

遵义牛蹄塘组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义

周明忠^{*}, 罗泰义^{*}, 李正祥, 赵辉, 龙汉生, 杨勇

中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

The Institute of Geoscience Research, Department of Applied Geology, Curtin University of Technology, GPO Box U1987, Perth, WA 6845, Australia;

中国科学院研究生院, 北京 100049

^{*} 联系人, E-mail: luotaiyi@vip.gyig.ac.cn

2007-08-22 收稿, 2007-11-12 接受

国家自然科学基金(批准号: 40672053)资助项目

摘要 制约扬子地台早寒武世地层的精确锆石 U-Pb 年龄稀少, 对最近于遵义松林地区下寒武统牛蹄塘组底部发现的凝灰岩中的锆石斑晶进行 SHRIMP U-Pb 测年, 结果显示凝灰岩的就位年龄为 (518 ± 5) Ma (MSWD = 0.37), 从而提供了扬子地台下寒武统第二个精确锆石 U-Pb 年龄数据, 构建了该区下寒武统以精确锆石 U-Pb 年龄为基础的时间框架雏形。结合区域地层对比, 凝灰岩年龄数据显示澄江生物群及三叶虫首现(FAD)的绝对年龄应该晚于 (518 ± 5) Ma。该年龄数据同时表明, 遵义松林地区牛蹄塘组底部 Ni-Mo-PGE 多金属富集层的 Re-Os 等时线年龄数据(537~542 Ma)不代表地层的年龄。

关键词

下寒武统

牛蹄塘组

凝灰岩

SHRIMP

锆石

澄江生物群

Ni-Mo-PGE 多金属富集层

扬子地台广泛出露前寒武系-寒武系过渡地层, 是研究新元古代末期至早寒武世时期生物演化(如“寒武纪生命大爆发”)、古海水同位素长期变化、重要成矿事件及寒武系划分与全球对比的重要窗口之一^[1-9]。自 20 世纪初叶以来, 科学家们对扬子地台保存的下寒武统开展了多学科研究。在众多的研究成果中, 最显著的属下寒武统古生物学研究方面^[10-19], 而关于其地质年代学研究则较为滞后。迄今, 华南下寒武统高精度、可靠的 U-Pb 锆石年龄数据仅有一个^[20-22]。华南下寒武统的全球对比与划分为近年国际地学研究的热点之一, 然而, 由于早寒武世时期地球上存在 2 个大的生物地理分区^[23], 使得该时期地层古生物化石的全球对比存在困难, 而大范围内的岩石地层对比则因地层相变更具局限性。因此, 华南下寒武统亟待建立以精确可靠的 U-Pb 锆石年龄为基础的时间框架, 以促进其在全球范围内进行对比。

前人研究认为^[24], 昆明地区澄江生物群^[10-19]等

时于遵义松林地区的遵义生物群, 2 个生物群所处层位的下伏地层(湘黔地区牛蹄塘组底部及其相当层位)中均存在 Ni-Mo-(PGE)多金属富集层(矿床)^[25,26]。基于这一生物学控制, 可将 Ni-Mo-PGE 层作为扬子地台下寒武统对比的重要地球化学标志层^[27]。迄今, 澄江生物群尚没有精确同位素年龄的有效制约, 它的绝对年龄被推测为 525 Ma^[27]。对重要生物群的精确定年具有重要理论意义, 因此, 这一推测年龄值(525 Ma)有待放射性同位素年龄的确证。由于 Ni-Mo-PGE 多金属层这一地球化学标志层与澄江生物群显示清晰的地层先后关系^[26,27], 因此, 其年龄信息的获取不仅有助于 Ni-Mo-PGE 多金属层本身成因的解释, 而且可以对澄江生物群绝对年龄作有效的估计。最近, 于贵州遵义地区出露的牛蹄塘组底部发现一下伏于 Ni-Mo-PGE 多金属层的凝灰岩层, 由于其中保存性质稳定的斑晶矿物锆石, 因而可以对锆石进行 SHRIMP U-Pb 测年以获得凝灰岩的就位(沉积)年龄, 从而为

Ni-MO-PGE多金属层提供年龄信息。结合扬子地台下寒武统区域地层对比成果,这可以进一步提供澄江生物群的绝对年龄信息。

本文的目的在于:()提供遵义牛蹄塘组底部凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年龄,结合前人对遵义松林地区Ni-MO-PGE多金属矿床的测年成果,对该矿床的成因模式作适当探讨;()基于Ni-MO-PGE多金属层作为一地球化学标志层及扬子地台下寒武统的区域地层对比成果,对著名的澄江生物群进行初步的绝对年龄制约,并对前人关于该生物群绝对年龄推测值进行重新评估;()结合扬子地台下寒武统已有的一个精确可靠的锆石SHRIMP U-Pb年龄^[22]及国际前寒武系-寒武系界线年龄^[28]研究成果,初步建立华南下寒武统的以高精度、高置信度锆石U-Pb年龄数据构成的时间框架。

1 地质背景

由于岩浆岩的缺乏,扬子地台新元古代末至早寒武世时期的构造背景依然不清晰。根据前人沉积学的研究成果,这一时期扬子地台的古地理可划分为3个带,即自西北向东南分别为内部台地、过渡带、斜坡与深水盆地,它们之间的界线沿NE-SW向延伸^[26,27]。沉积地层在不同地区间存在相变,西北侧普遍保存以碳酸盐岩为主的地层,东南部分则以富含硅质的沉积为特征。同时,不同地区古生物化石的分布及特征也不一致,总体上浅水台地相地层保存较为丰富的化石记录,深水相地层化石相对稀少^[26,27]。

本研究所涉及的2个剖面之一为位于遵义市以西25 km的松林镇中南村附近的尖坡顶剖面,这一剖面在早寒武世古地理图上属于内部台地^[26,27],文献[29,30]中关于松林地区的前寒武系-寒武系已进行过详细的描述,出露的前寒武系最上部地层为灯影组白云岩,其上覆地层为下寒武统牛蹄塘组。两者以风化的铁质黏土层为界线标志呈平行不整合接触关系,黏土层的厚度小于2 cm。牛蹄塘组底部为厚度约为25 cm的磷块岩;磷块岩的上覆地层依次为黄钾铁矾化熔岩层、凝灰岩层、含小磷结核碳质硅质页岩,在经历碳质页岩夹碳质碳酸盐岩层的沉积后即为Ni-Mo-PGE多金属矿层。凝灰岩层与Ni-Mo-PGE多金属矿层的垂直距离约为2 m,紧邻其所处层位附近已发现一层钾质斑脱岩^[29]。Ni-Mo-PGE多金属矿层之上依次为厚度较大的黑色碳质页岩(约25 m)及粉砂质

页岩。最近发现的遵义生物群保存于粉砂质页岩中,该生物群的年龄被认为与云南昆明地区的澄江生物群的年龄相当,其所处层位与牛蹄塘组底部凝灰岩相距约30 m^[24,26]。在松林地区,Ni-Mo-PGE矿层厚度不大,一般为10 cm,局部囊状体可达200 cm。

本文以云南昆明地区前寒武系-寒武系过渡地层作对比研究剖面,该区位于遵义松林地区之西南,两者地理位置上相距约500 km。关于昆明地区的前寒武系-寒武系过渡地层,前人已进行过系统的地层学研究,多集中于作为国际前寒武系-寒武系界线标准层型候选剖面的晋宁县梅树村剖面^[31-35]。本研究综合前人在这一地区的地层学研究成果,汇编了相应地层的地层柱状图(图1)。昆明地区的前寒武系-寒武系界线至今没有获得一致的认识^[3,31-33,36,37],主要原因在于朱家菁组与下伏灯影组之间为平行不整合接触关系,一定程度上影响了碳同位素地层学工作的开展。目前一般认为前寒武系-寒武系界线在朱家菁组中谊村段底部^[27]。按地层由老到新的顺序,朱家菁组被划分为待补段、中谊村段和大海段,它们的岩性分别以硅质岩与白云岩、磷块岩、白云岩为主。中谊村段中部(第5层)保存一层钾质斑脱岩,其锆石SHRIMP U-Pb年龄的最新研究成果为 (538.2 ± 1.5) Ma^[20-22]。朱家菁组的上覆地层依次为石岩头组和玉案山组。其中石岩头组的岩性为以黑色页岩为主,其底部发现一层钾质斑脱岩产出^[38]。玉案山组主要由页岩沉积和粉砂岩组成,著名的澄江生物群即保存于中部的粉砂质页岩之中^[10-19,26]。Steiner等人^[26]认为石岩头组底部存在Cr-Ni富集层,而Zhu等人^[27]研究表明Ni-Mo富集层位于玉案山组底部的黑色页岩中。经考察,我们认为Ni-Mo富集层应位于玉案山组底部(图1)。

2 样品采集与分析方法

遵义松林地区在区域地质上为一穹隆,前寒武系构成其核部,牛蹄塘组底部地层围绕核部出露。牛蹄塘组底部凝灰岩主要出露于穹隆西南缘中南村附近的尖坡顶、黑沙坡和小竹流水剖面。本次研究的样品选取凝灰岩厚度较大的尖坡顶剖面进行采集,由于凝灰岩较软而疏松,露头表层易于风化及遭受外界碎屑物质混染,因而在样品采集过程中首先挖掘至凝灰岩的新鲜位置,而后采集新鲜凝灰岩样品25 kg。

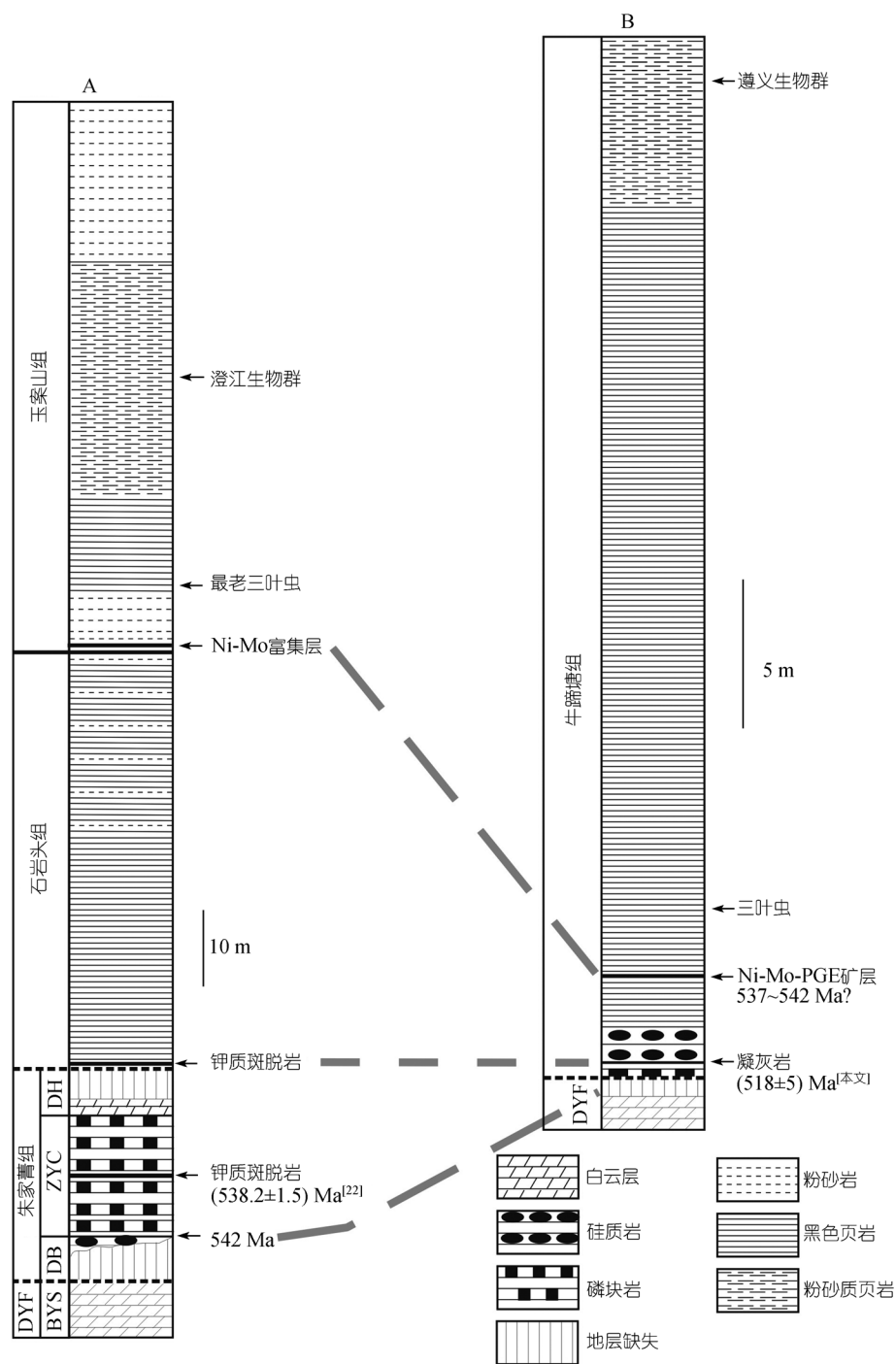


图1 昆明(A)及遵义(B)地区前寒武系-寒武系过渡地层综合柱状图

DYF, DH, ZYC, DB 及 BYS 分别表示灯影组、大海段、中谊村段、待补段及白岩哨段

所采凝灰岩样品经常规重液分选及磁选富集锆石,随后在双目镜下挑选锆石 200 余粒. 锆石的 SHRIMP U-Pb测年实验在澳大利亚科廷科技大学按标准流程完成^[21]. 待分析未知点与标准样品TEM的

点交叉进行分析,实验数据采用Squid v. 1.02 和 Isoplot/Ex v. 2.49 程序^[39,40]进行处理,普通铅据²⁰⁴Pb 进行校正,同位素比值误差为 1 σ ,加权平均年龄具 95%的置信度.

3 结果

对遵义松林尖坡顶凝灰岩样品(编号为 JFD)中的 23 个锆石颗粒进行分析, 在用于计算的 17 个分析值中, 除其中 2 个分析值来自同一粒锆石外, 其余每一分析值均来自不同的锆石颗粒。SHRIMP 分析结果见表 1。所有分析点的 Th/U 比值均大于 0.1(0.50~0.83), 显示岩浆型锆石特征。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 图解上, 数据投点落在谐和线上或其附近(图 2), 16 颗锆石颗粒的 17 个用于加权平均计算的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(503 \pm 14) \sim (527 \pm 14)$ Ma 之间, 它们的加权平均年龄为 (518 ± 5) Ma ($N = 17$, MSWD = 0.37), 这一年龄代表尖坡顶凝灰岩的就位(沉积)年龄。

4 讨论

4.1 对 Ni-Mo-PGE 层年龄及成因模式的约束

对遵义牛蹄塘组黑色页岩中产出的 Ni-Mo-PGE 多金属矿床的成因, 前人^[26,31,41~45]曾提出不同的形成机制。毛景文等人^[45]认为矿床的形成是由海底喷流系统从海底镁铁质-超镁铁质岩中萃取物质与下伏富

Mo-Re-(Cu)岩浆房提供成矿能源和部分物源共同作用的结果; 在随后的研究中, Mao 等人^[44]主张 Ni-Mo-PGE 多金属矿床是同生沉积的。有学者^[26,41~43]支持 Ni-Mo-PGE 多金属矿床的热液成因, 同时强调热液流体作用于基性-超基性岩且金属元素来源于地幔^[41~43]。罗泰义等人^[30]研究认为矿床的形成是多阶段作用的结果, 而晚期火山爆发, 带出的深部成矿物质经水流机械富集是成矿的主要原因。尽管上述成矿机制存在不一致的认识, 但多数研究成果都暗示着深部存在贵金属及其他元素的基性-超基性岩浆房。

近来, 对 Ni-Mo-PGE 多金属矿床的成矿年代学研究已积累了一定的数据。李胜荣等人^[41]获得了矿石的 Re-Os 等时线年龄为 (542 ± 11) Ma, 并认为这一年龄与牛蹄塘组地层年龄一致。Mao 等人^[44]和 Jiang 等人^[43]先后对矿石进行 Re-Os 定年, 分别获得矿石的 Re-Os 等时线年龄为 (541 ± 16) Ma(2 σ)和 (537 ± 10) Ma, 都认为它们代表地层的年龄。而本研究对距 Ni-Mo-PGE 多金属矿层约 2 m 的下伏尖坡顶凝灰岩

表 1 尖坡顶凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果^{a)}

点号	U/mg·g ⁻¹	Th/mg·g ⁻¹	²⁰⁶ Pb*/mg·g ⁻¹	Th/U	Pb _c /%	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma
JFD-1r	142	116	10.1	0.82	1.67	0.0474	7.3	0.533	7.8	0.0815	2.7	505 ± 13
JFD-2r	30	17	2.20	0.55	2.29	0.0476	14	0.542	14	0.0826	3.1	512 ± 15
JFD-3r	45	37	3.05	0.83	0.25	0.0621	10	0.673	11	0.0785	3.0	487 ± 14
JFD-4	42	25	2.96	0.60	2.00	0.0463	6.6	0.518	7.3	0.0812	2.9	503 ± 14
JFD-5	756	415	54.9	0.55	0.08	0.0579	1.2	0.674	2.9	0.0844	2.6	522 ± 13
JFD-6c	1207	708	87.5	0.59	0.25	0.0569	1.1	0.660	2.8	0.0842	2.6	521 ± 13
JFD-7c	1771	891	109	0.50	0.04	0.0577	0.7	0.568	2.7	0.0713	2.6	444 ± 11
JFD-8c	665	361	47.7	0.54	0.02	0.0588	1.1	0.677	2.8	0.0835	2.6	517 ± 13
JFD-9	241	139	18.1	0.58	0.31	0.0557	2.0	0.671	3.3	0.0873	2.6	540 ± 14
JFD-10c	1174	634	84.0	0.54	0.07	0.0581	0.9	0.667	2.8	0.0833	2.6	516 ± 13
JFD-12-1	113	67	8.38	0.59	1.01	0.0479	5.9	0.562	6.5	0.0852	2.7	527 ± 14
JFD-12-2	57	39	4.01	0.68	-0.71	0.0645	5.0	0.732	5.8	0.0823	3.1	510 ± 15
JFD-13	121	77	9.29	0.64	0.75	0.0518	3.8	0.634	4.7	0.0888	2.7	548 ± 14
JFD-14	72	39	5.11	0.54	-0.31	0.0625	3.6	0.709	4.5	0.0823	2.8	510 ± 14
JFD-15	49	31	3.48	0.64	-0.26	0.0653	3.6	0.755	4.6	0.0838	2.9	519 ± 14
JFD-16	158	85	11.5	0.54	-0.02	0.0571	1.9	0.668	3.3	0.0848	2.7	525 ± 13
JFD-17	34	19	2.37	0.57	-0.88	0.0686	7.1	0.783	7.8	0.0827	3.4	512 ± 17
JFD-17c	2185	1098	131	0.50	0.07	0.0569	0.7	0.546	2.7	0.0696	2.6	433 ± 11
JFD-18	46	27	3.23	0.58	-0.50	0.0621	4.7	0.710	5.5	0.0830	2.9	514 ± 14
JFD-19	53	31	3.67	0.59	1.11	0.0509	5.9	0.560	6.7	0.0798	3.1	495 ± 15
JFD-20	192	99	13.7	0.52	-0.18	0.0581	1.7	0.665	3.2	0.0831	2.7	515 ± 13
JFD-21	43	25	3.10	0.58	1.98	0.0506	18	0.567	18	0.0814	3.1	504 ± 15
JFD-22	85	79	5.18	0.93	0.86	0.0621	5.3	0.605	6.0	0.0706	2.8	440 ± 12
JFD-23	838	607	60.4	0.72	0.23	0.0561	1.2	0.648	2.9	0.0837	2.6	518 ± 13

a) Pb_c 和 Pb* 分别表示普通铅和放射成因铅; 年龄值据 ^{204}Pb 进行普通铅校正; 灰色区域分析值未纳入加权平均计算

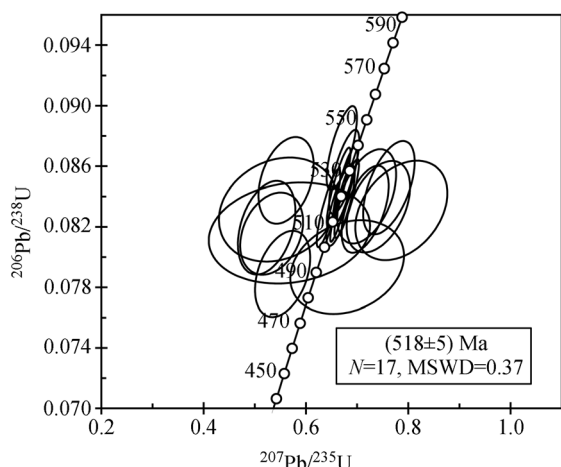


图 2 尖坡顶凝灰岩锆石 U-Pb 谐和图解

锆石进行 SHRIMP U-Pb 测年的结果为 (518 ± 5) Ma。显然, 这一年龄为凝灰岩的就位(沉积)年龄, 可以真实地反映所处地层的沉积时间。如果说前人的 Re-Os 年代学结果代表凝灰岩上覆黑色页岩的年龄, 那么, 从地层沉积的先后顺序来考虑, 尖坡顶凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄与上覆地层所含 Ni-Mo-PGE 多金属矿石的年龄很明显是矛盾的。这就需要一种新的成因模式, 以解决凝灰岩 U-Pb 年龄与 Ni-Mo-PGE 层 Re-Os 年龄的冲突。

罗泰义等人^[30]已经提出深部岩浆房的成矿物质经火山爆发而被带出, 随后经水流机械富集的可能成因模式。这一模式暗示成矿物质(含 Ni, Mo 等多种金属元素)以微粒形式经物理搬运、沉淀和富集。如果含 Ni-Mo-PGE 多金属元素微粒以物理过程(而非化学过程)汇聚而后经胶结物所胶结, 那么含多金属微粒的 Re-Os 同位素体系可以认为是在其沉积过程及后期未被重新建立, 仍然保持岩浆物质冷却过程中 Re-Os 同位素封闭时的体系。这样, 对含 Ni-Mo-PGE 多金属元素岩浆微粒经物理过程聚集而后被胶结形成的矿石进行同位素测年, 其年龄仍应代表岩浆房喷发出的岩浆物质的年龄, 而不能代表矿石的沉积年龄。这一机制可以合理地解释 Ni-Mo-PGE 多金属矿石 Re-Os 等时线年龄结果与其下伏凝灰岩年龄数据的关系, 同时也印证了前人研究成果所暗示的深部岩浆房的存在。

最新的古生物学研究成果揭示, 尖坡顶剖面 Ni-Mo-PGE 多金属层之上约 2 m 的黑色页岩中已发现三叶虫化石, 但未确定这一层位为三叶虫化石的首

现位置, 因而通过凝灰岩年龄尚不能确定该剖面三叶虫化石首现的年龄信息^[46]。而在昆明地区玉案山组底部 Ni-Mo 富集层之上约 8.8 m 处为三叶虫首现层位^[9,27]。基于 Ni-Mo-(PGE)多金属层对比成果的制约, 尖坡顶凝灰岩应下伏于三叶虫首现层位, 因而其锆石年龄间接地表明三叶虫首现的下限年龄应为 (518 ± 5) Ma, 这与国际地层学研究的推测结果(521 Ma, 参考 2006 年版《国际地层表》, 网址: <http://www.stratigraphy.org/chus.pdf>)是相吻合的^[47]。从而进一步支持了以凝灰岩年龄制约 Ni-Mo-PGE 多金属层下限年龄的合理性。

4.2 澄江生物群年龄约束

澄江生物群保存于昆明地区玉案山组的粉砂质页岩之中。对沉积岩的直接定年存在困难, 因此这一重要生物群的绝对年龄迄今没有被有效约束, 前人^[27]仅推测其绝对年龄为 525 Ma。玉案山组底部存在 Ni-Mo 富集异常, 同属于扬子地台广泛分布且已经被生物地层学控制的 Ni-Mo-PGE 多金属地球化学标志层。由于遵义尖坡顶凝灰岩层下伏于 Ni-Mo-PGE 多金属层, 因此可以认为昆明地区澄江生物群所处地层(玉案山组中部)沉积在遵义尖坡顶凝灰岩层之后, 因而澄江生物群的绝对年龄应年轻于尖坡顶凝灰岩的年龄 $((518 \pm 5)$ Ma)。这样, 可以确定澄江生物群的下限年龄为 (518 ± 5) Ma。

此外, 前人^[26,27]研究认为遵义松林地区的牛蹄塘组底部地层可以与昆明地区石岩头组底部地层进行对比。最近, 罗泰义等人^[29]已于遵义松林地区的牛蹄塘组底部凝灰岩层位附近发现一层钾质斑脱岩。初步的全岩主量及微量元素地球化学研究表明昆明地区石岩头组底部钾质斑脱岩^[38]与遵义牛蹄塘组底部钾质斑脱岩为同一期火山活动的产物(罗泰义等人, 准备中), 这进一步支持了前人^[26,27]认为石岩头组底部相当于牛蹄塘组底部的结论。因此, 考虑到石岩头组底部地层(相当于牛蹄塘组底部)与玉案山组澄江生物群所处层位存在相当的距离(大于 80 m)^[31,32], 可以认为前人对澄江生物群年龄的推测值(525 Ma)偏老。

4.3 华南下寒武统高精度锆石 U-Pb 年龄框架

至此, 华南下寒武统已经积累了两个直接的高精度锆石 U-Pb 年龄数据, 即云南晋宁县梅树村剖面朱家菁组中谊村段中部(第 5 层)的钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $((538.2 \pm 1.5)$ Ma)^[22]和遵义松林

尖坡顶剖面牛蹄塘组凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年龄((518 ± 5) Ma)。目前国际上前寒武系-寒武系界线年龄已确定在 542 Ma^[28]。中国前寒武系-寒武系界线位置的确定一直悬而未决,目前,这一界线一般置于中谊村段的底部(大概相当于原B点)^[27]。虽然没有直接的同位素绝对年龄数据,但如果这一方案与地质事

实相符,则这一层位的绝对年龄被估计为 542 Ma是可行的。这样,由地层高精度锆石U-Pb年龄构成的华南下寒武统的时间框架雏形已经形成(图 1),无疑将促进对华南下寒武统重要成矿事件、稳定同位素事件及生物演化的时间控制,最终促进华南下寒武统的国际对比及划分。

致谢 中国科学院南京地质古生物研究所周传明研究员及美国维吉尼亚工学院肖书海教授对样品分析给予了帮助,两位匿名审稿人对本文提出了评论及修改意见,美国辛辛那提大学 Warren D. Huff 教授对本文英文初稿给予了修改,中国科学院地球化学研究所朱丹研究员对 Re-Os 同位素体系原理给予了启发性指导,刘玉平研究员及苏玉平博士分别对实验数据的评价及处理给予了有益帮助,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Brasier M, Magaritz M, Corfield R, et al. The carbon- and oxygen-isotope record of the Precambrian-Cambrian boundary interval in China and Iran and their correlation. *Geol Mag*, 1990, 127(4): 319—332
- 2 Guo Q J, Strauss H, Liu C Q, et al. Carbon and oxygen isotopic composition of Lower to Middle Cambrian sediments at Taijiang, Guizhou Province, China. *Geol Mag*, 2005, 142(6): 723—733^[DOI]
- 3 Hsu K J, Oberhansli H, Gao J Y, et al. 'Strangelove ocean' before the Cambrian explosion. *Nature*, 1985, 316(29): 809—811^[DOI]
- 4 Shen Y, Schidlowski M, Chu X. Biogeochemical approach to understanding phosphogenic events of the terminal Proterozoic to Cambrian. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2000, 158(1-2): 99—108^[DOI]
- 5 Shen Y. C-isotope variations and paleoceanographic changes during the late Neoproterozoic on the Yangtze Platform, China. *Precambrian Res*, 2002, 113: 121—133^[DOI]
- 6 Kimura H, Azmy K, Yamamuro M, et al. Integrated stratigraphy of the upper Neoproterozoic succession in Yunnan Province of South China: Re-evaluation of global correlation and carbon cycle. *Precambrian Res*, 2005, 138: 1—36^[DOI]
- 7 Shen Y, Schidlowski M. New C isotope stratigraphy from southwest China: implications for the placement of the Precambrian-Cambrian boundary on the Yangtze Platform and global correlations. *Geology*, 2000, 28(7): 623—626^[DOI]
- 8 Li G, Xiao S. *Tannuolina* and *Micrina* (Tannuolinidae) from the lower Cambrian of eastern Yunnan, South China, and their scleritome reconstruction. *J Paleont*, 2004, 78(5): 900—913^[DOI]
- 9 Shen Y, Zhao R, Chu X, et al. The carbon and sulfur isotope signatures in the Precambrian-Cambrian transition series of the Yangtze Platform. *Precambrian Res*, 1998, 89: 77—86^[DOI]
- 10 Chen J Y, Ramsköld L, Zhou G Q. Evidence for monophyly and arthropod affinity of Cambrian giant predators. *Science*, 1994, 264: 1304—1308^[DOI]
- 11 Chen J Y, Edgecombe G D, Ramsköld L, et al. Head Segmentation in Early Cambrian Fuxianhuia: implications for arthropod evolution. *Science*, 1995, 268: 1339—1343^[DOI]
- 12 Shu D G, Morris S C, Zhang X L. A *Pikaia*-like chordate from the Lower Cambrian of China. *Nature*, 1996, 384: 157—158^[DOI]
- 13 Chen J Y, Huang D Y, Li C W. An early Cambrian craniate-like chordate. *Nature*, 1999, 402: 518—522^[DOI]
- 14 Shu D G, Luo H L, Morris S C, et al. Lower Cambrian vertebrates from south China. *Nature*, 1999, 402: 42—46^[DOI]
- 15 Shu D G, Morris S C, Han J, et al. Primitive deuterostomes from the Chengjiang Lagerstätte (Lower Cambrian, China). *Nature*, 2001, 414: 419—424^[DOI]
- 16 Chen J Y, Huang D Y. A possible Lower Cambrian Chaetognath (Arrow Worm). *Science*, 2002, 298: 187^[DOI]
- 17 Shu D G, Morris S C, Han J, et al. Head and backbone of the Early Cambrian vertebrate Haikouichthys. *Nature*, 2003, 421: 526—529^[DOI]
- 18 Hou X G, Aldridge R J, Bergström J, et al. The Cambrian Fossils of Chengjiang, China: The Flowering of the Early Animal Life. Oxford: Blackwell Publishing Company, 2004. 1—256
- 19 Shu D G, Morris S C, Han J, et al. Ancestral echinoderms from the Chengjiang deposits of China. *Nature*, 2004, 430: 422—428^[DOI]

- 20 Sambridge M S, Compston W. Mixture modeling of multi-component data sets with application to ion-probe zircon ages. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 128: 373—390[DOI]
- 21 Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J Geol Soc*, 1992, 149: 171—184[DOI]
- 22 Jenkins R J F, Cooper J A, Compston W. Age and biostratigraphy of Early Cambrian tuffs from SE Australia and southern China. *J Geol Soc*, 2002, 159: 645—658
- 23 Shu D, Chen L. Cambrian palaeobiogeography of Bradoriida. *J Asian Earth Sci*, 1994, 9(3): 289—299[DOI]
- 24 赵元龙, Steiner M, 杨瑞东, 等. 贵州遵义下寒武统牛蹄塘组早期后生生物群的发现及重要意义. *古生物学报*, 1999, 38(Suppl): 132—146
- 25 Horan M F, Morgan J W, Grauch R I, et al. Rhenium and osmium isotopes in black shales and Ni-Mo-PGE-rich sulfide layers, Yukon Territory, Canada, and Hunan and Guizhou provinces, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 257—265[DOI]
- 26 Steiner M, Wallis E, Erdtmann B D, et al. Submarine-hydrothermal exhalative ore layers in black shales from South China and associated fossils-insights into a Lower Cambrian facies and bio-evolution. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2001, 169: 165—191[DOI]
- 27 Zhu M, Zhang J, Steiner M, et al. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow-to-deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach. *Prog Nat Sci*, 2003, 13(12): 951—960[DOI]
- 28 Amthor J E, Grotzinger J P, Schroder S, et al. Extinction of *Cloudina* and *Namacalathus* at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. *Geology*, 2003, 31(5): 431—434[DOI]
- 29 罗泰义, 宁兴贤, 罗远良, 等. 贵州遵义早寒武统黑色岩系底部 Se 的超常富集. *矿物学报*, 2005, 25(3): 275—282
- 30 罗泰义, 张欢, 李晓彪, 等. 遵义牛蹄塘组黑色岩系中多元素富集层的主要矿化特征. *矿物学报*, 2003, 23(4): 296—302
- 31 罗惠麟, 蒋志文, 武希彻, 等. 云南东部震旦系-寒武系界线. 昆明: 云南人民出版社, 1982. 1—266
- 32 罗惠麟, 蒋志文, 武希彻, 等. 中国云南晋宁梅树村震旦系-寒武系界线层型剖面. 昆明: 云南人民出版社, 1984. 1—154
- 33 罗惠麟, 蒋志文, 唐良栋. 中国下寒武统建阶层型剖面. 昆明: 云南人民出版社, 1994. 1—183
- 34 Shields G A, Strauss H, Howe S S, et al. Sulphur isotope compositions of sedimentary phosphorites from the basal Cambrian of China: Implications for Neoproterozoic-Cambrian biogeochemical cycling. *J Geol Soc*, 1999, 156: 943—955[DOI]
- 35 Zhang Q, Xu D. The rare event at the Precambrian-Cambrian boundary and the stratigraphic position of this boundary. *Mod Geol*, 1987, 11: 69—77
- 36 Awramik S M. The Precambrian-Cambrian boundary and geochemical perturbations. *Nature*, 1986, 319: 696[DOI]
- 37 Morris S C, Bengtson S. The Precambrian-Cambrian boundary and geochemical perturbations. *Nature*, 1986, 319: 696—697[DOI]
- 38 张俊明, 李国祥, 周传明. 滇东早寒武世梅树村期浅色黏土岩层的地球化学特征和地质意义. *岩石学报*, 1997, 13(1): 100—110
- 39 Ludwig K R. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Centre, 2001, Special Publication(1): 56
- 40 Ludwig K R. SQUID version 1.02: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronological Centre, 2001, Special Publication(2): 19
- 41 李胜荣, 肖启云, 申俊峰, 等. 湘黔下寒武统铂族元素来源与矿化年龄的 Re-Os 同位素制约. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(7): 568—575
- 42 李胜荣, 高振敏. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2000, 32(2): 169—174
- 43 Jiang S, Yang J, Ling H, et al. Re-Os isotopes and PGE geochemistry of black shales and intercalated Ni-Mo polymetallic sulfide bed from the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China. *Prog Nat Sci*, 2003, 13(10): 788—794[DOI]
- 44 Mao J, Lehmann B, Du A, et al. Re-Os Dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geologic significance. *Econ Geol*, 2002, 97: 1051—1061[DOI]
- 45 毛景文, 张光弟, 杜安道, 等. 遵义黄家湾镍铂钨族元素矿床地质、地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定-兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用. *地质学报*, 2001, 75(2): 234—243
- 46 彭进, 袁金良, 赵元龙, 等. 贵州遵义松林黑沙坡早寒武世牛蹄塘生物群中镇巴虫的发现. *古生物学报*, 2004, 43(3): 407—415
- 47 彭善池. 全球寒武系年代地层新划分. *中国科学院院刊*, 2006, 21: 325—328