

# 华南地区二叠纪-三叠纪界线酸性火山灰的源区与规模\*

王曼<sup>1,2</sup> 钟玉婷<sup>1</sup> 侯莹玲<sup>3</sup> 沈树忠<sup>4</sup> 徐义刚<sup>1</sup> 何斌<sup>1\*\*</sup>

WANG Man<sup>1,2</sup>, ZHONG YuTing<sup>1</sup>, HOU YingLing<sup>3</sup>, SHEN ShuZhong<sup>4</sup>, XU YiGang<sup>1</sup> and HE Bin<sup>1\*\*</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 广东石油化工学院, 茂名 525000

4. 中国科学院南京古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China

4. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Nanjing 210008, China

2017-08-02 收稿, 2017-11-03 改回.

**Wang M, Zhong YT, Hou YL, Shen SZ, Xu YG and He B. 2018. Source and extent of the felsic volcanic ashes at the Permian-Triassic boundary in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1):36–48**

**Abstract** Highly correlated with the Permian-Triassic Boundary (PTB) Mass Extinction in stratigraphy, volcanic ashes around the PTB in South China have been suggested to be a likely cause of the PTB Mass Extinction. So the nature, source and extent of the volcanic ashes are significant in figuring out the cause of the PTB Mass Extinction. In this study, we attempt to constrain the source and extent of the PTB volcanic ashes in South China by studying pyroclastic sedimentary rocks and the spatial distribution of tuffs and ashes in South China. The detrital zircons of tuffaceous sandstones from the Penglaitan section yield an age spectrum peaked at 252Ma, with 80% of zircons U-Pb ages in  $235 \pm 2.7$  Ma ~  $258 \pm 4.8$  Ma, 11% in  $260 \pm 3.2$  Ma ~  $276 \pm 3.6$  Ma, six in  $294 \pm 5.8$  Ma ~  $561 \pm 6.9$  Ma, five from Proterozoic, and the oldest age is  $2063 \pm 13.4$  Ma. The results of  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values varying from  $-16.5 \sim -5.0$ , and Nb/Hf, Th/Nb and Hf/Th ratios of detrital zircons from the Penglaitan section are similar to those from arc/orogenic-related settings. Coarse tuffaceous sandstones (0.5 ~ 2mm) imply that their source is in limited distance. Those pyroclastic sedimentary rocks in Penglaitan are well correlated with the PTB volcanic ashes in Meishan GSSP section in stratigraphy. In the spatial distribution, pyroclastic sedimentary rocks and tuffs distribute only in southwest of South China, while finer volcanic ashes (<0.3mm) are mainly in the northern part. This spatial distribution suggests the source of tuffs and ashes was to the south or southwest of South China. Former studies, especially that of Permian-Triassic magmatism in Hainan Island and Early Mesozoic acid volcanic rocks in Southwest Guangxi have supported the existence of a continental arc related to the subduction and closure of Palaeo-Tethys on the southwestern margin of South China during Permian. It is suggested that the PTB ashes possibly derived from this Paleo-Tethys continental arc. The fact that contemporaneous volcanic ashes haven't been reported or found in North China or Northwest China implies a limited extent of the volcanism, which thus is too small to cause the PTB Mass Extinction.

**Key words** Pyroclastic rock; Volcanic ash; South China; Paleo-Tethys continental arc; Permian-Triassic Boundary Mass Extinction

**摘要** 华南地区二叠纪-三叠纪之交(Permian-Triassic Boundary, 简称 PTB)火山灰与生物灭绝事件在地层层位上高度相关,可能是灭绝事件的触发因素之一,对其成因、来源和规模的研究具有重要科学意义。本研究在对广西来宾地区蓬莱滩剖

\* 本文受国家自然科学基金项目(41173037, 41573028)资助。

第一作者简介: 王曼, 女, 1992年生, 博士生, 岩石地球化学专业, E-mail: wangman@gig.ac.cn

\*\* 通讯作者: 何斌, 男, 1963年生, 研究员, 地质学与地球化学专业, E-mail: hebin@gig.ac.cn

面大隆组顶部凝灰质砂岩岩相学研究的基础上,通过碎屑锆石年代学、Hf 同位素及微量元素的分析,结合华南地区 PTB 凝灰岩和火山粘土岩时空分布特征对其源区和规模进行讨论和限定。蓬莱滩剖面大隆组顶部 2 个凝灰质砂岩样品中 81% 的碎屑锆石 U-Pb 年龄集中在  $235 \pm 2.7\text{Ma} \sim 258 \pm 4.8\text{Ma}$  之间,呈现出  $\sim 252\text{Ma}$  的单一峰值;11% 的锆石年龄为  $260 \pm 3.2\text{Ma} \sim 276 \pm 3.6\text{Ma}$ ;年龄为  $294 \pm 5.8\text{Ma} \sim 561 \pm 6.9\text{Ma}$  的锆石 6 颗;元古宙锆石 5 颗,最老年龄为  $2063 \pm 13.4\text{Ma}$ 。样品中晚二叠世碎屑锆石的 Hf 同位素表现出地壳来源特征,除一颗锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $+10.3$  外,其余均落在  $-16.5 \sim -5.0$  之间,与华南 PTB 典型剖面基本一致。碎屑锆石 U-Th-Hf-Nb 微量元素特征显示其具有来源于大陆岩浆弧的属性。蓬莱滩剖面凝灰质砂岩中存在大量粒径  $0.5 \sim 2\text{mm}$  的晶屑,部分粒径甚至达到  $3\text{mm}$ ,这些粗粒火山碎屑物暗示该剖面距离火山口源区较近。蓬莱滩剖面火山碎屑物的锆石 U-Pb 年龄和地层位置与华南 PTB 火山灰基本一致,并具有相似的锆石 Hf 同位素和微量元素特征,表明两者可能来自同一源区。在空间分布上,华南地区 PTB 附近的火山碎屑沉积岩和较粗的凝灰岩仅出现在华南的西南部,而华南北部主要分布粒度小于  $0.3\text{mm}$  的细粒火山灰,火山碎屑粒度由西南向东北逐渐减小的规律表明火山物质来源于华南西南缘。近年来,包括海南岛二叠纪花岗岩及桂西南酸性火山岩在内的众多证据表明华南板块西南缘存在一个二叠纪大陆岩浆弧。因此,本文提出华南 PTB 火山灰可能来源于华南板块西南缘古特提斯大陆岩浆弧。PTB 火山灰仅分布在华南地区,在华北、西北等地区均未发现或报道同时期的火山灰,说明与这次俯冲作用相关的弧岩浆火山喷发规模有限,推测其不是触发全球性 PTB 生物灭绝事件的主要原因。

**关键词** 火山碎屑岩;华南地区;火山灰;古特提斯岩浆弧;PTB 生物灭绝事件

**中图法分类号** P317; P597.3

二叠纪-三叠纪之交 (Permian-Triassic Boundary, 简称 PTB) 全球发生了显生宙最大的生物灭绝事件,造成了 90% 以上的海洋生物种,70% 的陆生脊椎动物属和大多数的陆生植物灭绝 (Erwin, 1994; Jin *et al.*, 1994, 2000; Stanley and Yang, 1994)。对这次生物灭绝事件成因与机制的研究一直是地球科学研究的重大课题和前沿领域 (殷鸿福和宋海军, 2013)。在华南地区 PTB 生物灭绝层位上下普遍发育多层粘土岩,覆盖面积超过  $1 \times 10^6\text{km}^2$  (Yin *et al.*, 1989; Jin *et al.*, 2000)。20 世纪 80 年代我国学者首先发现这些 PTB 粘土岩中具有酸性喷发岩中典型的六方双锥石英,并讨论了生物灭绝事件与华南酸性火山活动的关系 (何锦文等, 1987; 吴顺宝等, 1990)。华南 PTB 界线粘土岩低的  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值也表明其可能为酸性火山作用的产物 (Clark *et al.*, 1986; Zhou and Kyte, 1988)。Yin *et al.* (1989) 重点研究了浙江煤山剖面、黄石二门剖面、重庆凉风垭剖面的界线粘土岩,发现了石英 (包括六方双锥石英)、磷灰石、锆石、微球粒等火山物质,特别注意到这些火山物质与 PTB 生物灭绝事件在层位上高度相关,故而提出了 PTB 生物灭绝事件的“火山灭绝”假说。进一步的研究发现,生物灭绝事件与火山灰不仅在时间上一致,在强度上也有很好的对应关系,为华南“火山灭绝”假说提供了更有力的证据 (Xie *et al.*, 2005, 2010; He *et al.*, 2014)。可是这一观点遭到国外一些学者的质疑,他们认为华南地区 PTB 火山灰仅是局部火山作用的产物,难以造成全球变化和生物灭绝事件 (Erwin and Vogel, 1992)。因此,对华南 PTB 酸性火山灰源区与规模的研究意义重大。

对华南 PTB 酸性火山灰中锆石 Hf、O 同位素的研究表明其来源于大陆岩浆弧,排除了来自西伯利亚大火成岩省的可能 (He *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2013, 2015)。杨遵仪等 (1991) 根据华南 PTB 凝灰岩的分布特征推测火山口可能位于华南的西南内部,且存在多处、多次的火山喷发。He *et al.*

(2014) 根据华南 PTB 火山灰的层数和厚度分布规律提出其可能来源于东昆仑二叠纪大陆岩浆弧。但高精度牙形石生物地层对比结果显示,华南地区不同剖面 PTB 火山灰层在层位上并不一致 (Yin *et al.*, 2014)。这表明海相地层中火山灰的保存不同于湖相地层,其原始火山灰的沉积厚度可能会受到海浪等水动力条件影响,与火山口距离不存在良好的对应关系,因此利用火山灰的层数和厚度推测其源区的依据不够。因此到目前为止,对华南地区 PTB 酸性火山灰源区和规模这一科学问题还没有令人信服结论。

华南 PTB 界线附近火山碎屑岩岩性复杂,以往报道较多的为火山灰蚀变成因粘土岩、蚀变凝灰岩等 (杨遵仪等, 1991; Gao *et al.*, 2013, 2015)。近年来,广西蓬莱滩剖面的凝灰质砂岩受到关注,并在锆石高精度同位素定年方面取得了重要成果 (Shen *et al.*, 2011; Baresel *et al.*, 2017a, b)。但对于蓬莱滩剖面凝灰质砂岩的岩石成因及其与华南其他 PTB 剖面火山碎屑岩成因关系的研究甚少。在定年方法上,采用 CA-TIMS 技术可获得高精度年龄结果,对限定地层年龄具有重大意义,但由于耗时且价格昂贵,难以进行大量分析; LA-ICPMS 定年技术虽然精度一般,但具有可快速获得大量年龄数据的优势,对碎屑锆石源区的研究有重要作用。因此,将两种方法结合讨论会获得更为可靠的结果。本文试图通过岩相学、碎屑锆石的年代学、Hf 同位素及微量元素等手段对蓬莱滩剖面凝灰质砂岩进行系统研究,并结合华南地区 PTB 凝灰岩和火山粘土岩时空分布特征对华南酸性火山灰的源区和规模进行讨论和限定,进而讨论其与生物灭绝事件的关系。

## 1 地质背景与样品镜下特征

华南板块由扬子地块和华夏地块于中元古代晚期-新元

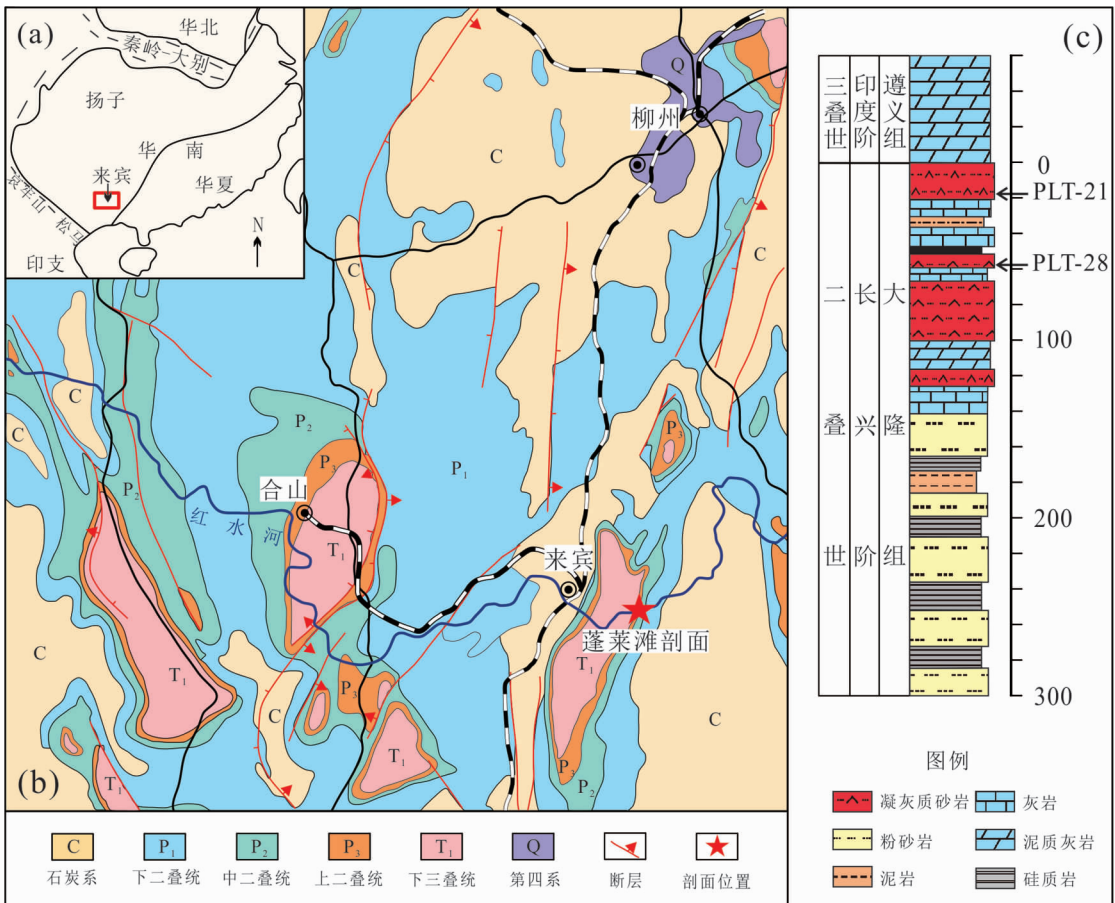


图1 来宾地区位置图(a)、区域地质图(b, 据 Shen *et al.*, 2007)及剖面柱状图(c, 据 Shen *et al.*, 2007)

Fig. 1 Locality map (a) and geological map (b) in the Laibin area of Guangxi, South China and stratigraphic column and sampling locations for the Dalong Formation at the Penglaitan section (c) (modified after Shen *et al.*, 2007)

古代早期碰撞拼合形成, 江南造山带为拼合形成的缝合带 (Ye *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009)。板块北边以秦岭-大别山造山带与华北克拉通相隔, 其东缘为中国南海, 西南缘以金沙江-哀牢山-Song Ma 造山带与印支板块相隔 (图 1a)。

从泥盆纪至二叠纪初期, 华南板块经历了不同程度的拉张裂隙作用, 造成沉积分异, 形成坳垒相间的古地理格局 (秦建华等, 1996)。整个二叠纪华南板块的古地理格局具有继承性, 主要格局都是以中部广阔的浅水碳酸盐岩台地为主, 在北部和东北部、南部及西南部为深水盆地, 深水盆地中发育孤立碳酸盐岩台地 (冯增昭等, 1996)。

滇黔桂盆地位于华南板块西南部, 其二叠系乐平统包括吴家坪阶和长兴阶。该盆地及邻区的乐平统, 沉积相类型多样, 地层发育较为完整。在连陆台地上, 吴家坪阶为一套含煤碎屑岩系地层, 而且在孤立台地上的灰岩层中也发育煤层, 连陆台地边缘和孤立台地的迎风浪部分主要为颗粒滩相灰岩。长兴阶, 连陆台地上主要由开阔海台地相灰岩组成, 在孤立台地上以及连陆台地边缘为一套海绵生物礁灰岩。在台盆中, 乐平统为一套盆地相泥页岩夹硅质岩; 在钦州至防城一带, 覆盖在深水盆地相地层之上的是巨厚的乐平统磨

拉石粗碎屑岩地层。大隆组位于长兴阶顶部(长兴组灰岩地层之上), 沉积在滇黔桂盆地的连陆台地中, 常常以硅质岩为特征, 向连陆台地边缘逐渐变薄尖灭, 被解释为二叠纪晚期碳酸盐台地初始淹没的产物, 其分布范围与长兴组一致; 在广西来宾至合山一带较厚, 成为长兴阶的中上部 (梅真相等, 2007)。

广西来宾地区位于滇黔桂盆地东部, 在来宾市以东约 20km 的红水河岸边 (Jin *et al.*, 2006), 构造上属于来宾向斜的东翼 (图 1b)。在红水河北岸出露了厚约 700m 的上二叠统顶部大隆组地层, 其下部以硅质岩、页岩夹粉砂岩为主, 中部主要为页岩, 上部为粉砂岩、泥岩、灰岩, 顶部为凝灰质砂岩夹灰岩, 凝灰质砂岩厚度约为 60m (图 1c)。

本研究的样品 PLT-21 和 PLT-28 采自蓬莱滩剖面顶部, PTB 界线之下的凝灰质砂岩层, 层位分别为 140 层和 133 层 (图 1c, Shen *et al.*, 2007)。2 个样品的岩性一致, 均为凝灰质长石粗砂岩, 样品中碎屑颗粒占 70% ~ 80%, 粒径为 0.5 ~ 2mm, 主要为钾长石 (30%)、斜长石 (15% ~ 20%)、石英 (10% ~ 15%)、岩屑 (7%) 和不透明矿物 (3%)。长石为半自形-自形, 石英为他形-半自形, 分选中等, 颗粒磨圆度呈两

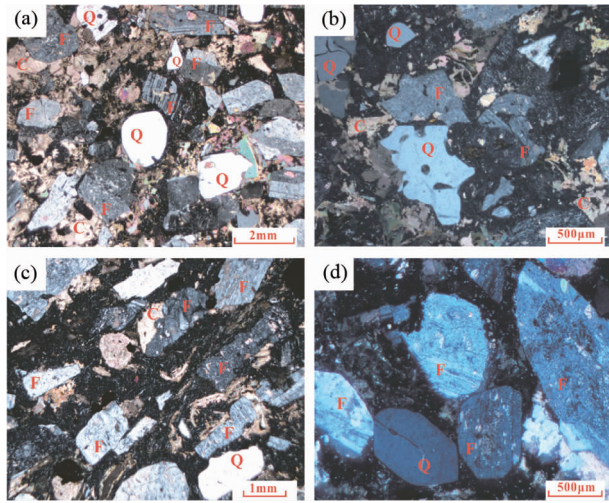


图2 样品 PLT-21 (a) 和样品 PLT-28 (b-d) 镜下照片 (a、b) 石英晶屑具有溶蚀状港湾及尖锐的棱角状, 长石晶屑为不规则棱角状并发育裂纹; (c) 长石颗粒沿长轴方向定向排列; (d) 长石颗粒存在磨圆现象. Q 为石英; F 为长石, 包括斜长石和钾长石; C 为方解石

Fig. 2 Photomicrographs of samples PLT-21 (a) and PLT-28 (b-d)

Q for quartz; F for feldspar, including plagioclase and potassium feldspar; C for calcite

级分化, 部分颗粒呈棱角状, 部分颗粒磨圆较好(图 2d)。胶结类型为基底式胶结, 胶结物含量占 20% ~ 30%, 以钙质(方解石)胶结为主, 凝灰质胶结为辅。碎屑颗粒多为火山碎屑, 以长石、石英晶屑为主, 含少量酸性火山岩岩屑, 几乎不含玻璃屑。其中石英晶屑具有不规则裂纹及港湾状溶蚀外形, 部分石英晶屑磨圆度高; 长石晶屑主要为斜长石、钾长石, 自形半自形, 表面蚀变严重, 可见明显的裂纹(图 2)。

## 2 分析方法

锆石分选由河北省廊坊地质研究院采用常规重液和电磁分选完成, 所得锆石送中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室制样。用环氧树脂将锆石制作成靶后磨蚀抛光至锆石平面暴露约 1/3 ~ 1/2, 经阴极发光图像分析锆石颗粒的内部结构并选取最佳测试点位置。

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉) LA-ICP-MS 实验室完成, 激光剥蚀系统为 GeoLas2005, ICP-MS 为 Agilent7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气, 氩气为补偿气以调节灵敏度。在等离子体中心气流(Ar + He)中加入少量氮气, 以提高仪器灵敏度和改善分析精度(Hu *et al.*, 2008)。实验数据采用 ICP-MSDataCal 软件进行校正处理(Liu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010a)。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正, 每分析 6 个样品点分析 2 次 91500 标样采用线性内插方式进行校正

(Liu *et al.*, 2010b), 锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐据 Wiedenbeck *et al.* (1995)。锆石样品的 U-Pb 谐和图采用 Isoplot/Ex\_ver4 (Ludwig, 2003) 绘制完成。

锆石 Hf 同位素测定在中国科学院广州地球化学研究所的 MC-ICP-MS(多接收器等离子体质谱)实验室完成, 激光剥蚀系统为 Geolas-193。测定时选用标准锆石 Penglai 作为  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  的参考物质, 分析过程中  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  的值为  $0.282916 \pm 0.000006 (2\sigma, n=230)$ , 与推荐值  $\sim 0.282906$  在误差范围内一致。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  的计算中,  $^{176}\text{Lu}$  的衰变常量为  $1.867 \times 10^{-11}/\text{y}$  (Söderlund *et al.*, 2004), 球粒陨石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282772,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.0332 (Blichert-Toft and Albarède, 1997)。在单阶段模式年龄( $t_{\text{DM}}$ )的计算中, 亏损地幔 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>DM</sub> 为 0.28325, ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>DM</sub> 为 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000); 在两阶段模式年龄  $t_{\text{DM}}^{\text{C}}$  计算时, 平均地壳的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.015 (Griffin *et al.*, 2002)。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石年龄组成特征

样品中的锆石呈无色或淡黄色, 多为柱状半自形-自形晶(图 3)。锆石的 Th/U 比值大部分大于 0.4 (见电子版附表 1), CL 图像显示很好的振荡环带(图 3), 这些特征指示锆石为岩浆成因锆石。对锆石进行测试分析后获得 139 个谐和度  $\geq 90\%$  的数据点, 总体上符合概率统计样本要求。2 个样品的 U-Pb 年龄谱特征相似, 81% 的锆石年龄落在  $235 \pm 2.7\text{Ma} \sim 258 \pm 4.8\text{Ma}$  之间, 显示单一的 252Ma 的峰值(图 4)。2 个样品共有 11% 的锆石年龄在  $260 \pm 3.2\text{Ma} \sim 276 \pm 3.6\text{Ma}$  之间, 这些锆石可能来自早期的火山作用。此外, 样品中均有一定数量年龄更老的锆石, 早二叠世锆石一颗, 年龄为  $294 \pm 5.8\text{Ma}$ ; 石炭纪锆石一颗, 年龄为  $335 \pm 4.3\text{Ma}$ ; 泥盆纪锆石三颗, 年龄分别为  $383 \pm 9.9\text{Ma}$ ,  $403 \pm 14.8\text{Ma}$ ,  $413 \pm 6.2\text{Ma}$ ; 寒武纪锆石一颗, 年龄为  $561 \pm 6.9\text{Ma}$ ; 中-新元古代锆石有四颗, 年龄分别为  $922 \pm 9.2\text{Ma}$ ,  $927 \pm 7.7\text{Ma}$ ,  $1050 \pm 8.9\text{Ma}$ ,  $1116 \pm 8.6\text{Ma}$ ; 最老的锆石为古元古代锆石, 年龄为  $2063 \pm 13.4\text{Ma}$ 。

### 3.2 锆石 Hf 同位素特征

采用 LA-ICP-MS 方法对样品 PLT-21 和 PLT-28 进行锆石原位微区 Lu-Hf 同位素分析, 共测得 130 个数据点(见电子版附表 2)。2 个样品的 Hf 同位素表现出相似的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  特征(图 5a)。在  $235 \pm 2.7\text{Ma} \sim 258 \pm 4.8\text{Ma}$  之间的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值范围为  $-16.5 \sim -5.0$ , 仅有一颗锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $+10.3$ 。年龄在  $260 \pm 3.2\text{Ma} \sim 276 \pm 3.6\text{Ma}$  之间的锆石, 除一个  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-21.0$  外, 其余均落在  $-14.7 \sim -8.1$  之间。 $294 \pm 5.8\text{Ma} \sim 413 \pm 6.2\text{Ma}$  之间的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-12.0 \sim$



图3 蓬莱滩碎屑锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of detrital zircons from Penglaitan section

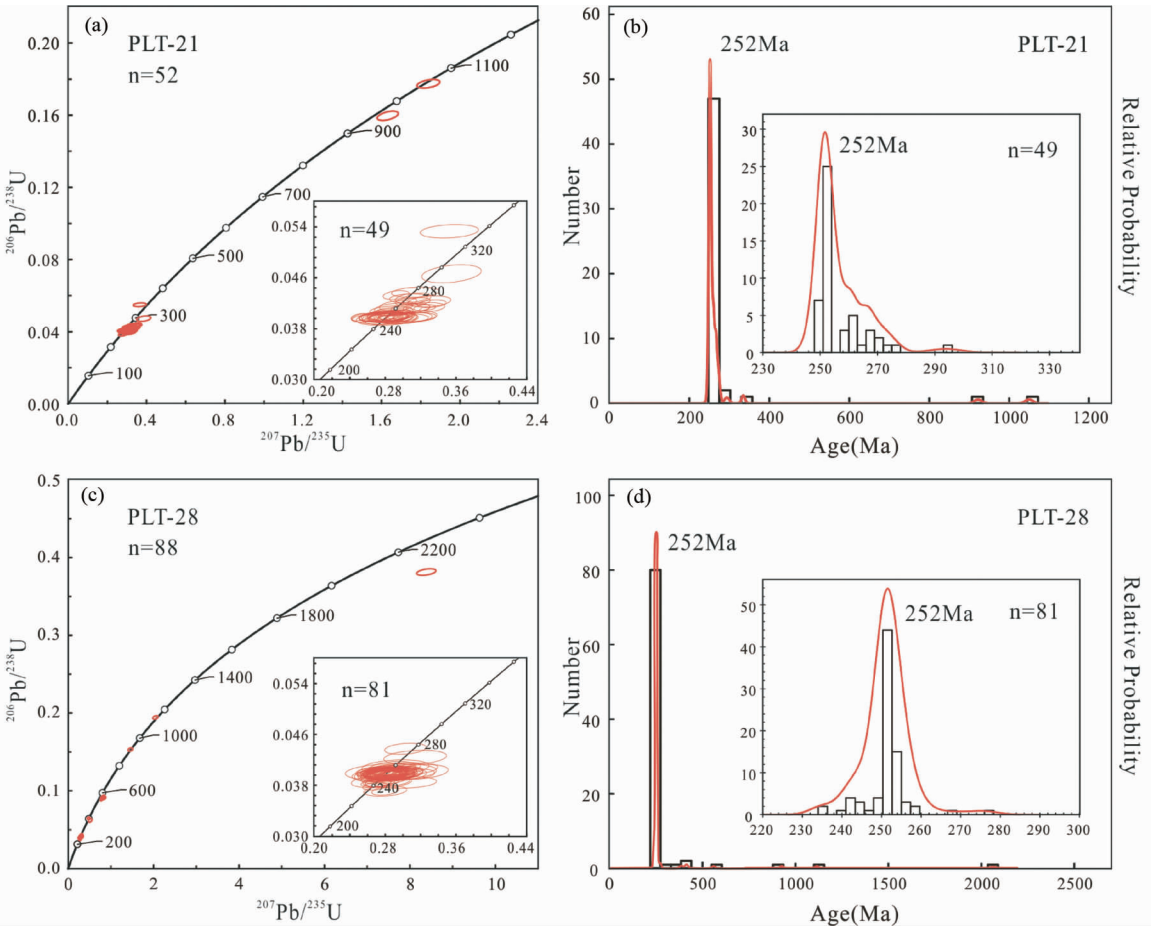


图4 蓬莱滩碎屑锆石 U-Pb 谐和曲线及分布图谱

Fig. 4 Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams and histogram of Penglaitan section

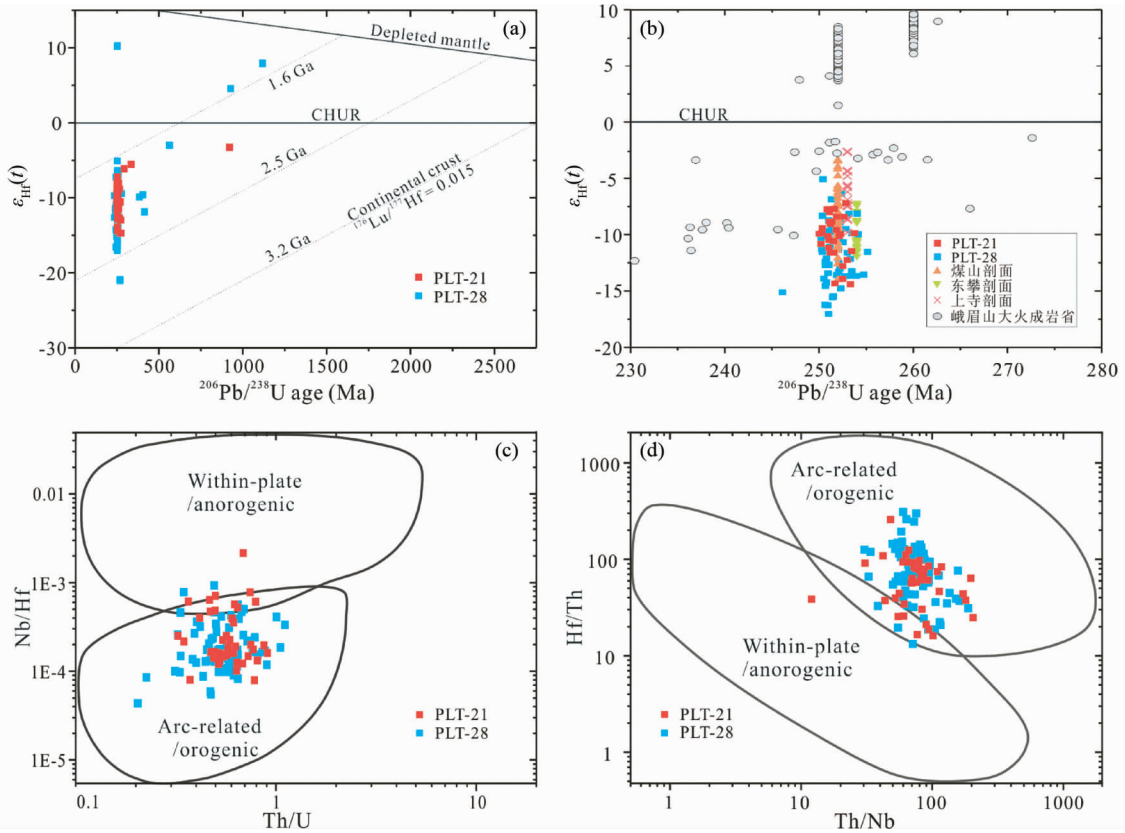


图5 蓬莱滩碎屑锆石 Hf 同位素特征图(a,b)及 Th/U-Nb/Hf (c)和 Th/Nb-Hf/Th (d)图解(c,d,据 Yang *et al.*, 2012)

图5b 中华南其他剖面锆石 Hf 同位素数据来自 He *et al.*, 2014;峨眉山大火成岩省数据来自 Xu *et al.*, 2008;Shellnutt *et al.*, 2009

Fig. 5 Plots of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values versus U-Pb ages (a, b), zircon trace element Th/U vs. Nb/Hf (c) and Th/Nb vs. Hf/Th (d) diagrams (c, d, after Yang *et al.*, 2012) for zircons from tuffaceous sandstone of Penglaitan section

In Fig. 5b; data of other sections of South China is from He *et al.*, 2014; data of ELIPs is from Xu *et al.*, 2008; Shellnutt *et al.*, 2009

-5.6。寒武纪的单颗锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -3.0。中-新元古代的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值以正值为主,范围为 -3.3 ~ +8.0,最老的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 +28。

## 4 讨论

### 4.1 蓬莱滩大隆组是凝灰岩还是凝灰质砂岩?

凝灰岩和凝灰质砂岩追索源区的意义不同,粗粒凝灰岩的火山口源区应该就在附近;凝灰质砂岩离原始火山口源区可能有一定的距离。因此,正确的岩性判断对于火山碎屑源区的研究具有重要意义。

前人提出蓬莱滩剖面存在凝灰岩(广西壮族自治区地质局, 1972<sup>①</sup>),但本研究在野外和室内工作中并未发现凝灰岩。通过野外观察,岩相学、碎屑锆石年代学、大地构造背景及物源分析等,本文认为蓬莱滩大隆组顶部为凝灰质砂岩,不是凝灰岩。这一结论与国内外学者的认识一致(Shen *et al.*, 2007; Baresel *et al.*, 2017a, b)。

岩相学上,正常火山碎屑岩(如凝灰岩)中火山碎屑含量

占绝对优势(>90%),火山碎屑外形不规则,主要为棱角状、次棱角状,常见塑性玻屑或晶屑,一般以火山灰压实胶结为主,分选差。而在蓬莱滩剖面样品中,火山碎屑含量虽然占绝对优势,但碎屑颗粒有一定的分选,部分长石颗粒存在磨圆(图2d),胶结物类型以化学沉积物(钙质)胶结为主,可见方解石解理(图2a)。此外,无论从手标本上还是显微镜下都可观察到晶屑的定向排列(图2c)。这些特征说明蓬莱滩大隆组样品为凝灰质砂岩。

碎屑锆石年代学上,凝灰岩中碎屑物质基本来源于同一次火山喷发,其锆石年龄谱应该呈现极其单一的峰值,但蓬莱滩大隆组样品中除了一组年龄为 ~252Ma(峰值年龄)的锆石外,还存在一定数量早期锆石。锆石高精度(CA-ID-TIMS)U-Pb 定年结果也表明存在大量的早期锆石(Baresel *et al.*, 2017b)。样品中含有一定数量 260 ~ 280Ma、~400Ma 和 ~1000Ma 的碎屑锆石,这些锆石可能是地块抬升剥蚀形成的陆源碎屑,随火山碎屑一起被水流携带搬运至蓬莱滩剖

① 广西壮族自治区地质局. 1972. 中华人民共和国区域地质测量报告 1: 200000 来宾幅(F49-II)(地质部分). 28-36

面。由此可见,碎屑锆石年代学也支持蓬莱滩大隆组样品为凝灰质砂岩而非凝灰岩。

大地构造背景上,来宾地区蓬莱滩一带处于扬子板块腹地,古生代一直为稳定的碳酸盐沉积。在二叠纪长兴阶时期,蓬莱滩一带为NNE向的沉积洼地,其大隆组沉积厚度近700m,显著大于相邻地区(广西壮族自治区地质局,1972)。此外,这套火山碎屑沉积岩仅占大隆组碎屑岩的10%,正常的碎屑岩(粉砂岩、泥岩)野外可见清晰的交错层理,说明当时蓬莱滩物源供给充足,水动力条件强,火山碎屑物更可能是被水流搬运至蓬莱滩沉积下来。

值得注意的是,蓬莱滩剖面大隆组碎屑锆石的峰值年龄与已知PT界线年龄 $251.902 \pm 0.024\text{Ma}$ 相近(Burgess *et al.*, 2014)。碎屑锆石最年轻的峰值可以限定最大沉积年龄,而地层关系上PT界线年龄可以限定最小沉积年龄,当两者相近时则表明这些碎屑锆石为同沉积碎屑锆石,即蓬莱滩凝灰质砂岩中的火山碎屑物质是同时期火山作用形成的火山碎屑岩风化剥蚀而来。高精度CA-TIMS定年结果也显示这些碎屑锆石为同沉积碎屑锆石( $252.062 \pm 0.043\text{Ma}$ , Baresl *et al.*, 2017b)。由于缺乏岩屑等粗粒级火山碎屑颗粒,且分选中等,说明火山碎屑源区距离蓬莱滩有一定距离。然而,蓬莱滩大隆组火山碎屑沉积岩厚达60m,需要大量的火山碎屑物质来源。考虑到当时全球温度升高等变化导致风化速率剧增,火山碎屑岩的快速剥蚀可以提供充足物源,且水动力条件强,所以这种推测是合理的,即蓬莱滩火山碎屑物质是由同时期火山作用形成的火山碎屑岩快速风化剥蚀后被水体迅速搬运沉积于蓬莱滩沉积洼地形成(Chen *et al.*, 2016)。此外,尽管晶屑的磨圆差,但水下凝灰质浊流可以搬运易脆的火山碎屑几百公里远而不发生显著磨蚀(Cas and Wright, 1987)。对于这种特殊成因的火山碎屑沉积岩,追踪物源来源和古水流方向即可指示火山物质来源。

#### 4.2 蓬莱滩大隆组火山碎屑与华南火山灰的同源性

蓬莱滩凝灰质砂岩的发现可为火山碎屑来源提供信息,为确定华南PTB酸性火山灰来源首先需要判断蓬莱滩大隆组火山碎屑物与华南火山灰是否同源。

地层位置上,蓬莱滩凝灰质砂岩位于大隆组的顶部,紧邻二叠-三叠系界线,与华南PTB火山灰和凝灰岩层位一致。生物地层上,蓬莱滩火山碎屑沉积岩和煤山剖面一致,都属于Clarkina meishanensis带(Shen *et al.*, 2007, 2011; Yuan *et al.*, 2014)。高精度同位素年龄上,蓬莱滩火山碎屑沉积岩碎屑锆石峰值年龄及高精度CA-TIMS定年结果( $252.062 \pm 0.043\text{Ma}$ )均与煤山剖面火山灰层年龄( $252.28 \pm 0.08\text{Ma}$ )一致(Shen *et al.*, 2011; Baresel *et al.*, 2017b)。

此外,二者具有相似的晶屑组成和地球化学特征。蓬莱滩凝灰质砂岩的火山碎屑主要为长石、石英晶屑;华南PTB剖面晶屑也为长石、石英,部分剖面由于长石全部蚀变为粘土矿物而只剩下石英晶屑(臧庆兰和江纳言,1980;杨遵仪

等,1991)。而华南PTB火山灰和凝灰岩的岩相学和主微量元素特征也表明其来源于酸性火山喷发(何锦文等,1987;赵天宇等,2013;Clark *et al.*, 1986;Zhou and Kyte, 1988)。地球化学特征上,蓬莱滩火山碎屑沉积岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-16.5 \sim -5.0$ 之间,与煤山、上寺等典型剖面 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(范围为 $-14.0 \sim -2.6$ )基本一致(图5b),均表现出地壳来源特征。

更为重要的是二者发育于同一个华南海盆沉积环境中,并在整个华南地区的空间分布特征上具有连续变化的一致性(见4.4讨论),这一空间分布特征有力佐证二者具有同一来源。

#### 4.3 华南PTB酸性火山碎屑岩岩性变化

华南地区PTB同一层位的火山灰在部分剖面表现为松散未固结的粘土岩,如煤山剖面等;而在部分剖面表现为坚硬的凝灰岩或蚀变凝灰岩,如合山剖面等。为何同一时期相同成分的火山碎屑岩会出现如此大的岩性差异呢?对区域内11条剖面进行对比研究发现,岩性差异主要与火山碎屑类型和火山碎屑粒度相关。火山粘土岩中火山碎屑以玻屑为主,凝灰岩中以晶屑为主;火山粘土岩中玻屑及少量的石英晶屑的粒度小于0.3mm,凝灰岩中晶屑粒度为0.3~2mm(表1)。

相比石英、长石晶屑,火山玻璃更易蚀变为粘土矿物;粒度越小,表面积与体积之比越大,越容易发生蚀变反应。在成岩作用早期细小的玻屑蚀变为粘土矿物,由于粘土矿物易吸水的特性,后期成岩压实作用很难使其固结成岩,因此保留了松散未固结的粘土岩。可见,在华南地区PTB火山粘土岩的出现暗示着火山碎屑粒度较小。

#### 4.4 华南PTB酸性火山碎屑岩空间分布规律

根据火山碎屑岩岩性和火山碎屑粒度变化,华南PTB酸性火山碎屑岩分布可以分为三个区域:Ⅰ区为火山碎屑较粗的凝灰质碎屑岩区,Ⅱ区为可见凝灰岩和火山成因粘土岩区,Ⅲ区主要为火山成因粘土岩(图6a)。

华南二叠-三叠系界线附近,火山碎屑沉积岩主要分布在广西来宾、合山一带,且该区域中火山碎屑粒度较大,如蓬莱滩剖面凝灰质砂岩中晶屑多为1~2mm,最大可达3mm,合山剖面凝灰质砂岩中晶屑一般为3~8mm(臧庆兰和江纳言,1980),因此将该区域划分为Ⅰ区。

凝灰岩主要分布在贵州、广西地区(如贵州盘县、贵州小车河、广西柳州、广西平果等),划分为Ⅱ区。该区域中凝灰岩基本为蚀变凝灰岩,蚀变类型主要有碳酸盐化、硅化及泥化,但仍保留原有岩石结构,如变余斑状结构、变余凝灰结构和假流动构造等(赵天宇等,2013;杨遵义等,1991)。该区火山碎屑普遍较小,粒径多为0.3~0.5mm。位于华南南缘的东攀剖面较为特别,其蒙脱石化凝灰岩中最大的石英晶屑粒径可达3mm(张素新等,2006),推测东攀剖面可能离火山环境更近。

表1 华南 PTB 剖面界线火山碎屑岩对比

Table 1 Features of pyroclastic rocks from PTB sections in South China

剖面	岩性	火山碎屑类型	火山碎屑粒径 (mm)	搬运方式	古地理环境	参考文献
1. 蓬莱滩剖面	凝灰质砂岩	晶屑为主	0.5 ~ 3	水流/空降	斜坡相	本文
2. 合山剖面	凝灰岩	晶屑、玻屑	3 ~ 8	水流/空降	半深海相	臧庆兰和江纳言, 1980
3. 东攀剖面	凝灰岩	晶屑、玻屑	0.3 ~ 3	空降	深海相	赵天宇等, 2013
4. 新民剖面	凝灰岩	玻屑、晶屑	0.5	空降	深海相	高秋灵, 2013
5. 连阳煤田剖面	火山粘土岩	玻屑、晶屑	\	空降	台地相	张德高, 2000
6. 凉风垭剖面	火山粘土岩	玻屑为主	\	远距离空降	台地相	杨遵仪等, 1991
7. 上寺剖面	火山粘土岩	玻屑为主	\	远距离空降	台地相	He <i>et al.</i> , 2014
8. 大峡口剖面	火山粘土岩	玻屑为主	0.01 ~ 0.3	远距离空降	台地相	Gao <i>et al.</i> , 2013
9. 黄石二门剖面	火山粘土岩	玻屑为主	0.02 ~ 0.3	远距离空降	半深海相	杨遵仪等, 1991
10. 牛山剖面	火山粘土岩	玻屑为主	0.01 ~ 0.1	远距离空降	深海相	Liao <i>et al.</i> , 2016
11. 煤山剖面	火山粘土岩	玻屑为主	0.03 ~ 0.3	远距离空降	斜坡相	杨遵仪等, 1991; 何锦文等, 1987; 姜尧发等, 2013; 郑全锋等, 2013

注: 火山粘土岩中火山碎屑粒径为蚀变玻屑或者石英晶屑的粒径

华南北部广阔的区域里, 二叠-三叠系界线附近的火山灰几乎全部蚀变为粘土矿物 (Gao *et al.*, 2013; 杨遵仪等, 1991; Liao *et al.*, 2016; 姜尧发等, 2013), 这些火山成因粘土岩划分为Ⅲ区。从区域上广泛分布且层状产出的特点可以判断, 这些火山灰为空降成因火山灰。由于粒度极细, 火山灰层更容易发生蚀变生成蒙脱石-伊利石混层粘土, 如浙江煤山剖面、四川上寺剖面等。

在火山爆发时, 粒度大的火山碎屑不易作远距离的搬运, 粒度小的火山碎屑则可作长距离的搬运, 火山尘级的火山物质甚至可在大气平流层中搬运到数千千米之外, 即火山喷出的产物有由近火山口向远火山口变细的趋势。因此, 华南 PTB 酸性火山物质粒度在空间上由西南向东北逐渐减小的分布规律暗示着火山源区(火山口)位于华南西南缘。

#### 4.5 华南 PTB 酸性火山灰的来源

晚二叠世时期, 华南板块主要为碳酸盐台地相或深水盆地相, 东西两侧分别为华夏古陆和峨眉山大火成岩省(图 6a)。华夏古陆并未报道存在 250 ~ 260Ma 的岩体, 不能为蓬莱滩剖面提供物质来源 (Wang *et al.*, 2007; Li and Li, 2007; Li *et al.*, 2012)。

峨眉山大火成岩省玄武岩系顶部的凝灰岩层表明在大火成岩省活动末期存在爆发式的火山喷发活动, 且凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为  $251 \pm 1.0$  Ma, 与华南 PTB 火山灰一致, 这一时间的耦合暗示峨眉山大火成岩省可能与 PTB 生物灭绝事件存在成因联系 (朱江等, 2011; 朱江和张招崇, 2013)。从时间上看, 峨眉山大火成岩省有可能成为华南 PTB 火山灰源区, 但同时期的峨眉山花岗岩岩体  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $-4.4 \sim -1.3$ , 显然不同于华南酸性火山灰 ( $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-16.5 \sim$

$-2.6$ ), 这一差异有力地否定了峨眉山大火成岩省成为源区的可能 (图 5b; Xu *et al.*, 2008)。就蓬莱滩剖面而言, 峨眉山大火成岩省更不可能成为源区。从古地理环境分析, 峨眉山大火成岩省与蓬莱滩剖面隔着深水盆地, 距离遥远, 大颗粒的碎屑物质无法依靠水流快速搬运沉积, 而空降火山灰的搬运距离取决于火山活动的规模。如果火山规模较大, 不排除有少量峨眉山的物质沉积在华南海盆的可能。蓬莱滩剖面中可能存在极少量来自峨眉山大火成岩省的物质, 如样品 PLT-28 中  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 10.27 的锆石 (年龄为  $252 \pm 3$  Ma) 可能来自峨眉山大火成岩省。就目前资料而言, 峨眉山大火成岩省不是华南酸性火山灰的源区。

在广西防城-钦州一带沉积了一套巨厚的具磨拉石特点的山麓堆积物, 包括大量砾岩、含砾砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩等碎屑岩沉积 (梁新权等, 2005), 可为蓬莱滩凝灰质砂岩等碎屑岩提供物质来源。进一步研究表明其古水流方向为近北西向和正北向 (Liang and Li, 2005), 指示水流自南向北流向蓬莱滩一带, 可为碎屑物质的搬运提供动力条件。故蓬莱滩大隆组中碎屑物质极可能来自南面的防城-钦州一带。

对于火山碎屑沉积岩或者蚀变粘土岩, 其形成的构造背景很难利用全岩地球化学的判别图解得到, 而锆石由于封闭温度高且抗物理化学蚀变能力强, 因此常用锆石微量元素判别岩石构造背景。Yang *et al.* (2012) 根据岛弧岩浆相对板内岩浆亏损 Nb 元素的特征, 提出了锆石的 Th/Nb-Hf/Th 和 Th/U-Nb/Hf 构造判别图解, 并结合全岩地球化学特征认为贵州-广西 PTB 凝灰岩显示出与岩浆弧相关的亲属性。蓬莱滩剖面样品在该图解中同样显示出与弧环境或后碰撞环境相关的特征 (图 5c, d)。华南东北部 PTB 火山粘土岩锆石微量元素等地球化学特征同样表现出与弧环境或后碰撞环境相



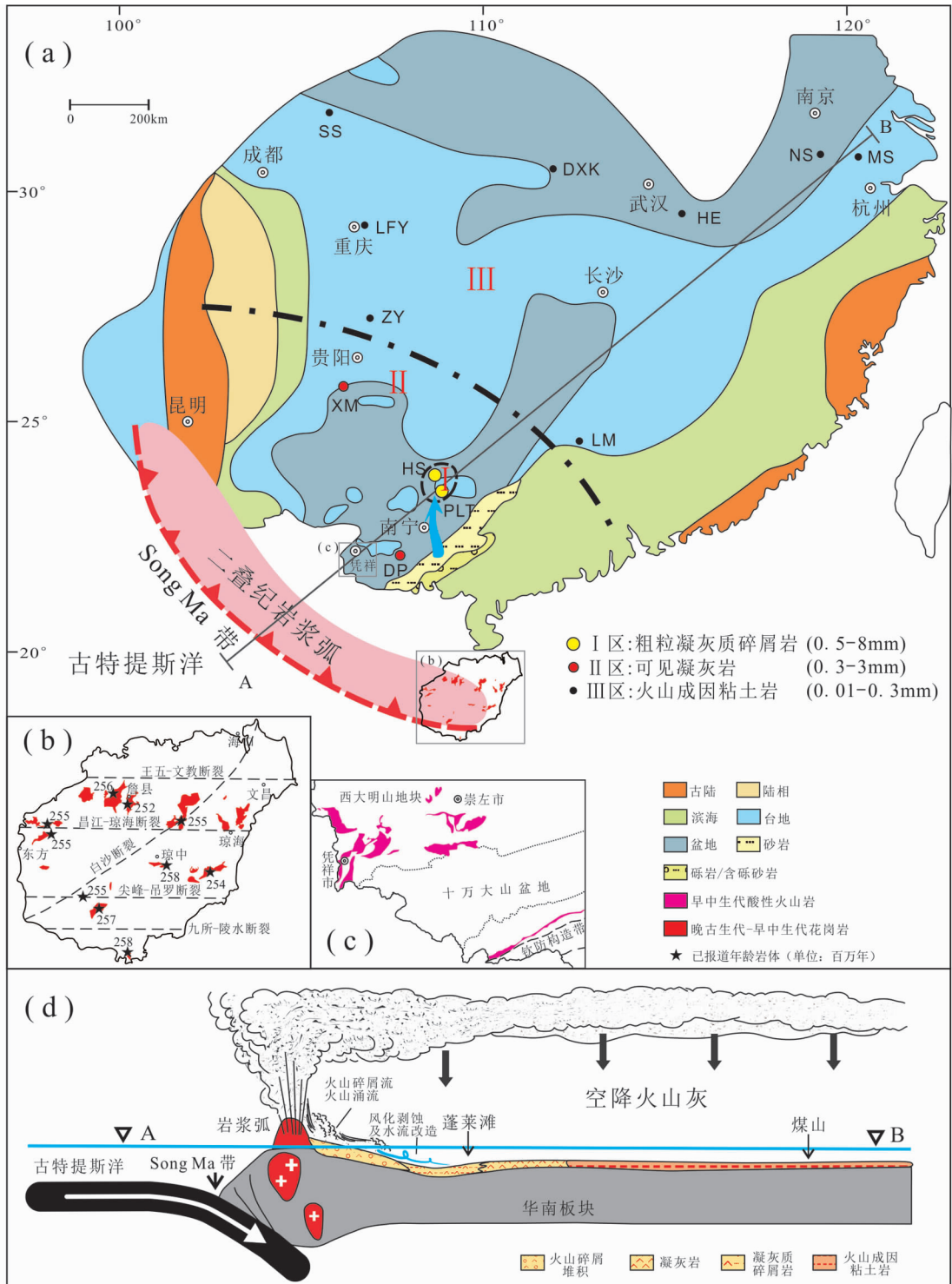


图6 华南火山碎屑岩空间分布图(a, 据 Yin *et al.*, 1989; Xie *et al.*, 2010)、海南岛晚古生代-早中生代花岗岩分布略图(b, 据温淑女, 2013)、桂西南早中生代酸性火山岩分布略图(c, 据覃小锋等, 2011)和华南火山碎屑岩成因模式简图(d)

图6a中英文缩写代表剖面名称: MS-煤山剖面; NS-牛山剖面; HE-黄石二门剖面; DXK-大峡口剖面; SS-上寺剖面; LFY-凉风坳剖面; LM-连阳煤田剖面; XM-新民剖面; DP-东攀剖面; LZ-柳州剖面; HS-合山剖面; PLT-蓬菜滩剖面

Fig. 6 The spatial distribution map of pyroclastic rocks in South China (a, modified after Yin *et al.*, 1989; Xie *et al.*, 2010), distribution of granite on Hainan Island during late Paleozoic to early Mesozoic (b, after Wen, 2013), distribution of early Mesozoic acid volcanic rocks in the Southwest Guangxi (c, modified after Qin *et al.*, 2011) and sketch for the deposition of pyroclastic rocks in South China (d)

Abbreviation in Fig. 6a; MS-Meishan Section; NS-Niushan section; HE-Huangshi Ermen Section; DXK-Daxiakou Section; SS-Shangsi Section; LFY-Liangfengya Section; LM-Lianyang Coal Field Section; XM-Xinmin Section; DP-Dongpan Section; LZ-Liuzhou Section; HS-Heshan Section; PLT-Penglaitan Section

关的特征(Gao *et al.*, 2013, 2015; He *et al.*, 2014)。

二叠纪-三叠纪之交时,全球正处于泛大陆汇聚时期,华南西南缘为古特提斯洋俯冲形成的大陆岩浆弧,在金沙江-哀牢山构造带、Song Ma 造山带、海南岛、桂西南地区均有报道 250 ~ 260Ma 与弧相关的岩浆作用(Halpin *et al.*, 2015; Hiéu *et al.*, 2013; 温淑女, 2013; 覃小锋等, 2011)。结合蓬莱滩碎屑岩物源方向和火山碎屑粒度分布规律,华南地区二叠-三叠系界线附近的火山碎屑物质很可能来源于华南西南缘的古特提斯大陆岩浆弧的岩浆活动。

前人在来宾或周边地区开展的研究中也获得类似结论。Zhong *et al.* (2012)认为蓬莱滩剖面 G-L 界线附近发育的粘土岩与古特提斯演化过程中的大陆岩浆弧有成因联系。杨宗永和何斌(2012)通过大量碎屑锆石年代学的研究,认为南盘江盆地三叠纪的主要陆源碎屑物质供给区为 Song Ma 带及其 NW 向延伸带区域,且该带可能存在一个因古特提斯洋俯冲而产生的石炭-二叠纪岩浆弧。侯莹玲等(2014)通过岩石地球化学和锆石年代学研究,认为桂西二叠系喀斯特型铝土矿成矿物质来源为古特提斯二叠纪岩浆弧。

在晚二叠世泛大陆聚合过程中,古特提斯板块快速俯冲(李朋武, 2009),导致中酸性岩浆快速且巨量的喷发,产生大量的中酸性火山灰被大气搬运数百上千公里后,落入海盆后沉积,在海水中发生蚀变作用形成火山成因粘土岩;一些物质经剥蚀随水流快速搬运沉积到广西来宾一带,形成粒度较大的火山碎屑沉积岩(图 6b)。

#### 4.6 华南 PTB 火山灰的规模及与生物灭绝事件的关系

火山喷发会对环境和生物带来影响这点毋庸置疑,但要造成全球性的生物灭绝事件需要巨大规模的火山作用(Erwin and Vogel, 1992)。尽管我国科学家很早提出了华南酸性火山灭绝假说,但一直不为国际学术界所接受。酸性火山灰由于颜色和成分的巨大差异通常在煤系地层中有很好的地质记录,在煤田地质研究和勘探开采中容易识别。华南地区 PTB 界线附近火山灰广泛发育于二叠纪煤系地层中(Zhou *et al.*, 2000),而在华北、西北及特提斯板块其他地区的二叠纪煤系地层均无报道。我们对华北山西灵武剖面 and 新疆大龙口剖面进行了较为系统地野外和锆石年代学研究,没有发现 PTB 界线附近的火山灰证据,这表明华南地区 PTB 火山灰影响范围有限,没有覆盖到华北和西北地区。

火山气候学研究表明中酸性普林尼式喷发对气候影响的时间短,其造成的气候环境影响取决于火山喷发规模及火山所处位置,很难造成全球性的大规模生物灭绝事件(郭正府和刘嘉麒, 2002)。在地质历史中,也无酸性火山灰造成生物灭绝事件的例子。以 74ka 喷发的第四纪以来最强的 Yongest Toba Tuff 为例,其火山灰可以漂移上万千米,覆盖面积超过 7000000km<sup>2</sup>,但古生物研究表明其未对生物生存环境产生灾难性的影响(Rose and Chesner, 1987; 郭正府等, 2002; Haslam and Petraglia, 2010)。

本文研究结果表明华南地区 PTB 火山灰来源于扬子板块西南缘古特提斯二叠纪大陆岩浆弧,火山灰范围局限于华南地区,其规模可能不足以导致全球性的生物灭绝事件。PTB 生物灭绝事件对应着全球性的气候环境变化,如全球海洋缺氧,酸化,升温效应和海平面升降等,与 PTB 生物灭绝同期发生的西伯利亚大火成岩省事件触发的大量 CO<sub>2</sub> 和甲烷所造成的温室效应可能才是导致生物灭绝的主要原因(陈军等, 2017; 沈树忠等, 2017)。

## 5 结论

本文通过综合研究来宾蓬莱滩剖面上二叠统大隆组火山碎屑沉积岩的岩相学和矿物学、锆石 U-Pb 年龄以及微区原位 Hf 同位素特征等,对华南 PTB 火山灰来源有了新的认识,得到的主要结论如下:

(1) 广西来宾地区蓬莱滩剖面上二叠统大隆组凝灰质砂岩中火山碎屑物质与华南火山灰具有相同的来源。

(2) 在空间分布上,火山碎屑沉积岩和较粗的凝灰岩仅出现在华南的西南部,而极细的火山灰主要分布在华南北部,推测华南地区二叠-三叠系界线附近的火山物质来源于华南西南缘的二叠纪古特提斯大陆岩浆弧。

(3) 华南 PTB 火山灰范围局限于华南地区,推测不是导致全球性的 PTB 生物灭绝事件的主要因素。

**致谢** 感谢中国地质大学(武汉) LA ICP-MS 实验室、中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的老师和学生在分析测试中给予的大力帮助和支持;特别感谢评审专家和编辑的详细审阅、宝贵意见和修改建议!

## References

- Baresel B, D'Abzac FX, Bucher H and Schaltegger U. 2017a. High-precision time-space correlation through coupled apatite and zircon tephrochronology: An example from the Permian-Triassic boundary in South China. *Geology*, 45(1): 83 - 86
- Baresel B, Bucher H, Brosse M, Corley F, Guodun K and Schaltegger U. 2017b. Precise age for the Permian-Triassic boundary in South China from high-precision U-Pb geochronology and Bayesian age-depth modeling. *Solid Earth*, 8(2): 361 - 378
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243 - 258
- Burgess SD, Bowring SA and Shen SZ. 2014. High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3316 - 3321
- Cas RAF and Wright JV. 1987. *Volcanic Successions; Modern and Ancient*. London: Allen & Unwin, 270 - 330
- Chen J, Shen SZ, Li XH, Xu YG, Michael MJ, Bowring SA, Erwin DH, Yuan DX, Chen B, Zhang H, Wang Y, Cao CQ, Zheng QF and Mu L. 2016. High-resolution SIMS oxygen isotope analysis on conodont apatite from South China and implications for the end-Permian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 448: 26 - 38

- Chen J and Xu YG. 2017. Permian large igneous provinces and their impact on paleoenvironment and biodiversity: Progress and perspectives. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(3): 374–393 (in Chinese with English abstract)
- Clark DL, Wang CY, Orth CJ and Gilmore JS. 1986. Conodont survival and low iridium abundances across the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 233(4767): 984–986
- Erwin DH and Vogel TA. 1992. Testing for causal relationships between large pyroclastic volcanic eruptions and mass extinctions. *Geophysical Research Letters*, 19(9): 893–896
- Erwin DH. 1994. The Permo-Triassic extinction. *Nature*, 367(6460): 231–236
- Feng ZZ, Yang YQ, Jin ZK, He YB, Wu SH, Xin WJ, Bao ZD and Tan J. 1996. Lithofacies paleogeography of the Permian of South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(2): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Gao QL. 2013. Felsic Volcanism in South China across the Permian-Triassic Boundary. Ph. D. Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)
- Gao QL, Zhang N, Xia WC, Feng QL, Chen ZQ, Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Pearson NJ, Wang GQ, Wu S, Zhong WL and Sun XF. 2013. Origin of volcanic ash beds across the Permian-Triassic boundary, Daxiakou, South China: Petrology and U-Pb age, trace elements and Hf-isotope composition of zircon. *Chemical Geology*, 360–361: 41–53
- Gao QL, Chen ZQ, Zhang N, Griffin WL, Xia WC, Wang GQ, Jiang TF, Xia XF and O'Reilly SY. 2015. Ages, trace elements and Hf-isotopic compositions of zircons from claystones around the Permian-Triassic boundary in the Zunyi Section, South China: Implications for nature and tectonic setting of the volcanism. *Journal of Earth Science*, 26(6): 872–882
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269
- Guo ZF and Liu JQ. 2002. Research advance in effect of volcanism on climate changes. *Advance in Earth Sciences*, 17(4): 595–604 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZF, Liu JQ, Chu GQ and Negendank JFW. 2002. Composition and origin of tephra of the Huguangyan Maar Lake. *Quaternary Sciences*, 22(3): 266–272 (in Chinese with English abstract)
- Halpin JA, Tran HT, Lai CK, Meffre S, Crawford AJ and Zaw K. 2015. U-Pb zircon geochronology and geochemistry from NE Vietnam: A 'tectonically disputed' territory between the Indochina and South China blocks. *Gondwana Research*, 34: 254–273
- Haslam M and Petraglia M. 2010. Comment on "Environmental impact of the 73ka Toba super-eruption in South Asia" by M. A. J. Williams, S. H. Ambrose, S. van der Kaars, C. Ruehleemann, U. Chattopadhyaya, J. Pal and P. R. Chauhan [Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 284 (2009) 295–314]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296(1–2): 199–203
- He B, Zhong YT, Xu YG and Li XH. 2014. Triggers of Permo-Triassic boundary mass extinction in South China: The Siberian traps or Paleo-Tethys ignimbrite flare-up? *Lithos*, 204: 258–267
- He JW, Rui L, Chai ZF and Ma SL. 1987. The Latest Permian and Earliest Triassic volcanic activities in the Meishan area of Changxing, Zhejiang. *Journal of Stratigraphy*, 11(3): 194–199, 245 (in Chinese with English abstract)
- Hiếu PT, Chen FK, Th ù y NTB, Cu' ò' Ng NQ and Li SQ. 2013. Geochemistry and zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of Permian alkali granitoids of the Phan Si Pan zone in northwestern Vietnam. *Journal of Geodynamics*, 69: 106–121
- Hou YL, He B and Zhong YT. 2014. New perspective on provenance of the Permian karstic bauxite in the western Guangxi: Geochemical evidence of clastic rocks of the Heshan Formation. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 181–196 (in Chinese with English abstract)
- Hu ZC, Gao S, Liu YS, Hu SH, Chen HH and Yuan HL. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093–1101
- Jiang YF, Tang YG, Dai SF, Qian HD, Shen SZ, Wang XB and Wang SQ. 2013. A study on high quartz paramorph and geological significance at the uppermost limestone of Permian system in Meishan of Zhejiang, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(3): 337–343 (in Chinese with English abstract)
- Jin YG, Zhang J and Shang QH. 1994. Two phases of the end-Permian mass extinction. In: Embry AF, Beauchamp B and Class DJ (eds.) . *Pangea: Global Environments and Resources*. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 17: 813–822
- Jin YG, Wang Y, Wang W, Shang QH, Cao CQ and Erwin DH. 2000. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 289(5478): 432–436
- Jin YG, Shen SZ, Henderson CM, Wang XD, Wang W, Wang Y, Cao CQ and Shang QH. 2006. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the boundary between the Capitanian and Wuchiapingian Stage (Permian). *Episodes*, 29(4): 253–262
- Li PW, Gao R, Guan Y and Li QS. 2009. The closure time of the Paleo-Asian ocean and the Paleo-Tethys ocean: Implication for the Tectonic cause of the End-Permian mass extinction. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 521–527 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li WX, Li ZX, Lo CH, Wang J, Ye MF and Yang YH. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Research*, 174(1–2): 117–128
- Li XH, Li ZX, He B, Li WX, Li QL, Gao YY and Wang XC. 2012. The Early Permian active continental margin and crustal growth of the Cathaysia Block: In situ U-Pb, Lu-Hf and O isotope analyses of detrital zircons. *Chemical Geology*, 328: 195–207
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Liang XQ and Li XH. 2005. Late Permian to Middle Triassic sedimentary records in Shiwandashan Basin: Implication for the Indosinian Yunkai Orogenic Belt, South China. *Sedimentary Geology*, 177(3–4): 297–320
- Liang XQ, Li XH, Qiu YX and Yang DS. 2005. Indosinian collisional orogeny: Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan Basin, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 99–112 (in Chinese with English abstract)
- Liao ZW, Hu WX, Cao J, Wang XL, Yao SP and Wan Y. 2016. Permian-Triassic boundary (PTB) in the Lower Yangtze Region, southeastern China: A new discovery of deep-water archive based on organic carbon isotopic and U-Pb geochronological studies. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 451: 124–139
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. California: Berkeley

Geochronology Center Special Publication

- Mei MX, Ma YS, Deng J, Chu HM and Zheng KB. 2007. Sequence-stratigraphic frameworks and their palaeogeographic patterns for the Permian Lopingian of the Dianqiangui basin and its adjacent areas of southwestern China. *Science in China (Series D)*, 50(6): 869–885
- Qin JH, Wu YL, Yan YJ and Zhu ZF. 1996. Hercynian-Indosinian sedimentary-tectonic evolution of the Nanpanjiang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 70(2): 99–107 (in Chinese with English abstract)
- Qin XF, Wang ZQ, Zhang YL, Pan LZ, Hu GA and Zhou FS. 2011. Geochronology and geochemistry of Early Mesozoic acid volcanic rocks from Southwest Guangxi: Constraints on tectonic evolution of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 794–808 (in Chinese with English abstract)
- Rose WI and Chesner CA. 1987. Dispersal of ash in the great Toba eruption, 75ka. *Geology*, 15(10): 913–917
- Shellnutt JG, Wang CY, Zhou MF and Yang YH. 2009. Zircon Lu-Hf isotopic compositions of metaluminous and peralkaline A-type granitic plutons of the Emeishan large igneous province (SW China): Constraints on the mantle source. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1): 45–55
- Shen SZ, Wang Y, Henderson CM, Cao CQ and Wang W. 2007. Biostratigraphy and lithofacies of the Permian System in the Laibin-Heshan area of Guangxi, South China. *Palaeoworld*, 16(1–3): 120–139
- Shen SZ, Crowley JL, Wang Y, Bowring SA, Erwin DH, Sadler PM, Cao CQ, Rothman DH, Henderson CM, Ramezani J, Zhang H, Shen YN, Wang XD, Wang W, Mu L, Li WZ, Tang YG, Liu XL, Liu LJ, Zeng Y, Jiang YF and Jin YG. 2011. Calibrating the End-Permian mass extinction. *Science*, 334(6061): 1367–1372
- Shen SZ and Zhang H. 2017. What caused the five mass extinctions? *Science Bulletin*, 62(11): 1119–1135 (in Chinese)
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- Stanley SM and Yang X. 1994. A double mass extinction at the end of the Paleozoic era. *Science*, 266(5189): 1340–1344
- Wang YJ, Fan WM, Zhao GC, Ji SC and Peng TP. 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block. *Gondwana Research*, 12(4): 404–416
- Wen SN. 2013. Geochronologic and geochemical studies of Permian-Triassic magmatism in Hainan Island, South China. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: University of Chinese Academy of Science (in Chinese with English summary)
- Wiedenbeck M, AlléP, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1–23
- Wu SB, Ren YX and Bi XM. 1990. Volcanic material and origin of clay rock near Permo-Triassic boundary from Huanshi, Hubei and Meishan of Changxing County, Zhejiang. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 15(6): 589–595 (in Chinese with English abstract)
- Xie SC, Pancost RD, Yin HF, Wang HM and Evershed RP. 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434(7032): 494–497
- Xie SC, Pancost RD, Wang YB, Yang H, Wignall PB, Luo GM, Jia CL and Chen L. 2010. Cyanobacterial blooms tied to volcanism during the 5m. y. Permo-Triassic biotic crisis. *Geology*, 38(5): 447–450
- Xu YG, Luo ZY, Huang XL, He B, Xiao L, Xie LW and Shi YR. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084–3104
- Yang JH, Cawood PA, Du YS, Huang H, Huang HW and Tao P. 2012. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China. *Sedimentary Geology*, 261–262: 120–131
- Yang ZY, Wu SB, Yin HF, Xu GR, Zhang KX and Bi XM. 1991. Geological Events of Permo-Triassic Transitional Period in South China. Beijing: Geological Publishing House, 35–63 (in Chinese)
- Yang ZY and He B. 2012. Geochronology of detrital zircons from the Middle Triassic sedimentary rocks in the Nanpanjiang Basin: Provenance and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(4): 581–596 (in Chinese with English abstract)
- Ye MF, Li XH, Li WX, Liu Y and Li ZX. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gondwana Research*, 12(1–2): 144–156
- Yin HF, Huang SJ, Zhang KX, Yang FQ, Ding MH, Bi XM and Zhang SX. 1989. Volcanism at the Permian-Triassic boundary in South China and its effects on mass extinction. *Acta Geologica Sinica*, 2(4): 417–431
- Yin HF and Song HJ. 2013. Mass extinction and Pangea integration during the Paleozoic-Mesozoic transition. *Science China (Earth Sciences)*, 56(11): 1791–1803
- Yin HF, Jiang HS, Xia WC, Feng QL, Zhang N and Shen J. 2014. The end-Permian regression in South China and its implication on mass extinction. *Earth-Science Reviews*, 137: 19–33
- Yuan DX, Shen SZ, Henderson CM, Chen J, Zhang H and Feng HZ. 2014. Revised conodont-based integrated high-resolution timescale for the Changhsingian Stage and end-Permian extinction interval at the Meishan sections, South China. *Lithos*, 204: 220–245
- Zang QL and Jiang NY. 1980. Volcanic rocks and volcanic sedimentary rocks of the Changxing Formation in Heshan, Guangxi. *Journal of Stratigraphy*, 4(1): 64–67 (in Chinese)
- Zhang DG. 2000. Study on the Permian volcanic eventstratigraphy in Guangzhou Province. *Coal Geology of China*, 12(3): 5–9 (in Chinese)
- Zhang SX, Feng QL, Gu SZ and Yu JS. 2006. Clay stone around deep water Permian-Triassic boundary from Guizhou and Guangxi regions. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 9–13, 26 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TY, Feng QL, Liu R, Zhou QE and Wei X. 2013. Volcanics characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of clay rocks along Dongpan section of Guangxi. *Geological Bulletin of China*, 32(9): 1402–1409 (in Chinese with English abstract)
- Zheng QF, Cao CQ and Zhang MY. 2013. Sedimentary features of the Permian-Triassic boundary sequence of the Meishan section in Changxing County, Zhejiang Province. *Science China (Earth Sciences)*, 56(6): 956–969
- Zhong YT, He B and Xu YG. 2012. Mineralogy and geochemistry of claystones from the Guadalupian-Lopingian boundary at Penglaitan, South China: Insights into the pre-Lopingian geological events. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 438–462
- Zhou L and Kyte FT. 1988. The Permian-Triassic boundary event: A geochemical study of three Chinese sections. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(4): 411–421
- Zhou YP, Bohor BF and Ren YL. 2000. Trace element geochemistry of altered volcanic ash layers (tonsteins) in Late Permian coal-bearing formations of eastern Yunnan and western Guizhou provinces, China. *International Journal of Coal Geology*, 44(3–4): 305–324
- Zhu J, Zhang ZC, Hou T and Kang JL. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the tuffs on the uppermost of the Emeishan basalt succession in Panxian County, Guizhou Province: Constraints on genetic link between Emeishan large igneous province and the mass extinction. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2743–2751 (in Chinese with English abstract)
- Zhu J and Zhang ZC. 2013. The link between large igneous provinces and the two mass extinctions in Permian: Review of recent progress. *Geological Review*, 59(1): 137–148 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 陈军, 徐义刚. 2017. 二叠纪大火成岩省的环境与生物效应: 进展与前瞻. 矿物岩石地球化学通报, 36(3): 374-393
- 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 何幼斌, 吴胜和, 辛文杰, 鲍志东, 谭健. 1996. 中国南方二叠纪岩相古地理. 沉积学报, 14(2): 1-11
- 高秋灵. 2013. 华南二叠-三叠之交的长英质火山作用. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学
- 郭正府, 刘嘉麒. 2002. 火山活动与气候变化研究进展. 地球科学进展, 17(4): 595-604
- 郭正府, 刘嘉麒, 储国强, Negendank JFW. 2002. 湖光岩玛珥湖火山灰的成分及其来源. 第四纪研究, 22(3): 266-272
- 何锦文, 芮琳, 柴之芳, 马淑兰. 1987. 浙江长兴煤山地区晚二叠世末、早三叠世初的火山活动. 地层学杂志, 11(3): 194-199, 245
- 侯莹玲, 何斌, 钟玉婷. 2014. 桂西二叠系喀斯特型铝土矿成矿物质来源的新认识: 来自合山组碎屑岩地球化学证据. 大地构造与成矿学, 38(1): 181-196
- 姜尧发, 唐跃刚, 代世峰, 钱汉东, 沈树忠, 王西勃, 王绍清. 2013. 浙江煤山二叠系顶部石灰岩中高温石英副像及其地质意义. 矿物学报, 33(3): 337-343
- 李朋武, 高锐, 管焯, 李秋生. 2009. 古亚洲洋和古特提斯洋的闭合时代——论二叠纪末生物灭绝事件的构造起因. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 521-527
- 梁新权, 李献华, 丘元禧, 杨东生. 2005. 华南印支期碰撞造山——十万大山盆地构造和沉积学证据. 大地构造与成矿, 29(1): 99-112
- 梅冥相, 马永生, 邓军, 初汉民, 郑宽兵. 2007. 滇黔桂盆地及邻区二叠系乐平统层序地层格架及其古地理背景. 中国科学(D辑), 37(5): 605-617
- 秦建华, 吴应林, 颜仰基, 朱忠发. 1996. 南盘江盆地海西-印支期沉积构造演化. 地质学报, 70(2): 99-107
- 覃小锋, 王宗起, 张英利, 潘罗忠, 胡贵昂, 周府生. 2011. 桂西南早中生代酸性火山岩年代学和地球化学: 对钦-杭结合带西南段构造演化的约束. 岩石学报, 27(3): 794-808
- 沈树忠, 张华. 2017. 什么引起五次生物大灭绝. 科学通报, 62(11): 1119-1135
- 温淑女. 2013. 海南岛二叠纪-三叠纪岩浆作用的年代学与地球化学研究. 博士学位论文. 广州: 中国科学院大学
- 吴顺宝, 任迎新, 毕先梅. 1990. 湖北黄石、浙江长兴煤山二叠-三叠系界线处火山物质及粘土岩成因探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 15(6): 589-595
- 杨遵仪, 吴顺宝, 殷鸿福, 徐桂荣, 张克信, 毕先梅. 1991. 华南二叠-三叠纪过渡期地质事件. 北京: 地质出版社, 35-63
- 杨宗永, 何斌. 2012. 南盘江盆地中三叠统碎屑锆石地质年代学: 物源及其地质意义. 大地构造与成矿学, 36(4): 581-596
- 殷鸿福, 宋海军. 2013. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合. 中国科学(地球科学), 43(10): 1539-1552
- 臧庆兰, 江纳言. 1980. 广西合山长兴组中的火山岩和火山沉积岩. 地层学杂志, 4(1): 64-67
- 张德高. 2000. 广东二叠纪火山事件地层学研究. 中国煤田地质, 12(3): 5-9
- 张素新, 冯庆来, 顾松竹, 于吉顺. 2006. 黔桂地区深水相二叠系-三叠系界线附近黏土岩研究. 地质科技情报, 25(1): 9-13, 26
- 赵天宇, 冯庆来, 刘嵘, 周秋娥, 位荀. 2013. 广东西攀剖面粘土岩的火山岩特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 32(9): 1402-1409
- 朱江, 张招崇, 侯通, 康健丽. 2011. 贵州盘县峨眉山玄武岩系顶部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对峨眉山大火成岩省与生物大规模灭绝关系的约束. 岩石学报, 27(9): 2743-2751
- 朱江, 张招崇. 2013. 大火成岩省与二叠纪两次生物灭绝关系研究进展. 地质评论, 59(1): 137-148
- 郑全峰, 曹长群, 章明圆. 2013. 浙江长兴县煤山剖面二叠系-三叠系界线层序的沉积特征. 中国科学(地球科学), 43(5): 716-729

附表1 蓬莱滩剖面锆石 U-Pb 年龄分析结果

Appendix Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb results from Penglaitan section

Spot No.	U	Th	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		Discord.
	( $\times 10^{-6}$ )									Age(Ma)	1 $\sigma$	Age(Ma)	1 $\sigma$	Age(Ma)	1 $\sigma$	
PLT-21-3	350	559	1.6	0.0744	2.1	1.5884	2.2	0.1538	1.1	1054	42.1	966	13.7	922	9.2	5
-4	227	111	0.5	0.0516	4.7	0.2837	4.7	0.0399	1.2	333	102.8	254	10.6	252	3.0	1
-6	250	202	0.8	0.0513	4.7	0.2806	4.7	0.0397	1.3	254	109.2	251	10.3	251	3.1	1
-9	213	123	0.6	0.0529	4.3	0.2905	4.5	0.0396	1.2	324	93.5	259	10.2	250	3.0	4
-10	240	123	0.5	0.0569	5.0	0.3137	5.0	0.0398	1.2	487	109.2	277	12.2	251	3.0	10
-11	737	584	0.8	0.0554	2.9	0.3170	2.8	0.0413	0.9	432	64.8	280	6.9	261	2.3	7
-12	951	348	0.4	0.0533	3.1	0.2937	2.9	0.0398	0.9	343	38.0	261	6.8	251	2.1	4
-13	271	160	0.6	0.0522	4.9	0.3062	4.7	0.0428	1.1	295	108.3	271	11.1	270	2.8	1
-14	407	192	0.5	0.0483	6.5	0.3525	6.2	0.0533	1.3	122	138.9	307	16.3	335	4.3	9
-18	889	444	0.5	0.0535	2.9	0.2958	2.8	0.0400	0.9	350	66.7	263	6.6	253	2.3	4
-19	541	269	0.5	0.0489	3.4	0.2923	3.4	0.0433	1.1	146	84.2	260	7.7	273	2.8	5
-22	181	141	0.8	0.0511	5.5	0.2868	5.6	0.0408	1.2	243	121.3	256	12.6	258	3.1	1
-23	823	613	0.7	0.0516	2.8	0.2850	2.8	0.0399	1.0	333	60.2	255	6.2	252	2.4	1
-25	955	446	0.5	0.0569	2.6	0.3246	2.5	0.0413	0.8	500	57.4	285	6.3	261	2.0	10
-28	246	126	0.5	0.0545	4.8	0.3087	4.7	0.0412	1.3	394	107.4	273	11.3	260	3.2	5
-30	317	199	0.6	0.0533	4.7	0.2932	4.5	0.0401	1.4	343	110.2	261	10.4	253	3.4	3
-31	562	340	0.6	0.0543	3.6	0.2974	3.4	0.0398	1.1	383	79.6	264	8.0	252	2.7	5
-34	306	176	0.6	0.0510	4.4	0.2806	4.2	0.0401	1.2	243	69.4	251	9.4	253	2.9	1
-35	229	122	0.5	0.0523	5.6	0.2829	5.4	0.0397	1.3	298	127.8	253	12.0	251	3.3	1
-37	113	103	0.9	0.0559	6.6	0.3549	6.3	0.0466	2.0	456	143.5	308	16.7	294	5.8	5
-38	197	103	0.5	0.0527	5.5	0.2848	5.2	0.0400	1.6	322	125.9	254	11.7	253	3.9	1
-39	247	144	0.6	0.0529	4.3	0.3116	4.3	0.0428	1.3	324	93.5	275	10.3	270	3.5	2
-40	618	201	0.3	0.0537	3.3	0.3152	3.3	0.0423	0.9	361	75.9	278	8.1	267	2.4	5
-41	183	124	0.7	0.0573	5.5	0.3136	5.3	0.0399	1.4	502	120.4	277	12.9	252	3.4	10
-45	216	133	0.6	0.0518	5.4	0.2830	5.1	0.0397	1.2	276	122.2	253	11.3	251	2.9	1
-47	246	122	0.5	0.0513	4.6	0.2928	4.3	0.0416	1.3	254	110.2	261	10.0	263	3.4	1
-48	297	161	0.5	0.0496	8.0	0.2858	10.0	0.0396	1.5	176	177.8	255	22.5	250	3.6	2
-52	320	181	0.6	0.0470	4.2	0.2571	4.0	0.0397	1.1	50	96.3	232	8.2	251	2.8	8
-53	318	110	0.3	0.0519	5.2	0.2902	5.0	0.0407	1.1	280	120.4	259	11.4	257	2.8	1
-55	82.1	30.6	0.4	0.0518	8.1	0.2813	8.0	0.0395	1.7	280	187.0	252	17.8	250	4.3	1
-56	125	96.3	0.8	0.0517	6.5	0.2796	6.1	0.0397	1.8	272	150.0	250	13.4	251	4.4	1
-57	209	102	0.5	0.0496	5.2	0.2706	5.0	0.0398	1.2	172	122.2	243	10.8	252	2.9	4
-59	189	103	0.5	0.0569	4.9	0.3298	4.9	0.0423	1.4	487	109.2	289	12.3	267	3.6	9
-60	702	330	0.5	0.0572	3.4	0.3324	3.3	0.0419	0.9	498	75.9	291	8.3	265	2.4	10
-61	166	82.3	0.5	0.0523	6.4	0.2857	6.0	0.0401	1.6	298	146.3	255	13.6	254	4.0	1
-66	147	75.8	0.5	0.0506	6.5	0.2781	6.5	0.0399	1.5	220	151.8	249	14.3	252	3.8	2
-67	790	492	0.6	0.0521	2.9	0.3036	2.7	0.0422	0.9	300	66.7	269	6.3	267	2.3	1
-68	381	332	0.9	0.0517	4.1	0.2835	3.8	0.0398	1.0	272	94.4	253	8.6	252	2.5	1
-69	201	114	0.6	0.0507	4.9	0.2784	4.8	0.0398	1.4	233	117.6	249	10.7	252	3.4	1
-70	651	420	0.6	0.0515	3.5	0.2818	3.3	0.0396	0.9	261	75.0	252	7.4	250	2.1	1
-71	190	110	0.6	0.0529	6.0	0.2868	5.6	0.0397	1.4	324	132.4	256	12.8	251	3.3	2
-73	134	82.0	0.6	0.0518	6.0	0.2945	6.0	0.0411	1.5	276	137.0	262	13.9	260	3.8	1
-74	230	121	0.5	0.0542	5.2	0.2946	5.1	0.0396	1.3	389	118.5	262	11.8	250	3.2	5
-75	150	95.4	0.6	0.0512	6.3	0.2793	6.2	0.0399	1.4	250	146.3	250	13.8	252	3.6	1
-77	400	193	0.5	0.0751	2.1	1.8424	2.2	0.1770	0.9	1072	46.8	1061	14.2	1050	8.9	1
-84	165	106	0.6	0.0523	5.9	0.2851	5.8	0.0400	1.4	298	130.5	255	13.1	253	3.4	1

续附表 1

Continued Appendix Table 1

Spot No.	U Th		Th/U	$^{207}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*$		$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Discord.
	( $\times 10^{-6}$ )			$^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{238}\text{U}$	$\pm\%$	Age (Ma)	1 $\sigma$	Age (Ma)	1 $\sigma$	Age (Ma)	1 $\sigma$	
-85	329	239	0.7	0.0547	3.8	0.2992	3.8	0.0398	1.1	398	80.5	266	9.0	251	2.7	6
-86	354	243	0.7	0.0484	3.7	0.2657	3.8	0.0397	1.1	120	91.7	239	8.0	251	2.6	5
-88	187	98	0.5	0.0527	5.9	0.3141	5.7	0.0437	1.2	317	139.8	277	13.8	276	3.3	1
-89	205	153	0.7	0.0566	5.8	0.3067	5.7	0.0397	1.4	476	127.8	272	13.6	251	3.5	8
-93	205	120	0.6	0.0571	4.9	0.3238	4.8	0.0413	1.3	494	107.4	285	11.9	261	3.2	9
PLT-28-01	304	189	0.6	0.0510	4.7	0.2775	4.5	0.0397	1.1	243	109.2	249	9.9	251	2.7	1
-02	506	204	0.4	0.0511	3.3	0.2684	3.4	0.0378	1.0	256	75.9	241	7.4	239	2.4	1
-03	414	242	0.6	0.0551	3.8	0.3044	3.9	0.0398	1.4	413	85.2	270	9.4	252	3.4	7
-05	306	270	0.9	0.0536	4.3	0.3012	4.1	0.0408	1.3	354	98.1	267	9.7	258	3.2	4
-06	442	446	1.0	0.0545	3.6	0.2799	3.6	0.0371	1.2	391	81.5	251	7.9	235	2.7	7
-07	1432	854	0.6	0.0501	2.6	0.2752	2.5	0.0396	1.0	198	28.7	247	5.5	251	2.4	2
-08	351	156	0.4	0.0506	4.1	0.2695	4.2	0.0383	1.0	233.4	97.2	242	9.0	242	2.4	1
-09	359	259	0.7	0.0519	4.2	0.2741	4.0	0.0384	1.1	283	96.3	246	8.7	243	2.7	2
-10	380	184	0.5	0.0474	4.0	0.2619	3.8	0.0401	1.1	77.9	83.3	236	8.1	253	2.8	7
-11	127	77.9	0.6	0.0508	6.9	0.2801	6.7	0.0400	1.4	232	159.2	251	15.0	253	3.6	1
-14	209	121	0.6	0.0535	5.7	0.2919	5.3	0.0400	1.3	350	129.6	260	12.2	253	3.3	3
-15	126	73.6	0.6	0.0508	6.2	0.2780	6.1	0.0397	1.4	235	144.4	249	13.4	251	3.5	1
-16	378	171	0.5	0.0536	4.1	0.2925	4.0	0.0396	1.1	354	90.7	261	9.2	251	2.7	4
-17	323	248	0.8	0.0508	4.4	0.2771	4.4	0.0397	1.3	232	101.8	248	9.6	251	3.1	1
-18	601	406	0.7	0.0488	3.1	0.2687	3.1	0.0398	0.9	200	74.1	242	6.7	251	2.2	4
-19	182	191	1.1	0.0504	5.8	0.2796	6.0	0.0399	1.4	213	135.2	250	13.3	252	3.5	1
-20	302	159	0.5	0.0536	4.1	0.2973	4.1	0.0402	1.2	354	92.6	264	9.6	254	3.0	4
-21	135	87.0	0.6	0.0543	6.5	0.2948	6.1	0.0399	1.6	383	144.4	262	14.2	253	4.0	4
-22	244	156	0.6	0.0497	5.0	0.2732	4.8	0.0402	1.3	189	119.4	245	10.5	254	3.1	4
-23	293	136	0.5	0.0521	4.3	0.2881	4.2	0.0401	1.1	287	98.1	257	9.6	253	2.8	2
-24	128	80.8	0.6	0.0530	7.0	0.2876	6.6	0.0399	1.6	332	161.1	257	15.1	252	4.0	2
-26	536	301	0.6	0.1569	1.9	8.2260	1.9	0.3772	0.8	2422	31.3	2256	16.9	2063	13.4	9
-27	215	137	0.6	0.0522	5.4	0.2822	5.1	0.0396	1.3	295	124.1	252	11.4	250	3.1	1
-28	268	152	0.6	0.0539	4.4	0.2945	4.4	0.0396	1.2	369	100.0	262	10.1	250	2.9	5
-29	75.9	36.0	0.5	0.0535	9.3	0.2796	8.1	0.0396	1.9	350	212.9	250	18.1	251	4.8	1
-30	407	40.8	0.1	0.0752	2.2	1.9688	2.1	0.1889	0.8	1076	43.1	1105	14.1	1116	8.6	1
-31	202	114	0.6	0.0521	4.8	0.2834	4.7	0.0398	1.3	300	109.2	253	10.5	252	3.3	1
-32	172	68.9	0.4	0.0579	5.1	0.5079	5.7	0.0613	2.7	524	111.1	417	19.5	383	9.9	9
-33	201	103	0.5	0.0517	5.3	0.2850	5.3	0.0399	1.3	272	122.2	255	12.0	252	3.2	1
-34	127	71.4	0.6	0.0525	6.5	0.2885	6.2	0.0404	1.6	306	150.0	257	14.1	255	4.0	1
-35	277	153	0.6	0.0506	5.3	0.3028	5.1	0.0437	1.3	233	122.2	269	12.1	276	3.6	3
-36	183	90.7	0.5	0.0517	5.5	0.2811	5.1	0.0400	1.5	272	125.9	251	11.5	253	3.8	1
-37	228	75.4	0.3	0.0555	4.3	0.5024	4.2	0.0661	1.5	435	91.7	413	14.4	413	6.2	1
-38	830	576	0.7	0.0509	3.0	0.2805	3.0	0.0397	1.0	239	68.5	251	6.7	251	2.5	1
-40	280	133	0.5	0.0574	3.7	0.5302	5.6	0.0645	3.8	509	76.8	432	19.5	403	14.8	7
-41	687	337	0.5	0.0523	2.9	0.2877	3.0	0.0396	1.1	298	64.8	257	6.8	250	2.7	3
-42	858	556	0.6	0.0516	2.9	0.2837	2.8	0.0398	0.9	265	66.7	254	6.3	251	2.2	1
-43	159	91.3	0.6	0.0528	7.0	0.2789	6.4	0.0396	1.6	320	159.2	250	14.2	250	4.0	1
-44	259	83.7	0.3	0.0507	5.0	0.2790	4.8	0.0399	1.2	228	114.8	250	10.7	252	3.0	1
-46	254	188	0.7	0.0508	4.7	0.2778	4.5	0.0397	1.3	232	112.0	249	9.9	251	3.2	1
-47	117	86.7	0.7	0.0525	7.6	0.2802	7.4	0.0396	1.6	309	174.1	251	16.4	250	4.0	1

续附表 1

Continued Appendix Table 1

Spot No.	U	Th	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Discord. (%)
	$(\times 10^{-6})$							Age (Ma)		1 $\sigma$	Age (Ma)	1 $\sigma$	Age (Ma)	1 $\sigma$		
-48	405	281	0.7	0.0519	4.0	0.2884	4.0	0.0403	1.3	280	92.6	257	9.1	255	3.2	1
-49	379	235	0.6	0.0511	4.3	0.2807	4.3	0.0397	1.0	256	100.0	251	9.5	251	2.5	1
-50	705	422	0.6	0.0527	3.1	0.2916	3.1	0.0399	1.1	322	70.4	260	7.1	252	2.7	3
-51	216	109	0.5	0.0509	5.9	0.2807	6.0	0.0399	1.6	239	135.2	251	13.4	252	4.0	1
-52	1177	408	0.3	0.0523	2.8	0.2863	2.7	0.0396	1.0	298	63.0	256	6.0	251	2.5	2
-53	653	428	0.7	0.0500	4.5	0.2730	4.3	0.0399	1.2	195	105.5	245	9.3	252	2.9	3
-54	254	149	0.6	0.0497	4.6	0.2731	4.6	0.0399	1.2	189.0	102.8	245	10.0	252	3.0	3
-56	131	80.7	0.6	0.0500	7.4	0.2736	7.5	0.0396	1.7	195	176.8	246	16.4	250	4.1	2
-58	202	131	0.6	0.0520	5.3	0.2828	5.2	0.0398	1.4	283	150.0	253	11.7	252	3.5	1
-59	158	83.3	0.5	0.0523	6.1	0.2800	5.7	0.0396	1.4	302	140.7	251	12.6	251	3.5	1
-60	383	264	0.7	0.0511	4.5	0.2793	4.2	0.0398	1.1	256	103.7	250	9.4	251	2.7	1
-61	132	84.3	0.6	0.0515	6.4	0.2874	6.2	0.0407	1.8	261	178.7	256	14.0	257	4.5	1
-62	191	96.7	0.5	0.0517	5.5	0.2830	5.2	0.0402	1.6	272	125.9	253	11.6	254	3.9	1
-63	440	221	0.5	0.0499	4.7	0.2751	4.7	0.0401	1.4	191	111.1	247	10.3	253	3.5	3
-64	101	60.6	0.6	0.0576	7.7	0.3176	7.0	0.0401	1.9	517	168.5	280	17.1	253	4.8	10
-65	150	91.6	0.6	0.0521	6.2	0.2882	6.4	0.0397	1.7	300	145.4	257	14.6	251	4.3	3
-66	251	162	0.6	0.0506	5.7	0.2792	5.7	0.0399	1.3	220	133.3	250	12.6	252	3.1	1
-67	234	130	0.6	0.0509	5.1	0.2780	5.0	0.0398	1.3	239	113.9	249	11.0	251	3.2	1
-68	112	91.3	0.8	0.0519	7.6	0.2807	7.6	0.0401	1.6	283	175.9	251	17.0	253	3.9	1
-69	340	193	0.6	0.0513	4.0	0.2804	4.0	0.0397	1.2	254	88.0	251	8.8	251	3.0	1
-74	253	145	0.6	0.0568	5.3	0.3149	5.1	0.0406	1.4	487	116.7	278	12.4	257	3.6	8
-75	99	43.0	0.4	0.0552	7.8	0.3139	7.5	0.0424	1.7	420	174.1	277	18.1	268	4.6	4
-76	100	60.6	0.6	0.0537	8.7	0.2915	8.6	0.0408	1.9	361	196.3	260	19.8	258	4.8	1
-77	578	193	0.3	0.0523	3.2	0.2861	3.1	0.0396	1.0	302	69.4	255	7.1	250	2.5	2
-79	116	104.5	0.9	0.0510	7.2	0.2827	7.1	0.0400	1.5	239	164.8	253	15.9	253	3.7	1
-80	62.4	29.4	0.5	0.0550	12.5	0.2864	11.9	0.0401	2.2	413	281.4	256	26.9	253	5.5	1
-81	218	242	1.1	0.0566	6.3	0.2999	5.9	0.0397	1.6	476	140.7	266	13.9	251	3.9	6
-82	226	75.6	0.3	0.0567	4.7	0.3129	4.8	0.0397	1.4	480	105.5	276	11.7	251	3.4	10
-86	160	93.1	0.6	0.0573	8.4	0.3025	7.8	0.0384	1.6	506	185.2	268	18.3	243	3.8	10
-88	214	130	0.6	0.0548	6.1	0.2801	5.7	0.0371	1.5	406	169.4	251	12.7	235	3.3	7
-89	540	289	0.5	0.0540	4.1	0.2905	4.0	0.0386	1.2	372	92.6	259	9.2	244	2.9	6
-91	138	82.8	0.6	0.0500	6.7	0.2685	6.6	0.0385	1.6	194.5	155.5	242	14.2	244	3.8	1
-93	280	144	0.5	0.0533	4.9	0.2919	4.8	0.0396	1.4	339	111.1	260	11.1	251	3.4	4
-94	137	71.3	0.5	0.0532	6.5	0.2824	6.4	0.0385	1.5	339	148.1	253	14.4	244	3.7	4
-95	374	84.5	0.2	0.0499	5.2	0.2796	5.7	0.0397	1.6	187	122.2	250	12.6	251	3.8	1
-96	1139	561	0.5	0.0510	3.7	0.2721	3.6	0.0384	1.1	239	85.2	244	7.9	243	2.6	1
-97	406	159	0.4	0.0508	5.1	0.2780	4.9	0.0397	1.3	232	118.5	249	10.8	251	3.1	1
-98	226	133	0.6	0.0519	6.2	0.2782	6.0	0.0389	1.2	280	142.6	249	13.3	246	3.0	2
-100	164	76.7	0.5	0.0537	6.5	0.2916	6.4	0.0397	1.6	361	148.1	260	14.7	251	4.0	4
-101	155	92.8	0.6	0.0536	6.4	0.2954	6.3	0.0400	1.6	354	144.4	263	14.5	253	3.9	4
-102	450	189	0.4	0.0503	4.4	0.2777	4.4	0.0397	1.0	209	103.7	249	9.7	251	2.6	1
-103	127	127	1.0	0.0628	4.6	0.7864	4.7	0.0909	1.3	702	100.0	589	20.9	561	6.9	5
-104	572	342	0.6	0.0507	3.8	0.2798	3.9	0.0397	1.1	228	61.1	251	8.7	251	2.7	1
-105	179	96.0	0.5	0.0509	7.1	0.2779	7.1	0.0398	1.3	235	164.8	249	15.7	251	3.1	1
-106	208	42.6	0.2	0.0683	2.8	1.4668	2.8	0.1546	0.9	880	89.8	917	16.7	927	7.7	2
-107	216	104	0.5	0.0508	5.1	0.2778	5.1	0.0398	1.3	232	120.4	249	11.2	251	3.2	1
-108	165	63.3	0.4	0.0534	6.5	0.2862	6.2	0.0397	1.5	346	148.1	256	13.9	251	3.8	2



附表2 蓬莱滩剖面锆石 Hf 同位素数据

Appendix Table 2 Zircon Hf isotopic data from Penglaitan section

Spot No.	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$
PLT-21-3	922	0.044935	0.000362	0.001306	0.000009	0.282126	0.000013	-2.6	0.46	1598	1975
-6	252	0.051172	0.000469	0.001530	0.000016	0.282308	0.000020	-11.1	0.72	1352	1983
-9	251	0.035619	0.000187	0.001042	0.000010	0.282315	0.000012	-10.7	0.44	1323	1960
-10	250	0.031537	0.000106	0.000902	0.000005	0.282321	0.000017	-10.5	0.62	1311	1945
-11	251	0.063990	0.000347	0.001833	0.000004	0.282391	0.000013	-8.0	0.45	1244	1796
-12	261	0.058373	0.000488	0.001659	0.000007	0.282296	0.000012	-11.5	0.41	1373	2010
-13	251	0.047798	0.000400	0.001382	0.000016	0.282315	0.000012	-10.5	0.43	1337	1956
-14	270	0.037573	0.000161	0.001121	0.000011	0.282414	0.000012	-5.3	0.43	1187	1687
-18	335	0.061915	0.000251	0.001649	0.000007	0.282276	0.000010	-12.1	0.35	1400	2052
-19	253	0.056871	0.000642	0.001485	0.000009	0.282244	0.000014	-13.0	0.49	1440	2115
-20	273	0.074209	0.001184	0.002055	0.000039	0.282222	0.000011	-14.2	0.40	1494	2177
-22	258	0.053574	0.000478	0.001406	0.000006	0.282343	0.000014	-9.6	0.50	1297	1898
-23	252	0.087962	0.000945	0.002236	0.000017	0.282232	0.000013	-13.8	0.46	1487	2155
-25	261	0.066207	0.000837	0.001718	0.000017	0.282297	0.000009	-11.4	0.33	1374	2006
-28	260	0.066453	0.000829	0.001723	0.000017	0.282295	0.000009	-11.3	0.33	1377	2007
-30	253	0.065116	0.000436	0.001673	0.000014	0.282299	0.000015	-11.3	0.54	1370	2001
-31	252	0.064788	0.001160	0.001758	0.000026	0.282296	0.000014	-11.6	0.51	1377	2014
-34	253	0.045051	0.000551	0.001276	0.000020	0.282214	0.000020	-14.3	0.72	1475	2189
-35	251	0.043752	0.000295	0.001188	0.000014	0.282294	0.000012	-11.5	0.44	1359	2010
-37	294	0.045041	0.000321	0.001110	0.000004	0.282422	0.000013	-6.1	0.45	1176	1697
-38	253	0.050033	0.000124	0.001250	0.000006	0.282383	0.000012	-8.3	0.42	1236	1809
-39	270	0.036409	0.000282	0.000998	0.000013	0.282259	0.000018	-12.8	0.64	1401	2089
-40	267	0.043175	0.000475	0.001059	0.000012	0.282402	0.000010	-7.7	0.36	1202	1767
-41	252	0.087928	0.000671	0.002231	0.000020	0.282221	0.000009	-14.2	0.34	1502	2181
-45	251	0.032859	0.000133	0.000829	0.000002	0.282364	0.000011	-8.5	0.37	1248	1837
-47	263	0.029168	0.000136	0.000726	0.000006	0.282342	0.000012	-9.8	0.41	1275	1900
-48	250	0.048608	0.000256	0.001202	0.000010	0.282420	0.000011	-7.1	0.39	1183	1729
-51	252	0.053987	0.000281	0.001455	0.000012	0.282309	0.000013	-11.3	0.47	1348	1987
-52	251	0.057372	0.000487	0.001481	0.000022	0.282337	0.000012	-10.1	0.44	1308	1914
-53	257	0.053003	0.000266	0.001359	0.000006	0.282356	0.000014	-9.1	0.49	1277	1866
-55	250	0.034323	0.000302	0.000921	0.000013	0.282341	0.000013	-9.9	0.46	1284	1906
-56	251	0.034684	0.000152	0.000849	0.000005	0.282393	0.000010	-7.8	0.36	1208	1780
-57	252	0.040141	0.000294	0.001021	0.000005	0.282383	0.000011	-8.0	0.37	1229	1802
-59	267	0.037927	0.000209	0.000961	0.000007	0.282361	0.000012	-8.9	0.42	1257	1852
-60	265	0.059018	0.000194	0.001441	0.000002	0.282257	0.000012	-12.7	0.41	1420	2090
-61	254	0.034265	0.000167	0.000848	0.000009	0.282340	0.000016	-9.4	0.57	1283	1893
-66	252	0.033690	0.000311	0.000838	0.000009	0.282333	0.000014	-10.0	0.51	1292	1918
-67	267	0.108826	0.002084	0.002550	0.000036	0.282319	0.000011	-10.5	0.40	1373	1959
-68	252	0.070917	0.000209	0.001957	0.000011	0.282407	0.000014	-7.7	0.51	1225	1768
-69	252	0.047430	0.000227	0.001192	0.000010	0.282350	0.000014	-9.4	0.50	1280	1881
-70	250	0.072731	0.000507	0.001815	0.000007	0.282359	0.000012	-9.3	0.42	1289	1871
-71	251	0.047927	0.000302	0.001264	0.000016	0.282326	0.000020	-10.4	0.73	1316	1939
-73	260	0.036269	0.000173	0.000875	0.000002	0.282385	0.000013	-8.0	0.45	1220	1796

续附表 2

Continued Appendix Table 2

Spot No.	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$
-75	250	0.070082	0.000323	0.001724	0.000023	0.282343	0.000015	-9.8	0.55	1309	1906
-84	252	0.058267	0.000134	0.001381	0.000007	0.282418	0.000012	-7.1	0.42	1190	1732
-85	1050	0.056981	0.000359	0.001509	0.000018	0.282373	0.000017	-8.8	0.59	1259	1837
-86	253	0.062614	0.000730	0.001484	0.000014	0.282367	0.000011	-8.9	0.40	1266	1849
-88	251	0.053381	0.000573	0.001418	0.000021	0.282193	0.000018	-14.7	0.65	1510	2227
-89	251	0.055779	0.000387	0.001441	0.000018	0.282373	0.000014	-8.8	0.49	1256	1836
-95	276	0.117038	0.000600	0.002883	0.000030	0.282245	0.000012	-13.5	0.43	1494	2136
PLT-28-01	251	0.058085	0.000255	0.001444	0.000006	0.282349	0.000011	-9.7	0.40	1290	1893
-02	239	0.119771	0.001531	0.002982	0.000030	0.282309	0.000014	-11.7	0.49	1404	2004
-03	252	0.052725	0.000938	0.001435	0.000033	0.282239	0.000021	-13.4	0.74	1446	2133
-05	258	0.091944	0.000292	0.002286	0.000017	0.282427	0.000014	-7.0	0.49	1207	1724
-06	235	0.088575	0.000669	0.002395	0.000013	0.282362	0.000021	-9.8	0.74	1305	1883
-07	251	0.099025	0.000907	0.002428	0.000033	0.282269	0.000012	-12.7	0.43	1442	2081
-08	242	0.050880	0.000375	0.001313	0.000015	0.282225	0.000022	-14.3	0.78	1460	2173
-09	243	0.074256	0.000995	0.001814	0.000012	0.282291	0.000012	-12.0	0.41	1387	2031
-10	253	0.041428	0.000116	0.001012	0.000002	0.282389	0.000010	-8.0	0.37	1220	1794
-14	253	0.034263	0.000202	0.000948	0.000012	0.282291	0.000019	-11.6	0.66	1354	2014
-16	251	0.026095	0.000183	0.000788	0.000008	0.282208	0.000012	-14.6	0.42	1463	2201
-17	251	0.033470	0.000075	0.001012	0.000005	0.282219	0.000017	-14.3	0.60	1458	2180
-19	252	0.068196	0.000895	0.001792	0.000018	0.282256	0.000011	-12.8	0.40	1434	2097
-20	254	0.037263	0.000225	0.001013	0.000007	0.282389	0.000012	-8.1	0.42	1220	1796
-21	253	0.036578	0.000231	0.001031	0.000013	0.282318	0.000012	-10.7	0.44	1319	1956
-22	254	0.031883	0.000387	0.000815	0.000011	0.282232	0.000011	-13.7	0.38	1432	2145
-23	253	0.067453	0.000612	0.001668	0.000009	0.282343	0.000012	-9.9	0.41	1306	1906
-26	2063	0.034860	0.000263	0.000876	0.000005	0.282291	0.000010	28.4	0.37	1352	911
-28	250	0.065041	0.000231	0.001668	0.000003	0.282298	0.000012	-11.5	0.43	1370	2007
-29	251	0.088246	0.000288	0.002227	0.000008	0.282234	0.000010	-13.8	0.34	1484	2155
-30	1116	0.045217	0.000338	0.001183	0.000015	0.282321	0.000013	8.6	0.47	1320	1423
-31	252	0.025751	0.000225	0.000658	0.000007	0.282364	0.000009	-8.9	0.32	1243	1848
-32	383	0.056476	0.000277	0.001482	0.000006	0.282265	0.000010	-9.8	0.36	1410	2001
-33	252	0.053916	0.000173	0.001441	0.000009	0.282268	0.000014	-12.5	0.50	1404	2072
-34	255	0.040878	0.000197	0.001052	0.000004	0.282293	0.000009	-11.4	0.34	1355	2008
-35	276	0.091280	0.000663	0.002286	0.000011	0.282346	0.000010	-9.5	0.35	1325	1895
-36	253	0.027537	0.000103	0.000696	0.000001	0.282350	0.000011	-9.3	0.38	1264	1877
-37	413	0.076192	0.000247	0.002079	0.000011	0.282195	0.000012	-12.0	0.43	1533	2156
-38	251	0.105949	0.000878	0.002960	0.000027	0.282149	0.000024	-17.0	0.85	1639	2352
-40	403	0.039977	0.000213	0.001132	0.000004	0.282258	0.000014	-6.2	0.50	1407	1908
-41	250	0.085544	0.000235	0.002395	0.000008	0.282392	0.000011	-8.3	0.40	1261	1804
-42	251	0.061382	0.000670	0.001674	0.000012	0.282187	0.000015	-15.4	0.53	1529	2255
-43	250	0.045608	0.000204	0.001162	0.000010	0.282303	0.000012	-11.3	0.41	1345	1992
-44	252	0.053381	0.000529	0.001345	0.000013	0.282300	0.000012	-11.4	0.43	1355	1999
-46	251	0.038943	0.000147	0.001029	0.000005	0.282345	0.000011	-9.8	0.38	1282	1897
-48	255	0.065018	0.000520	0.001745	0.000012	0.282239	0.000013	-13.6	0.45	1457	2140

续附表 2

Continued Appendix Table 2

Spot No.	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{c}}(\text{Ma})$
-49	251	0.059188	0.000142	0.001675	0.000006	0.282164	0.000016	-16.3	0.56	1561	2307
-50	252	0.041262	0.000256	0.001178	0.000009	0.282203	0.000014	-14.7	0.49	1485	2213
-51	252	0.045284	0.000201	0.001260	0.000012	0.282324	0.000012	-10.5	0.44	1319	1944
-52	251	0.040943	0.000258	0.001054	0.000013	0.282346	0.000011	-9.5	0.38	1281	1888
-53	252	0.045260	0.000324	0.001143	0.000005	0.282441	0.000011	-6.3	0.38	1151	1681
-54	252	0.045476	0.000274	0.001303	0.000005	0.282246	0.000013	-13.2	0.45	1430	2118
-56	250	0.047360	0.000497	0.001262	0.000007	0.282332	0.000014	-10.0	0.49	1307	1921
-58	252	0.046044	0.000345	0.001156	0.000007	0.282325	0.000008	-10.3	0.29	1314	1937
-59	251	0.034533	0.000225	0.001031	0.000011	0.282162	0.000018	-16.2	0.62	1537	2304
-60	251	0.024969	0.000155	0.000656	0.000003	0.282325	0.000009	-10.3	0.33	1297	1935
-61	257	0.045691	0.000307	0.001191	0.000009	0.282223	0.000008	-13.6	0.30	1459	2157
-62	254	0.056906	0.000443	0.001409	0.000012	0.282339	0.000012	-9.7	0.43	1303	1904
-63	253	0.034423	0.000227	0.000965	0.000008	0.282245	0.000011	-13.1	0.40	1419	2115
-65	251	0.016833	0.000130	0.000388	0.000003	0.282259	0.000009	-12.7	0.33	1378	2081
-66	252	0.037984	0.000268	0.000999	0.000004	0.282369	0.000009	-8.8	0.32	1248	1841
-67	251	0.033661	0.000207	0.000876	0.000003	0.282353	0.000010	-9.4	0.36	1266	1876
-68	253	0.044275	0.000251	0.001208	0.000011	0.282235	0.000015	-13.5	0.52	1443	2140
-69	251	0.031193	0.000104	0.000805	0.000002	0.282373	0.000010	-8.5	0.34	1235	1825
-74	257	0.051355	0.000339	0.001286	0.000005	0.282286	0.000009	-11.8	0.31	1374	2029
-75	268	0.017338	0.000460	0.000389	0.000009	0.282014	0.000014	-21.0	0.50	1714	2618
-76	258	0.035790	0.000186	0.000998	0.000012	0.282284	0.000012	-11.8	0.42	1365	2029
-77	250	0.030485	0.000219	0.000773	0.000003	0.282477	0.000009	-5.0	0.31	1090	1598
-79	253	0.102086	0.000698	0.002403	0.000023	0.282240	0.000010	-13.5	0.35	1483	2140
-80	253	0.037385	0.000541	0.000965	0.000011	0.282276	0.000010	-12.2	0.36	1376	2050
-82	251	0.030951	0.000362	0.000826	0.000007	0.282371	0.000009	-8.8	0.32	1238	1835
-86	251	0.067452	0.000226	0.001894	0.000009	0.282160	0.000013	-16.5	0.45	1575	2318
-87	243	0.022662	0.000160	0.000591	0.000007	0.282109	0.000010	-18.2	0.34	1593	2425
-88	235	0.039163	0.000107	0.001045	0.000007	0.282274	0.000011	-12.5	0.40	1382	2061
-89	244	0.027502	0.000206	0.000770	0.000010	0.282300	0.000017	-11.3	0.60	1335	1995
-90	251	0.032478	0.000156	0.000855	0.000003	0.281933	0.000008	-17.7	0.27	1847	2625
-91	244	0.028973	0.000061	0.000752	0.000001	0.282315	0.000010	-10.8	0.35	1314	1960
-93	251	0.037738	0.000192	0.001046	0.000009	0.282271	0.000011	-12.4	0.39	1386	2062
-94	244	0.036379	0.000150	0.001083	0.000008	0.282277	0.000015	-12.1	0.54	1379	2048
-95	251	0.056347	0.000637	0.001458	0.000018	0.282298	0.000011	-11.5	0.41	1363	2006
-96	243	0.030334	0.000133	0.000800	0.000001	0.282419	0.000010	-7.2	0.37	1170	1730
-97	251	0.050389	0.000234	0.001357	0.000007	0.282309	0.000014	-11.1	0.49	1343	1979
-98	246	0.052663	0.000613	0.001421	0.000022	0.282198	0.000015	-15.1	0.52	1502	2230
-102	251	0.013506	0.000050	0.000311	0.000000	0.282907	0.000013	10.3	0.47	480	624
-103	561	0.035078	0.000252	0.000895	0.000012	0.282347	0.000013	-2.9	0.47	1274	1701
-104	251	0.050515	0.000290	0.001322	0.000014	0.282280	0.000015	-12.2	0.53	1383	2047
-105	251	0.055739	0.000285	0.001458	0.000014	0.282429	0.000017	-6.9	0.62	1178	1716
-106	927	0.039479	0.000596	0.000976	0.000010	0.282338	0.000010	4.4	0.36	1289	1512
-107	251	0.048061	0.000600	0.001324	0.000011	0.282182	0.000010	-15.4	0.35	1521	2259
-108	251	0.027368	0.000156	0.000756	0.000009	0.282241	0.000014	-13.2	0.49	1417	2122