	0.0009	0.0093	0.0021	154	120	153	12	153	6	186	42
Jz0201 25-6	3.9	62.3	0.06	0.0490	0.0044	0.1672	0.0138	0.0247	0.0009	0.0093	0.0024	147	122	157	12	157	5	188	48
Jz0201 25-7	3.2	57.6	0.06	0.0489	0.0072	0.1595	0.0217	0.0236	0.0014	0.0114	0.0045	144	198	150	19	150	9	229	90
Jz0201 25-8	2.8	69.6	0.04	0.0497	0.0042	0.1643	0.0128	0.0239	0.0009	0.0108	0.0034	182	112	154	11	152	5	216	69
Jz0201 25-9	2.6	65.3	0.04	0.0486	0.0063	0.1573	0.0187	0.0234	0.0012	0.0110	0.0046	129	170	148	16	149	8	222	92

附表 2 缅甸翡翠(Jz0201)锆石的 Lu-Hf 同位素成分

样品编号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
Jz0201 01-1	0.001416	0.000071	0.283074	0.000014	10.67	14.14	0.51	246	- 1.00
Jz0201 01-2	0.001605	0.000078	0.283085	0.000014	11.07	14.53	0.50	230	- 1.00
Jz0201 03-1	0.004954	0.000220	0.283042	0.000015	9.56	13.01	0.54	291	- 0.99
Jz0201 04-1	0.001799	0.000096	0.283102	0.000020	11.67	15.13	0.72	207	- 1.00
Jz0201 04-2	0.000780	0.000038	0.283094	0.000019	11.38	14.85	0.67	218	- 1.00
Jz0201 04-3	0.001945	0.000092	0.283066	0.000019	10.39	13.86	0.67	257	- 1.00
Jz0201 04-4	0.008932	0.000415	0.283022	0.000020	8.82	12.25	0.72	321	- 0.99
Jz0201 04-5	0.008024	0.000356	0.283048	0.000022	9.76	13.20	0.78	284	- 0.99
Jz0201 04-6	0.005236	0.000245	0.283094	0.000021	11.38	14.83	0.75	219	- 0.99
Jz0201 04-7	0.004020	0.000194	0.283110	0.000020	11.95	15.41	0.72	196	- 0.99
Jz0201 04-8	0.005156	0.000247	0.283109	0.000021	11.93	15.38	0.75	197	- 0.99
Jz0201 04-9	0.002741	0.000134	0.283101	0.000018	11.65	15.11	0.63	208	- 1.00
Jz0201 04-10	0.002147	0.000109	0.283098	0.000020	11.51	14.97	0.70	213	- 1.00
Jz0201 05-1	0.006303	0.000310	0.283056	0.000023	10.04	13.48	0.80	272	- 0.99
Jz0201 05-2	0.012706	0.000619	0.283039	0.000022	9.45	12.85	0.79	298	- 0.98
Jz0201 05-3	0.009640	0.000472	0.283043	0.000027	9.58	13.00	0.94	292	- 0.99
Jz0201 05-4	0.006727	0.000329	0.283058	0.000023	10.10	13.54	0.81	270	- 0.99
Jz0201 09-1	0.005020	0.000245	0.283071	0.000015	10.59	14.03	0.54	250	- 0.99
Jz0201 09-2	0.004164	0.000185	0.283067	0.000013	10.43	13.89	0.47	256	- 0.99
Jz0201 09-3	0.001312	0.000060	0.283051	0.000014	9.85	13.32	0.49	278	- 1.00
Jz0201 09-4	0.004252	0.000190	0.283089	0.000013	11.22	14.67	0.47	225	- 0.99
Jz0201 09-5	0.001135	0.000051	0.283074	0.000011	10.68	14.15	0.39	245	- 1.00
Jz0201 09-6	0.001527	0.000068	0.283058	0.000013	10.10	13.57	0.44	268	- 1.00
Jz0201 09-7	0.001104	0.000051	0.283082	0.000014	10.96	14.43	0.49	234	- 1.00

附表 2(续)

样品编号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
Jz0201 09-8	0.003710	0.000160	0.283078	0.000014	10.84	14.29	0.48	240	- 1.00
Jz0201 11-1	0.001741	0.000079	0.283032	0.000015	9.20	12.67	0.54	303	- 1.00
Jz0201 11-2	0.006937	0.000294	0.283028	0.000015	9.04	12.48	0.52	312	- 0.99
Jz0201 11-3	0.007121	0.000291	0.283013	0.000014	8.54	11.98	0.51	332	- 0.99
Jz0201 11-4	0.018134	0.000851	0.283015	0.000015	8.60	11.98	0.53	334	- 0.97
Jz0201 11-5	0.018093	0.000851	0.283051	0.000016	9.88	13.27	0.56	282	- 0.97
Jz0201 11-6	0.022990	0.001069	0.282976	0.000014	7.21	10.57	0.49	392	- 0.97
Jz0201 11-7	0.014271	0.000654	0.283036	0.000014	9.32	12.73	0.51	303	- 0.98
Jz0201 11-8	0.011196	0.000512	0.283023	0.000012	8.89	12.31	0.44	319	- 0.98
Jz0201 13-1	0.006678	0.000331	0.283050	0.000017	9.83	13.27	0.59	281	- 0.99
Jz0201 13-2	0.005538	0.000273	0.283060	0.000014	10.20	13.64	0.51	266	- 0.99
Jz0201 13-3	0.003526	0.000174	0.283083	0.000015	11.00	14.45	0.53	233	- 0.99
Jz0201 13-4	0.001996	0.000098	0.283102	0.000016	11.66	15.13	0.56	207	- 1.00
Jz0201 15-1	0.005311	0.000267	0.283094	0.000018	11.40	14.84	0.62	218	- 0.99
Jz0201 15-2	0.003685	0.000176	0.283077	0.000015	10.79	14.25	0.53	242	- 0.99
Jz0201 15-3	0.003668	0.000161	0.283047	0.000015	9.74	13.20	0.54	283	- 1.00
Jz0201 16-1	0.003940	0.000176	0.282991	0.000017	7.76	11.21	0.60	361	- 0.99
Jz0201 16-2	0.009898	0.000472	0.283014	0.000018	8.55	11.98	0.65	332	- 0.99
Jz0201 16-3	0.006528	0.000316	0.282999	0.000017	8.04	11.48	0.60	351	- 0.99
Jz0201 16-4	0.002038	0.000091	0.283026	0.000016	8.97	12.43	0.58	313	- 1.00
Jz0201 17-1	0.007131	0.000343	0.283122	0.000024	12.37	15.81	0.84	180	- 0.99
Jz0201 18-1	0.011280	0.000537	0.283036	0.000017	9.34	12.75	0.61	302	- 0.98
Jz0201 18-2	0.009442	0.000460	0.283043	0.000017	9.58	13.01	0.59	291	- 0.99
Jz0201 18-3	0.006643	0.000320	0.283064	0.000017	10.32	13.76	0.60	261	- 0.99
Jz0201 18-4	0.008344	0.000401	0.283052	0.000016	9.90	13.34	0.55	278	- 0.99
Jz0201 18-5	0.019214	0.000919	0.283052	0.000017	9.90	13.28	0.59	282	- 0.97
Jz0201 20-1	0.001293	0.000062	0.283081	0.000016	10.94	14.41	0.57	235	- 1.00
Jz0201 20-2	0.001135	0.000054	0.283075	0.000015	10.70	14.17	0.52	245	- 1.00
Jz0201 20-3	0.006759	0.000289	0.283013	0.000019	8.51	11.95	0.66	333	- 0.99
Jz0201 20-4	0.020099	0.000987	0.283053	0.000018	9.94	13.31	0.64	281	- 0.97
Jz0201 20-5	0.015113	0.000679	0.283056	0.000018	10.03	13.43	0.65	275	- 0.98
Jz0201 20-6	0.004086	0.000182	0.283054	0.000021	9.98	13.43	0.73	274	- 0.99
Jz0201 21-1	0.001701	0.000084	0.283105	0.000014	11.79	15.25	0.48	202	- 1.00
Jz0201 21-2	0.002430	0.000125	0.283092	0.000013	11.33	14.79	0.46	220	- 1.00
Jz0201 21-3	0.002599	0.000122	0.283083	0.000013	10.99	14.45	0.46	233	- 1.00
Jz0201 22-1	0.004210	0.000202	0.283075	0.000014	10.73	14.18	0.48	244	- 0.99
Jz0201 22-2	0.007407	0.000353	0.283068	0.000015	10.48	13.91	0.51	255	- 0.99
Jz0201 22-3	0.006771	0.000323	0.283077	0.000015	10.79	14.23	0.54	243	- 0.99
Jz0201 22-4	0.007014	0.000337	0.283098	0.000014	11.53	14.97	0.49	213	- 0.99
Jz0201 23-1	0.002040	0.000105	0.283116	0.000012	12.16	15.63	0.43	187	- 1.00
Jz0201 23-2	0.004781	0.000217	0.283105	0.000022	11.78	15.23	0.78	203	- 0.99
Jz0201 23-3	0.004084	0.000191	0.283074	0.000014	10.69	14.14	0.48	246	- 0.99
Jz0201 25-1	0.008685	0.000351	0.283072	0.000015	10.60	14.04	0.54	250	- 0.99
Jz0201 25-2	0.003920	0.000182	0.283079	0.000015	10.86	14.32	0.53	239	- 0.99
Jz0201 25-3	0.003679	0.000172	0.283068	0.000014	10.46	13.91	0.49	255	- 0.99
Jz0201 25-4	0.001673	0.000075	0.283081	0.000013	10.92	14.39	0.45	236	- 1.00
Jz0201 25-5	0.002385	0.000113	0.283081	0.000013	10.94	14.40	0.48	236	- 1.00
Jz0201 25-6	0.003506	0.000166	0.283079	0.000013	10.86	14.32	0.46	239	- 0.99
Jz0201 25-7	0.003003	0.000145	0.283108	0.000014	11.90	15.36	0.48	198	- 1.00
Jz0201 25-8	0.003255	0.000156	0.283084	0.000013	11.02	14.48	0.45	232	- 1.00
Jz0201 25-9	0.004426	0.000212	0.283095	0.000013	11.41	14.86	0.46	217	- 0.99