中国吉林晚三叠世天桥岭植物群时代的确定: 来自LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄的证据

冯玉辉^{1,2}, 杨涛^{1,2}, 梁飞^{1,2}, 孙革^{1,2,3*}

1. 自然资源部东北亚古生物演化重点实验室(沈阳师范大学), 沈阳 110034;

2. 沈阳师范大学古生物学院, 沈阳 110034;

3. 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室(吉林大学), 长春 130026

* 通讯作者, E-mail: sunge0817@163.com

收稿日期: 2020-08-19; 收修改稿日期: 2020-11-08; 接受日期: 2020-11-23; 网络版发表日期: 2021-03-29

国家自然科学基金项目(批准号: 41072011)、辽宁省教育厅基金项目(编号: LQN201916)和沈阳师范大学博士启动基金项目(编号: BS201911)资助

摘要 晚三叠世吉林天桥岭植物群是我国中生代一个著名植物群, 它的发现不仅重塑了中国晚三叠世植物地理区划分, 而且对整个东亚地区晚三叠世古植物地理区研究具有重要意义. 长期以来, 天桥岭植物群时代已经被古植物学家认定为晚三叠世, 其主要依据古生物资料, 而缺少同位素年代学证据; 因此, 其准确时代尚待进一步证明, 这也一直是困扰古生物学家的科学难题. 本研究在吉林汪清天桥岭标准剖面天桥岭组底部、整合下伏含天桥岭植物群的层位采得同位素测年样品, U-Pb同位素测年结果为 (212.8 ± 2.5) Ma. 该结果与古生物证明的时代基本一致, 表明天桥岭组初始沉积和马鹿沟组结束沉积的时间为晚三叠世诺利期(227.0~208.5Ma)的晚期, 该时期也是天桥岭植物群最为繁盛的时期. 本次报道的测年新成果不仅为天桥岭植物群与其他晚三叠世植物群(如西南日本和俄罗斯南滨海等)对比提供了一个确切的年代学证据, 而且对深入理解包括中国吉林东部、俄罗斯南滨海以及西南日本在内的“东亚三角区”晚三叠世地质以及古植物地理分区等具有重要意义.

关键词 晚三叠世, 天桥岭植物群, U-Pb锆石, 中国东北

1 引言

中国三叠纪广泛分布了海相和陆相地层, 其多有地层结构复杂、沉积类型多样及地层发育不均衡等特点, 各地区地层及研究程度差异较大, 大部分地区的研究尚有待深入(米家榕等, 1993; 童金南等, 2019). 目前, 除华南地区早、中三叠世地层研究较为详细(Yin等, 2001; Yu等, 2015; 童金南和殷鸿福, 2015; Li等, 2018; Liu等, 2020)外, 许多晚三叠世陆相地层由于缺乏海陆

交互相地层对比, 其时代及地层对比研究仍待深入, 这也是我国三叠系地层研究中亟待解决的问题之一(童金南等, 2019). 我国东北吉林汪清天桥岭地区晚三叠世陆相地层发育(图1a), 并在其中发现了著名的天桥岭植物群; 该植物群地处我国东北, 但具有晚三叠世南方型植物群(*Dictyophyllum-Clathropteris* flora)特征. 它的发现不仅重塑了对中国晚三叠世古植物地理分区的理解, 而且对中国吉林东部、俄罗斯南滨海以及日本西南部等地区晚三叠世植物群的生物地层对比及古

中文引用格式: 冯玉辉, 杨涛, 梁飞, 孙革. 2021. 中国吉林晚三叠世天桥岭植物群时代的确定: 来自LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄的证据. 中国科学: 地球科学, 51(5): 734–740, doi: [10.1360/N072020-0277](https://doi.org/10.1360/N072020-0277)

英文引用格式: Feng Y, Yang T, Liang F, Sun G. 2021. New U-Pb zircon ages document Late Triassic Tianqiaoling flora of eastern Jinlin, NE China. Science China Earth Sciences, 64(5): 807–812, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9707-4>

图1 晚三叠世天桥岭植物群分布及地层特征

(a) 天桥岭植物群化石分布及同位素测年样品位置平面图; (b) 大兴沟群岩性剖面及天桥岭植物群化石分布综合柱状图

植物地理区划等研究提供了重要依据(孙革, 1979, 1993). 天桥岭植物群时代已被认定为晚三叠世, 主要依据古生物资料, 一方面, 依据天桥岭植物群的植物组合典型特征(网叶蕨-格子蕨组合等); 另一方面, 依据其与发育于海陆交互相地层的俄罗斯南滨海(Shorokhova等, 2009)和日本西南部(Kimura, 1980; Yukawa等, 2012)植物群的对比. 由于天桥岭植物群发育于非海相地层, 一直缺少可靠的同位素年代学证据, 因此, 天桥岭植物群的准确时代至今仍未确定, 这也是长期困扰着我国古生物学家一个科学难题.

近年来, 关于天桥岭植物群和/或相关地层的年龄数据已经有一些报道, 但都很难对天桥岭植物群准确年龄进行限定. 李超文等(2007)等利用Ar-Ar方法, 对马鹿沟组下伏三仙岭组的两个安山岩样品进行了年代学分析, 其年龄分别为(115.4±0.6)和(116.7±0.6)Ma, 指示了天桥岭植物群属于早白垩世. 这一测年结果与

古生物证据明显矛盾(孙革, 1993). Xu等(2009)利用LA-ICP-MS锆石U-Pb方法, 对马鹿沟组上覆天桥岭组顶部流纹岩进行了年代学分析, 其年龄为(201±1)Ma; 由于天桥岭组火山岩较厚(853m), 且喷发频率不确定, 因此该年龄也难以限定天桥岭植物群的准确年龄. 孙革(1993)利用单矿物K-Ar法, 对大兴沟群(吉林省地质矿产局, 1993)最底部托盘沟组的安山岩样品进行年代学分析, 其年龄为(211.4±6.0)Ma; 但由于托盘沟组与其顶部天桥岭植物群所在的三仙岭组地层呈不整合接触, 因此该年龄结果也不能作为直接的参考. Xu等(2009)等利用LA-ICP-MS锆石U-Pb方法, 对黑龙江省东宁罗圈站组的流纹岩进行年代学分析, 其年龄分别为(217±1)、(214±2)和(208±1)Ma. 但由于黑龙江省东宁与吉林省天桥岭组距离较远(约130km), 其区域地层对比的可靠性仍有待探讨, 因此, 东宁的罗圈站组测年结果对限定天桥岭植物群准确年龄似缺乏实

际意义。本研究在详细野外地质剖面测量的基础上, 在天桥岭组底部紧挨着天桥岭植物群、并与之呈整合接触的层位上获得同位素测年样品, 该年龄似可较好地限定天桥岭植物群的确切年龄。

2 地层特征

天桥岭植物群位于大兴沟群, 发育于一套陆相碎屑沉积夹中酸性火山岩组合之中。大兴沟群地层自下而上包括托盘沟组、三仙岭组、马鹿沟组和天桥岭组, 其中后三组地层呈整合接触关系(吉林省地质矿产局, 1993)(图1b)。本文基于野外地质剖面, 详细描述了各个组岩性和古生物特征。三仙岭组主要为一套酸性火山岩夹中性火山岩以及碳质板岩组合, 在该组顶部碳质板岩中共发现了9个植物化石分类群, 其中, 霍尔新芦木(*Neocalamites hoerensis*)、卡勒莱新芦木(*N. carrerei*)、线形长门球果(*Nagatostrobis linearis*)、斯瓦比准苏铁果(*Cycadocarpidium swabii*)和带羊齿(*Taeniopteris*)等都是晚三叠世植物的典型分子(孙革, 1993; Shorokhova等, 2009)。马鹿沟组主要由凝灰质砂岩和粉砂岩、碳质粉砂岩、粉砂质板岩以及中性火山岩组

成, 共发育两个化石层: 一个化石层位于该组底部, 其中发现9个植物化石分类群, 如雅致格子蕨(*Clathropteris elegans*)、爱尔特曼准苏铁果(*Cycadocarpidium erdmanni*)、间离苏铁杉(*Podozamites distans*)和雅致穗杉(*Stachyotaxus elegans*)等; 另一化石层位于该组顶部, 共发现30属71种植物化石, 其中包括双扇蕨科、苏铁类、银杏类和准苏铁果等。上述两个化石层的植物均可与晚三叠世西南日本成羽植物群(Kimura, 1980)和俄罗斯南滨海阿姆巴植物群(Shorokhova等, 2009)相对比。天桥岭组主要为一套酸性火山岩组合, 目前尚未发现化石。基于各组岩性和古植物化石特征分析, 天桥岭植物群可能形成于三仙岭组顶部、结束于马鹿沟组顶部时期, 并在马鹿沟组沉积后期最为繁盛。

3 材料与方法

锆石U-Pb测年样品TQL-1(43°34'06"N, 129°37'56"E)采自于吉林汪清天桥岭嘎牙河西侧天桥岭组底部火山岩层(图1a)。通过岩石学分析, 该样品岩性为流纹岩(图2a、2b), 主要由流纹质火山玻璃脱玻化形成的长英质微晶(~95%)、酸性斜长石斑晶(~4%)和石英斑晶

图2 同位素测年样品(流纹岩)照片

(a) 样品野外照片; (b) 样品手标本照片; (c) 样品偏光显微镜照片(单偏光); (d) 样品偏光显微镜照片(正交偏光)

图 3 同位素测年样品部分锆石阴极发光图像及测年结果

(a) 部分锆石阴极发光图像及年龄; (b), (c) 同位素测年样品谐和图; (d) 同位素测年样品加权平均年龄

(~1%)组成, 在偏光显微镜下可见明显的流纹构造(图 2c、2d)。

测年样品锆石的分选、挑纯、制靶及照相均在河北省廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成; 样品经过碎样、手工淘洗、电磁分选和重液分选等操作后, 在双目显微镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒, 并将选取的锆石颗粒固定在环氧树脂中, 打磨、抛光至锆石核部。阴极发光图像主要用来观察各

个锆石颗粒内部环带结构, 同时结合锆石的反射和透射图像, 选取各个锆石分析位置。锆石U-Pb测试是在中国科学院海洋研究所大洋岩石圈与地幔动力学重点实验室完成, 测试所用仪器为ICP-MS (Agilent 7900)和Analyte Excite 193nm (Photon Machines公司)激光剥蚀系统, 激光斑束直径为25 μm, 频率为8Hz, 能量密度约为 10.61 J cm^{-2} , 以He为载体。锆石测年采用国际标准锆石91500和GJ-1作为外标(Jackson等, 2004), 元素含量

表 1 TQL-1样品LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄数据

样品点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)				和谐度	
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
TQL-1-1	30.1287	71.8597	0.4193	0.2098	0.0123	0.0325	0.0009	0.0104	0.0005	76.0	133.3	193.4	10.3
TQL-1-2	48.8342	98.4736	0.4959	0.2514	0.0109	0.0328	0.0007	0.0107	0.0004	501.9	109.2	227.7	8.9
TQL-1-3	41.3666	90.4110	0.4575	0.2458	0.0123	0.0329	0.0007	0.0104	0.0004	398.2	114.8	223.2	10.0
TQL-1-4	39.4761	85.5313	0.4615	0.3031	0.0168	0.0417	0.0009	0.0123	0.0005	338.9	125.0	268.8	13.1
TQL-1-5	28.3539	69.1937	0.4098	0.2605	0.0137	0.0345	0.0008	0.0114	0.0006	455.6	135.2	235.1	11.0
TQL-1-6	28.0180	80.7364	0.3470	0.2343	0.0119	0.0343	0.0008	0.0116	0.0006	211.2	120.4	213.8	9.8
TQL-1-7	89.4613	146.9243	0.6089	0.2390	0.0105	0.0330	0.0007	0.0109	0.0004	298.2	98.1	217.6	8.6
TQL-1-8	37.9494	88.3323	0.4296	0.2444	0.0114	0.0338	0.0006	0.0108	0.0004	324.1	108.3	222.0	9.3
TQL-1-9	24.1968	61.9093	0.3908	0.2329	0.0119	0.0329	0.0007	0.0108	0.0005	322.3	122.2	212.6	9.8
TQL-1-10	30.7454	77.8556	0.3949	0.2497	0.0122	0.0338	0.0008	0.0117	0.0005	416.7	116.7	226.4	10.0
TQL-1-11	16.8825	49.8318	0.3388	0.2273	0.0137	0.0330	0.0009	0.0116	0.0006	250.1	205.5	208.0	11.3
TQL-1-12	31.8784	78.1331	0.4080	0.2528	0.0127	0.0347	0.0008	0.0104	0.0005	353.7	114.8	228.8	10.3
TQL-1-13	21.2519	56.9551	0.3731	0.2647	0.0155	0.0350	0.0008	0.0130	0.0009	461.2	132.2	238.5	12.4
TQL-1-14	34.0120	79.8248	0.4261	0.2339	0.0120	0.0333	0.0007	0.0104	0.0004	239.0	118.5	213.4	9.9
TQL-1-15	175.6935	242.6602	0.7240	0.2462	0.0083	0.0335	0.0007	0.0111	0.0003	366.7	77.8	223.5	6.7

采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NISTSRM610 作为外标(侯可军等, 2009; 耿建珍等, 2011). 本次共测试了 25 颗锆石, 为保证测试的精确度, 测试过程为每分析 5 个样品点, 分析一次 NIST SRM610、两次 91500、一次 GJ-1. 样品同位素比值和元素含量计算采用的是 ICPMSDataCal 11 软件, 其加权平均年龄计算和谐和图绘制采用的是 Isoplot 3.0 软件(Liu 等, 2008).

4 结果

锆石 U-Pb 测年样品(TQL-1)测试数据和计算结果见表 1, 代表性锆石阴极发光图像以及各个锆石分析位置和年龄值见图 3a, 样品谐和图和加权平均年龄见图 3b~3d. 本次对 25 颗锆石分析了 25 个测点, 其中有 10 个测点谐和度小于 90%, 其余的 15 个测点谐和度均大于 90%, 其年龄为 $(206.4 \pm 5.5) \sim (263.2 \pm 5.4)$ Ma. 这 15 颗锆石阴极发光图像显示锆石的晶体形态较好, 呈粒状或短柱状, 具有明显的震荡环带结构, 且具有较高的 Th/U 比值, 为 $0.35 \sim 0.72$, 指示了其均属于岩浆锆石(Koschek, 1993). 在这 15 颗锆石中, 有 1 颗锆石年龄分布较独立, 其年龄为 (263.2 ± 5.4) Ma, 推测其可能为捕获的早期形成的岩浆锆石; 其余 14 个锆石多呈自形与半自形, 粒径为 $100 \sim 150 \mu\text{m}$, 长宽比值为 $1 \sim 2.5$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $206.4 \sim 221.6$ Ma, 年龄分布较集中并且均落到谐和曲线上或附近, 表明其可能为统一来源, 来源于本次测试的流纹岩样品, 其加权平均年龄为 (212.8 ± 2.5) Ma ($n=14$, MSWD=0.99), 这一年龄代表了该流纹岩样品的岩浆结晶年龄.

5 讨论与结论

天桥岭植物群与国内外已知的、以网叶蕨-格子蕨植物群为特征的晚三叠世植物群具有较好的可比性, 其中包括与我国华南(孙革等, 1995)以及瑞典(Kustatscher 等, 2018)、日本西南部(Kimura, 1980; Yukawa 等, 2012)、吉尔吉斯伊塞克-库尔(Genkina, 1966; Sun 等, 2010)、俄罗斯南滨海(Shorokhova 等, 2009)和东格陵兰(Hubbard 和 Boulter, 2000)等地区的晚三叠世植物群的对比. 在这些地区中, 天桥岭植物群与西南日本成羽和山口晚三叠世植物群以及俄罗斯南滨海蒙古盖晚

三叠世植物群特征最为接近, 三个植物群中至少有 25 个种为共有或可对应比较, 这也指示了天桥岭植物群在东亚区域地层对比中的重要意义.

天桥岭组底部流纹岩样品 U-Pb 同位素年龄为 (212.8 ± 2.5) Ma, 该同位素测年结果与古生物证据基本一致(孙革, 1993), 表明天桥岭组初始沉积和马鹿沟组结束沉积的时间为晚三叠世诺利期($227.0 \sim 208.5$ Ma)晚期, 同时该时期也是天桥岭植物群最为繁盛的时期. 因此, 该年龄的确定不仅为天桥岭植物群与其他晚三叠世植物群(如西南日本成羽与山口植物群以及俄罗斯南滨海阿姆巴植物群等)对比提供了一个确切的年代学证据(Shorokhova 等, 2009; Yukawa 等, 2012; Masaoka 和 Suzuki, 2015), 而且对更好地理解包括中国吉林东部、俄罗斯南滨海以及日本西南部在内的“东亚三角区”晚三叠世地质以及古植物地理区具有重要意义.

参考文献

- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报, 30: 1508–1513
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28: 481–492
- 吉林省地质矿产局. 1993. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社. 698
- 李超文, 郭锋, 范蔚茗, 高晓峰. 2007. 延吉地区晚中生代火山岩的 Ar-Ar 年代学格架及其大地构造意义. 中国科学: 地球科学, 37: 319–330
- 米家榕, 张川波, 张春林, 罗桂昌, 孙跃武, 刘人惠, 于菁珊, 董国义, 沈炎彬, 洪友崇, 常建平. 1993. 中国环太平洋带北段晚三叠世地层古生物及古地理. 北京: 科学出版社. 285
- 孙革. 1979. 准苏铁果属(Cycadocarpidium)在吉林汪清县晚三叠世地层的发现. 古生物学报, 18: 312–325
- 孙革. 1993. 中国吉林天桥岭晚三叠世植物群. 长春: 吉林科学技术出版社. 157
- 孙革, 孟繁松, 钱立君, 欧阳舒. 1995. 三叠纪植物群. 见: 李星学, 编. 中国地质时期植物群. 广州: 广东科技出版社. 695
- 童金南, 楚道亮, 梁蕾, 舒文超, 宋海军, 宋婷, 宋虎跃, 吴玉祥. 2019. 中国三叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 194–226
- 童金南, 殷鸿福. 2015. 三叠纪年代地层与中国建阶. 地球科学——中国地质大学学报, 40: 189–197
- Genkina R Z. 1966. Fossil Flora and Stratigraphy from Older Mesozoic Deposits of Issyk-kul Basin, Kyrgyzstan (in Russian). Moscow:

- Nauka. 148
- Hubbard R N L B, Boulter M C. 2000. Phytogeography and paleoecology in western Europe and eastern Greenland near the Triassic-Jurassic boundary. *Palaios*, 15: 120–131
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) to *in situ* U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 211: 47–69
- Kimura T. 1980. Professor Saburo Kon'no Memorial Volume. Tsukuba: The University of Tsukuba. 379–413
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *J Microsc*, 171: 223–232
- Kustatscher E, Ash S R, Karasev E, Pott C, Vajda V, Yu J X. 2018. The Late Triassic World. Cham: Springer. 785
- Li M S, Huang C J, Hinnov L, Chen W Z, Ogg J, Tian W. 2018. Astrochronology of the Anisian stage (Middle Triassic) at the Guandao reference section, South China. *Earth Planet Sci Lett*, 482: 591–606
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chem Geol*, 257: 34–43
- Liu Z, Selby D, Zhang H, Shen S. 2020. Evidence for volcanism and weathering during the Permian-Triassic mass extinction from Meishan (South China) osmium isotope record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 553: 109790
- Masaoka Y, Suzuki S. 2015. Facies analysis of the Jito Formation (Upper Triassic Nariwa Group) in Jito Area, Kawakami, Okayama Pref. SW Japan. Okayama Univ Earth Sci Report, 22: 31–39
- Shorokhova S, Volynets E, Sun G, Zinkov A. 2009. Atlas of the Late Triassic Flora of Primorye (in Russian). Vladivostok: DVG TU Press. 204
- Sun G, Miao Y, Mosbrugger V, Ashraf A R. 2010. The upper Triassic to middle Jurassic strata and floras of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China. *Palaeobio Palaeoenv*, 90: 203–214
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, Meng E, Yu Y, Yang D B, Zhang X Z. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 34: 392–402
- Yin H F, Zhang K X, Tong J N, Yang Z Y, Wu S B. 2001. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 24: 102–114
- Yu J X, Broutin J, Chen Z Q, Shi X, Li H, Chu D L, Huang Q S. 2015. Vegetation changeover across the Permian-Triassic boundary in Southwest China. *Earth-Sci Rev*, 149: 203–224
- Yukawa H, Terada K, Sun G, Suzuki S. 2012. The oldest fossil forest in Japan discovered from the Upper Triassic Nariwa Group, Okayama Prefecture, SW Japan—Implication for reconstruction of depositional environment and paleovegetation. Okayama University Earth Sci Report, 19: 25–37

(责任编辑: 朱茂炎)