南华-震旦系界线的锆石 U-Pb 年龄

储雪蕾 Wolfgang Todt 张启锐 陈福坤 黄 晶

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; Max-Planck-Institut für Chemie, 55020 Mainz, Germany.
E-mail: xlchu@mail.igcas.ac.cn)

中国地层委员会在 2001 年通过了中国的新元古代三分方案, 新建南华系^[1,2]. 新的系顶界置于陡山沱组之底; 以冰期有关的地层从原震旦系分出, 命名为南华系^[1-3], 取意于刘鸿允先生的“南华大冰期”^[3,4]. 2004 年 3 月, 国际地科联(IUGS)又批准设立了 Ediacaran 系, 其 GSSP 定在澳大利亚南部沿 Enorama Creek 出露的冰成岩石之上, 即结构和化学都与众不同的层状碳酸盐岩的底界^[5]. 如此, 中国的南华-震旦系界线对应着国际上的 Cryogenian-Ediacaran 界线, 而 Ediacaran 系就相当于中国的震旦系.

Cryogenian-Ediacaran 界线年龄原估计在 610~635 Ma 之间^[5]. 不久前, 在纳米比亚剖面的 Ghaub 组火山灰层获得了 635.5 ± 1.2 Ma 这个精确的锆石 U-Pb 年龄^[6], 现已被广泛地接受作为 Marinoan 冰期结束的年龄^[7,8]. 可是, 在 2001 年公布的中国区域年代地层

(地质年代)表中, 还将南华-震旦纪界线定在 680 Ma^[1,2]. 然而, 瓮安陡山沱组磷块岩的 Lu-Hf 和 Pb-Pb 定年表明, 南华-震旦系界线的年龄应在大约 600~610 Ma 附近^[9,10], 与全国地层年表给出的 680 Ma^[1,2] 相差甚远, 也与 Cryogenian-Ediacaran 界线的年龄不同. 本文发表的吴坞剖面南沱冰成岩石上火山灰层中的锆石 U-Pb 年龄数据, 为南华-震旦系界线的年龄提供直接限定.

江西上饶市北 8 km 的吴坞村附近出露一套相当连续的中上新元古界地层层序^[4], 如图 1 所示. 上饶地区的南华系休宁组分上、下两段, 由一套杂色含砾或不含砾的粗砂岩到粉砂岩、泥岩组成, 夹有沉凝灰岩; 其上覆的南沱组为浅灰色含砾沉凝灰岩、灰黑色含砾硅质粉砂岩夹硅炭质页岩, 即冰海沉积物或杂砾岩; 震旦系兰田组直接覆盖在南沱组上, 由黑色含

图 1 吴坞剖面附近地质简图

Nh₁x²⁻¹: 南华系休宁组二段下亚段; Nh₁x²⁻²: 南华系休宁组二段上亚段; Nh₂n: 南华系南沱组; Z₁l: 震旦系兰田组; Z₂p: 震旦系皮园村组; ₁h: 寒武系荷塘组; ₂y: 寒武系杨柳组; O₁y: 奥陶系印渚埠组; O₁n: 奥陶系宁国组

炭钙质泥岩和底部的浅灰色含泥质白云岩(即帽白云岩)构成;震旦系上统为皮园村组,深灰色薄层状硅质岩和硅质泥岩.又据刘鸿允等人^[4]描述,吴坞实测剖面的南沱组(原文称“雷公坞组”)厚度为 22 m,含凝灰质;其上覆的兰田组(原文称“西峰寺组下段”,相当于陡山沱组)厚 147 m,底部 7 m 为灰白色变余条纹状细屑沉凝灰岩.南沱组与上覆的兰田组之间整合接触.兰田组底部 7 m 厚的沉凝灰岩之上,是 42 m 厚的黑色含碳页岩,没有任何白云岩或泥质白云岩被描述.

吴坞剖面的实地考察表明南沱组与兰田组之间地层基本连续,不存在明显的沉积间断.南沱杂砾岩之上也没有发现白云岩或碳酸盐岩(即帽碳酸盐),取而代之的是基本不含砾的细屑沉凝灰岩(火山灰层),约 7 m 厚.再向上就是很厚的黑色含碳页岩层,到了皮园村组就出现硅质岩.由此判断,当时的海水还相当深,可能属大陆斜坡.岩相古地理环境相似的皖南,兰田组底部一般有层碳酸盐岩,即帽碳酸盐.它较薄,不超过 2 m,横向也不十分连续.因此,像吴坞剖面这样缺失帽碳酸盐,在该地区也属正常.02W34 样品采自吴坞剖面覆盖在南沱杂砾岩上的火山灰层,距沉凝灰岩层底界约 1.5 m,非常接近南华-震旦系的界线.

锆石分选是由河北省区域地质调查研究所实验室完成的.用于定年的锆石还经过双目显微镜下挑选,采用 ^{205}Pb 和 ^{233}U 混合稀释剂同位素法测定 U、Pb 含量及同位素比值.化学分离与同位素测定都是在德国马普化学所的 U-Pb 实验室进行.锆石的用量在 0.1 mg 左右,经过 7 N 的 HNO_3 浸泡 1 小时,用 Milli-Q 纯净水洗净,并加入准确称量的混合稀释剂.参照常规流程,熔样,离子交换法分离 U、Pb.质谱分析是在 MAT261 上完成,用 U500 和 SRM982 分别做 U 和 Pb 同位素分析的工作标准.

基本分析数据如表 1 所示.经过 Isoplot 程序计算,获得的 U-Pb 谐合线上、下交点年龄分别为 2733 ± 56

和 635.3 ± 5.4 Ma(图 2),其中一个样品点非常接近下交点.

从锆石的形态与寄主沉凝灰岩分布来看,火山物质来源不会远,火山喷发与沉积几乎同时发生.因此,我们认为 635.3 ± 5.4 Ma 的下交点年龄可以代表同期火山的年龄.所测锆石样品没有获得谐合年龄,可能有两个因素:(1)部分岩浆锆石颗粒存在残余的核;或/和(2)测定的岩浆锆石中混入个别的碎屑锆石颗粒.若为(1),则 2733 ± 56 Ma 的上交点年龄揭示火山物质可能来源于扬子克拉通内晚太古代地壳,时代上大致相当于崆岭群^[11].如果是(2),沉积物源区时代可能是晚太古代.进一步阐明这些可能性还需要更多的证据.尽管如此,由于一个样品的结果接近谐和年龄,下交点年龄是十分可靠的.

近年来,由于在扬子地区陡山沱组中有一系列重要的古生物化石发现,如动物胚胎^[12]、两侧对称的动物,它们可能是地球上最早的动物化石^[13],陡山沱组的年代备受国内外关注.Barfod 等人^[9]对贵州瓮安等地陡山沱组磷块岩定年,获得的 Lu-Hf 和 Pb-Pb 等时线年龄分别为 584 ± 26 和 599 ± 4 Ma.Chen 等人^[10]

图 2 02W34 样品的 U-Pb 谐合图

表 1 02W34 样品的 U-Pb 分析数据^{a)}

组	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	U/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	原子比			表观年龄/Ma		
				$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$
1	106	138	19.1	0.1054 ± 11	0.9255 ± 406	0.06368 ± 29	646	665	731
2	240	231	34.3	0.1234 ± 8	1.4721 ± 263	0.08650 ± 13	750	919	1349
3	411	190	28.4	0.1223 ± 19	1.3946 ± 220	0.08272 ± 17	745	887	1263

a) 误差以 2 倍标准偏差($2\sigma_m$)给出 <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2005-50-6-600>

给出的磷块岩顶部的Pb-Pb年龄为 576 ± 14 Ma. 然而, 这些年龄没有一个能够确切限定南沱-陡山沱界线的年代. 此外, 它们都比纳米比亚Ghaub组的 635.5 ± 1.2 Ma 锆石U-Pb年龄年轻很多, 而那个年龄限定Marinoan冰期大约在 635 Ma 结束^[7,8]. 相比之下, 我们的锆石U-Pb年龄限定南沱-陡山沱界线的年龄为 635 Ma, 与国际上Cryogenian-Ediacaran界线非常吻合.

年龄是全球冰期对比的重要判据. 新元古代冰期对比一直存在分歧, 主要原因是缺乏可靠的冰期年龄数据. 南沱冰期的国际对比也曾分歧很大. 一种意见, 根据从前发表的 750~690 Ma 的年龄资料将南沱组与Sturtian冰期地层单元对比^[14~16]. 有的古地磁学者也认为华南不存在与Marinoan冰期相对应的冰成地层^[17]. 另一种意见认为南沱冰期与Marinoan冰期相对应, 早前发生的江口冰期(又称古城或长安冰期)才与Sturtian冰期对应^[9,18,19]. 郑永飞^[20]曾对南华系同位素定年结果与新元古代全球冰期对比做过系统评述. 我们采自南沱组顶部的锆石U-Pb年龄数据证实南沱冰期结束于 635 Ma, 所以南沱冰期与Marinoan冰期能够对比. 有趣的是, 扬子地区与纳米比亚一致的火山年龄数据意味着, 发生在 635 Ma 的全球性火山活动可能是导致Marinoan冰期结束的原因. 全球性火山喷发使大气中CO₂ 含量急剧增加, 从而结束了新元古代的“雪球地球”事件^[20].

致谢 衷心感谢江西省区域地质调查院符鹤琴高级工程师的野外指导和中国科学技术大学李曙光教授的实验室指导. 朱茂炎、蒋干清、孙卫东曾与作者进行过陡山沱组年龄的讨论, 郑永飞、李献华审阅初稿并提出了宝贵的修改意见, 在此对他们表示衷心的感谢. 本工作受中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-141)、国家自然科学基金(批准号: 40373011, 40172015)和中国科学院-德国马普学会交流项目资助.

参 考 文 献

- 1 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明(修订版). 北京: 地质出版社, 2001. 42
- 2 全国地层委员会. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书. 北京: 地质出版社, 2002. 62
- 3 陆松年. 关于中国新元古界划分几个问题的讨论. 地质论评, 2002, 48(3): 242~248
- 4 刘鸿允, 等编著. 中国震旦系. 北京: 科学出版社, 1991. 388
- 5 Knoll A H, Walter M R, Narbonne G M, et al. A new period for the geologic time scale. Science, 2004, 305: 621~622[DOI]

- 6 Hoffmann K H, Condon D J, Bowring S A, et al. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: Constraints on Marinoan glaciation. Geology, 2004, 32: 817~820[DOI]
- 7 Allen P A, Hoffman P F. Extreme winds and waves in the aftermath of a Neoproterozoic glaciation. Nature, 2005, 433: 123~127[DOI]
- 8 Hurtgen M T, Arthur M A, Halverson G P. Neoproterozoic sulfur isotopes, the evolution of microbial sulfur species, and the burial efficiency of sulfide as sedimentary pyrite. Geology, 2005, 33: 41~44[DOI]
- 9 Barfod G H, Albarede F, Knoll A H, et al. New Lu-Hf and Pb-Pb age constraints on the earliest animal fossils. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201: 203~212[DOI]
- 10 Chen D F, Dong W Q, Zhu B Q, et al. Pb-Pb ages of Neoproterozoic Doushantuo phosphorites in South China: constraints on early metazoan evolution and glaciation events. Precamb Research, 2004, 132: 123~132[DOI]
- 11 Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. Geology, 2000, 28: 11~14[DOI]
- 12 Xiao S, Zhang Y, Knoll A H. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite. Nature, 1998, 391: 553~558[DOI]
- 13 Chen J Y, Bottjer D J, Oliveri P et al. Small bilaterian fossils from 40 to 55 million years before the Cambrian. Science, 2004, 305: 218~222[DOI]
- 14 Hambrey M J, Harland W B. Earth's Pre-Pleistocene Glacial Record. Cambridge University Press, 1981. 386~401
- 15 Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up. Precamb Research, 2003, 122: 141~158[DOI]
- 16 王剑, 李献华, Duan T Z, 等. 沧水铺火山岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及“南华系”底界新证据. 科学通报, 2003, 48: 1726~1731[摘要][PDF]
- 17 Evans D A D. Stratigraphic, geochronologic, and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox. Am J Sci, 2000, 300: 347~433
- 18 Zhou C, Tucker R D, Xiao S, et al. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. Geology, 2004, 32: 437~440[DOI]
- 19 张启锐, 储雪蕾, 张同钢, 等. 从“全球冰川”到“地球假说”——关于新元古代冰川事件的最新研究. 高校地质学报, 2002, 8: 473~481
- 20 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化. 科学通报, 2003, 48: 1705~1720[摘要][PDF]

(2005-01-26 收稿, 2005-03-14 收修改稿)

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2005-50-6-600>