

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.012

赤道西太平洋翁通爪哇海台西南部 25 万年以来的火山活动：来自沉积物元素地球化学的证据

路波^{1,2,3}, 李铁刚^{1*}, 于心科¹, 常凤鸣¹, 南青云¹, 仇晓华^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023

摘要: 赤道西太平洋作为全球变化关键海区, 其沉积物组成对揭示古海洋、古环境变化具有重要意义. 本文利用元素地球化学分析方法, 对赤道西太平洋翁通爪哇海台 WP7 站位(3°56'S, 156°00'E)柱状沉积物进行了研究. 结果显示元素 Al、Na、K、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta、Th、Fe 和 Mg 经 Ti 标准化后, 无法用单独的碎屑物质来源解释, 而是分别同偏酸性和偏基性火山灰相关, 指示了 249.5 ka 以来, 共发生了 4 次偏酸性火山灰输入(2.5~6.4 ka, 57.0~61.2 ka, 79.7~88.4 ka 和 193.7~249.5 ka)和 4 次偏基性火山灰输入(19.8~24.4 ka, 50.0~62.6 ka, 143.2~150.5 ka 和 160.8~171.1 ka). 火山灰的输入使沉积物元素地球化学组成发生了相应变化, 也使沉积物中碳酸钙产生了稀释效应, 从而沉积物颜色相应加深, 沉积速率显著提高.

关键词: 元素; 地球化学; 火山灰; 沉积物; 赤道西太平洋; 翁通爪哇海台.

中图分类号: P736.2; P595

文章编号: 1000-2383(2012)S1-0125-09

收稿日期: 2011-08-28

Past 250 ka Volcanic Activities in Southwest Ontong Java Plateau, West Equatorial Pacific: Evidences from Element Geochemistry

LU Bo^{1,2,3}, LI Tie-gang^{1*}, YU Xin-ke¹, CHANG Feng-ming¹, NAN Qing-yun¹, QIU Xiao-hua^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

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

3. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

Abstract: West equatorial Pacific is the key area of global change, and are important to paleo-ocean and paleo-environment reconstruction. Based on elements geochemistry of sediments of core WP7, recovered from southwest Ontong Java plateau, 4 acidic tephra inputs (2.5~6.4 ka, 57.0~61.2 ka, 79.7~88.4 ka, and 193.7~249.5 ka) and 4 mafic tephra inputs (19.8~24.4 ka, 50.0~62.6 ka, 143.2~150.5 ka, and 160.8~171.1 ka) were deciphered after normalization of Al, Na, K, Be, Ga, Rb, Zr, Nb, Cs, Ce, Hf, Ta, Th, Fe and Mg to Ti. The input of tephra changed the sediment constituents, diluted the biotic CaCO₃, darkened the sediment color, and raised the sedimentation rate.

Key words: elements; geochemistry; tephra; sediments; west equatorial Pacific; Ontong Java plateau.

赤道西太平洋翁通爪哇海台位于全球气候、环境变化的关键海区——西太平洋暖池(Yan *et al.*, 1992), 吸引了众多的古海洋学者对其进行研究(Lea *et al.*, 2000; Palmer and Person, 2003; Pichat *et al.*, 2004). 作为古海洋学研究材料的载体,

海洋沉积物提供了众多信息. 其中火山灰是沉积物的重要组成部分, 其含量和成分等对研究沉积作用和构造活动具有重要意义. 本文的火山灰(tephra)是指爆炸性火山爆发的产物, 包括火山爆发时喷射到空气中的各种火山碎屑物(隋淑珍等, 2003). 火

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(No. 2007CB815903); 中国科学院知识创新工程(No. KZCX2-YW-221); 中国科学院海洋研究所知识创新工程青年人才领域前沿项目(No. 2007-10); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 40906038); 海洋地质国家重点实验室开放基金(No. MG0903).

作者简介: 路波(1982-), 男, 博士, 海洋地质学专业. * 通讯作者: 李铁刚, E-mail: tgli@ms.qdio.ac.cn

山灰的研究方法包括粒度分析、显微镜下矿物分析、全岩元素地球化学分析(Jiang, 2010)和分离提取火山玻璃后再进行化学分析(隋淑珍等, 2003)等,其中只有沉积物元素地球化学分析才能同时满足有效、经济、方便的原则。

翁通爪哇海台位于赤道西太平洋所罗门群岛以北,总面积约 $2.0 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约由 $6 \times 10^7 \text{ km}^3$ 的火成岩组成,是世界上最大的火成岩省(LIPs)(Coffin and Eldholm, 1994)。现在的翁通爪哇海台四周被东加洛林海盆、东马里亚纳海盆、美拉尼西亚海盆和爱丽丝海盆包围;但在海台西南边界,存在着 Manus-Kilinailau 海沟和新不列颠-圣克里斯托瓦尔海沟。其中 Manus-Kilinailau 海沟现在已停止活动(Coleman and Kroenke, 1981; Petterson *et al.*, 1997)。而在新不列颠-圣克里斯托瓦尔海沟,所罗门微板块正向北俯冲至新不列颠岛、向东俯冲至所罗门群岛之下(Petterson *et al.*, 1997);俯冲带后的伍德拉克海盆(Perfit *et al.*, 1987)、马努斯海盆(Sinton *et al.*, 2003)也正处于扩张时期(图 1)。

活跃的构造背景使附近海区的沉积物组成受到火山灰的影响(向荣和阎军, 2000; Horz *et al.*, 2004)。在翁通爪哇海台西南部,向荣和阎军(2000)根据 WP7 站位($3^{\circ}56'S, 156^{\circ}00'E$, 水深 1 800 m, 图 1)的碳酸钙含量和大于 $150 \mu\text{m}$ 组分中火山玻璃的统计,发现火山灰在岩心 150~160 cm 和 380~

395 cm 处明显存在,并通过冲淡作用使得碳酸钙含量降低。本文对 WP7 站位柱状沉积物进行了元素地球化学分析,以期找到更多火山灰存在的证据。

1 材料和方法

WP7 站位柱状沉积物为重力取样,由中国科学院海洋研究所“科学一号”考察船在 1993 年采集于赤道西太平洋翁通爪哇海台西南部(图 1)。岩心全长 460 cm,其中 0~187 cm 主要为褐黄色、灰白色泥质砂(有孔虫);187~327 cm 主要为灰白色砂质泥(有孔虫泥);327~460 cm 为灰白色粘土粉砂(含少量有孔虫)(孙荣涛, 2006)。

沉积物按 2.5 cm 间隔取样,每层位取约 3 g 研磨至粒径 $< 63 \mu\text{m}$,称取其中约 40 mg 样品于 Teflon 溶样罐中消解。首先加 2 ml HNO_3 和 0.5 ml HF,封盖静置 2 h 后,于 150°C 电热板加热 24 h。随后加入 0.25 ml HClO_4 , 敞开 Teflon 罐盖子,继续于 120°C 电热板上蒸酸至近干。加入 1 ml HNO_3 和 1 ml H_2O , 密闭 Teflon 罐,于 120°C 电热板上回溶 12 h。最后用高纯 H_2O 稀释至约 40 g。

微量元素(Be, Ga, Rb, Zr, Nb, Cs, Ce, Hf, Ta 和 Th)测试在中国科学院海洋研究所电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, PE DRC II)上进行,采用国家海洋沉积物一级标准物质 GBW07316 和 GBW07315

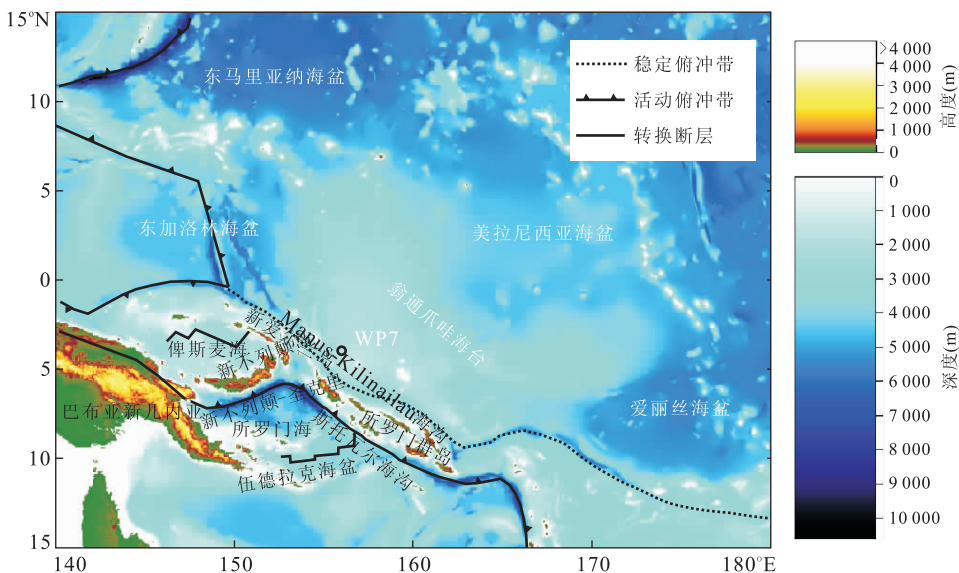


图 1 赤道西太平洋翁通爪哇海台附近地形及 WP7 站位($3^{\circ}56'S, 156^{\circ}00'E$)

Fig. 1 Bathymetry of Ontong Java plateau and nearby area in west equatorial Pacific, and location of core WP7 ($3^{\circ}56'S, 156^{\circ}00'E$) 水深据 GEBCO(<http://www.gebco.net/>);构造特征据 Hall(2002);底图通过 gridview 软件制作(https://www.bodc.ac.uk/products/software_products/gebco_grid_display/)

表 1 WP7 沉积物元素分析方法精确度

Table 1 Precision of element content analysis in core WP7

元素	测量次数	最大值	最小值	平均值	标准偏差	相对标准偏差
TiO ₂ (%)	19	0.2	0.2	0.2	0.0	5.7
Al ₂ O ₃ (%)	19	7.8	6.2	7.1	0.4	5.7
K ₂ O(%)	19	1.4	1.1	1.3	0.1	6.2
Na ₂ O(%)	19	2.9	2.2	2.6	0.2	6.5
TFe ₂ O ₃ (%)	19	2.2	1.8	2.0	0.1	5.9
MgO(%)	19	1.0	0.8	0.9	0.1	5.6
Be(μg/g)	19	0.6	0.4	0.5	0.1	12.1
Ga(μg/g)	19	8.6	7.2	8.1	0.4	4.7
Rb(μg/g)	19	22.8	18.7	21.2	1.0	4.9
Zr(μg/g)	19	41.9	34.4	39.3	2.2	5.7
Nb(μg/g)	19	3.0	2.4	2.8	0.1	5.2
Cs(μg/g)	19	0.6	0.5	0.6	0.0	4.8
Ce(μg/g)	19	13.0	10.8	12.1	0.5	4.2
Hf(μg/g)	19	1.2	1.0	1.1	0.1	5.0
Ta(μg/g)	19	0.2	0.2	0.2	0.0	5.7
Th(μg/g)	19	1.0	0.9	1.0	0.0	4.1

校准仪器,并以美国地质调查局玄武岩标准物质 BCR-2 与 BHVO-2 作质量监控.常量元素(TiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O、TFe₂O₃和MgO)在中国科学院海洋研究所电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES, Thermo iCAP 6300 Radial)上进行,采用 GBW07315 校准仪器,并以 GBW07316、BCR-2 与 BHVO-2 作质量监控.通过对同一样品 WP7-174 的多个平行样进行分析,得到 TiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O、TFe₂O₃、MgO、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 的分析精度,结果显示除 Be 为 12.1% 外,其他都在 4.1%~6.5% 之间(表 1).

为了便于比较,选用元素 Ti 代表碎屑物质,并对反映火山灰的元素进行了标准化,计算公式如下:

$$X/Ti_{\text{样品}} = X_{\text{样品}}/Ti_{\text{样品}}$$

然后选用后太古代澳大利亚页岩(PAAS)(Taylor and McLennan, 1985)代表地壳平均组成,将其相应元素比值与样品相比.若样品中元素比值高于 PAAS,则说明元素 X 在沉积物中相对富集;若样品中元素比值低于 PAAS,则说明元素 X 在沉积物中被相对稀释.相对富集或相对稀释都说明其存在碎屑物质之外的来源.

除进行地球化学分析外,还使用 Leica MZ16 显微镜对沉积物中的典型火山玻璃拍摄显微照片.

2 年龄框架

向荣和阎军(2000)据 WP7 站位有孔虫 *N. du-*

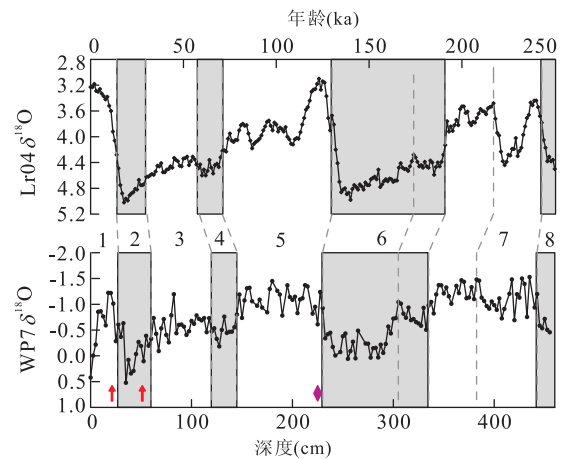


图 2 WP7 站位年龄框架

Fig. 2 WP7 age frame

箭头为 AMS ¹⁴C 测年点,据 Li *et al.* (2011);菱形为 *G. ruber* (pink) 末现面,据李铁刚等(2008)

tertrei 壳体氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 曲线和 Martinson *et al.* (1987) 标准 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比,并结合两个 AMS ¹⁴C 测年数据建立起 WP7 站位的年龄框架;随后,赵京涛等(2008)和李铁刚等(2008)先后做了修改.此处采用的年龄框架是通过 *N. dutertrei* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ (向荣和阎军, 2000) 和 LR04 标准 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线 (Lisiecki and Raymo, 2005) 对比,并结合 AMS ¹⁴C 年龄 (Li *et al.*, 2011) 和 *G. ruber* (pink) 末现面 (李铁刚等, 2008) 年龄建立的(图 2). WP7 站位的底界年龄为 249.5 ka, 沉积速率为 1.4~2.3 cm/ka.

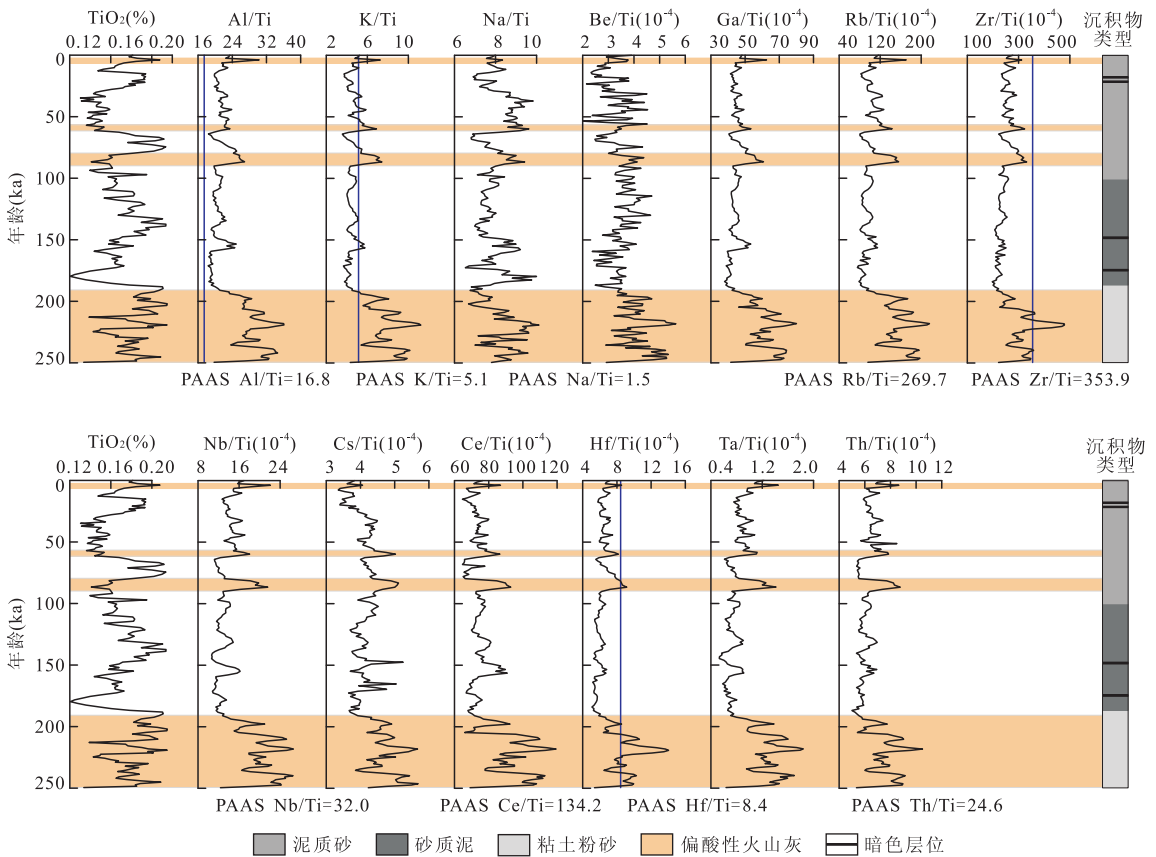


图 3 WP7 站位偏酸性火山物质相关元素与 Ti 比值

Fig. 3 The content ratio of acidic tephra related elements and some major elements to element Ti in core WP7
竖线表示 PAAS(Taylor and McLennan, 1985)中元素与 Ti 比值

3 结果

除 310.0~312.5 cm 层位样品缺失外,共得到了 183 个层位典型元素含量. 观察元素 Al、Na、K、Fe、Mg、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 与元素 Ti 含量比值随时间变化的特征,可以看到: 249.5 ka 以来, Al、Na、K、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 的变化特征相似,其中 2.5~6.4 ka、57.0~61.2 ka、79.7~88.4 ka 和 193.7~249.5 ka 时与元素 Ti 的比值都超过了 PAAS;而 Fe、Mg 变化特征相似,不同于 Al、Na、K 等,在 19.8~24.4 ka、50.0~62.6 ka、143.2~150.5 ka 和 160.8~171.1 ka 分别出现明显富集. 这些元素的富集说明除碎屑物质之外,还存在其他来源(图 3).

4 讨论

由于 Al、Na、K、Fe、Mg、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 都不能在生物中显著富集,便

可排除这些元素来源于碎屑物质和生源组分的可能性. 在沉积成岩时,除 Fe 外,其他元素都不受环境氧化还原条件变化的影响,因此也可以排除来自沉积成岩作用的可能性.

4.1 火山灰存在的元素地球化学证据

4.1.1 偏酸性火山灰相关元素 Na、K 元素化学性质活泼,在风化作用中易流失而很难在残留相中富集;Zr、Nb、Hf 和 Ta 化学性质稳定,容易在风化过程中富集于残留相中. 两类元素的共同出现说明它们除碎屑来源外的共同来源物质未经历强烈风化作用,因此推测其是火成岩物质(韩吟文等, 2003). 考虑到 Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 都是岩浆作用中的不相容元素,常富集于偏酸性火山岩中,而 Al、Na、K 等更是常见于偏酸性火成岩中(韩吟文等, 2003),所以判定 Al、Na、K、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 除碎屑物质外,主要来源于偏酸性火山灰,且它们与 Ti 元素的含量比值(图 3)反映了偏酸性火山灰的输入.

WP7 站位沉积物中 Al、Na、K、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 随时间变化的特征(图 3)

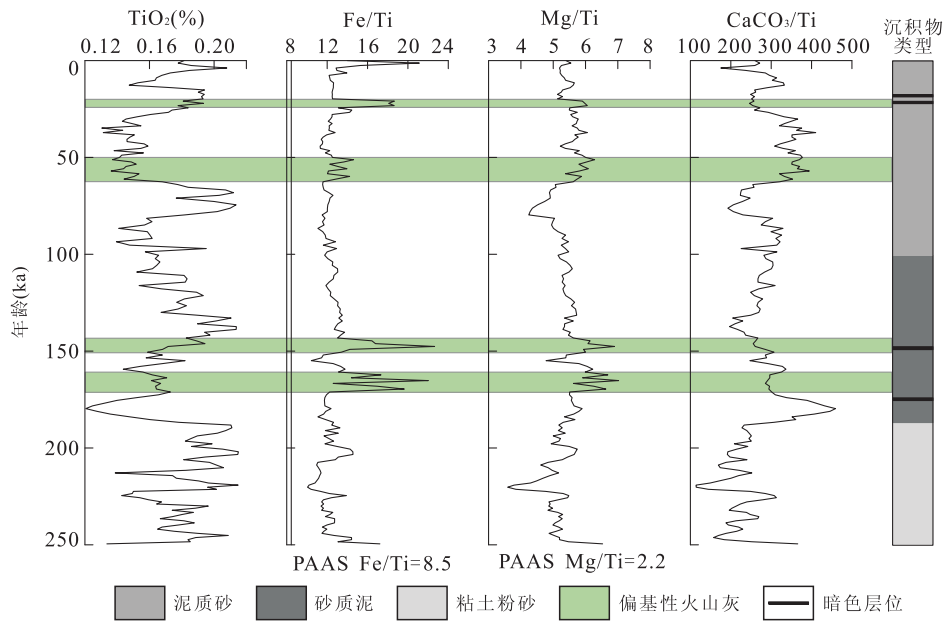


图 4 WP7 站位偏基性火山物质相关元素与 Ti 比值

Fig. 4 The content ratio of acidic tephra related elements and CaCO_3 to element Ti in core WP7

竖线表示 PAAS(Taylor and McLennan, 1985)中元素与 Ti 比值

明显不同于可代表碎屑物质的 TiO_2 。在 0 ~ 249.5 ka 时, 这些元素与 Ti 的比值整体较低且变化不大; 但在 2.5 ~ 6.4 ka、57.0 ~ 61.2 ka、79.7 ~ 88.4 ka 和 193.7 ~ 249.5 ka 时, 这些元素与 Ti 的比值明显高于其他时段, 说明这时有大量的偏酸性火山灰输入。

4.1.2 偏基性火山灰相关元素 Mg 与 Ca 为同族元素, 化学性质相似, 常以类质同相的方式进入含 Ca 矿物中。WP7 站位沉积物中碳酸钙含量高的时候, Mg/Ti 也高, 说明除碎屑物质之外, Mg 元素的可能来源还有碳酸钙(图 4)。但 Fe 并不能通过碳酸钙在沉积物中富集; 在 143.2 ~ 144.7 ka 和 160.8 ~ 171.1 ka, Mg/Ti、Fe/Ti 都有明显的小幅剧烈震荡, 而碳酸钙与 Ti 比值却无对应特征, 因此可以排除 Fe 和 Mg 除碎屑物质之外共同来源于碳酸钙的可能性。在沉积成岩环境中, Mg 元素并不受环境氧化还原变化的影响, 也可以排除来自沉积成岩作用的可能性。

类似于 Na、K 与 Zr、Nb、Hf、Ta 的关系, Mg 元素化学性质活泼, 在风化作用中易流失而很难在残留相中富集; Fe 元素化学性质稳定, 容易在风化过程中富集于残留相中。两者的共同出现说明它们除碎屑物质之外的共同来源物质未经历强烈的风化作用, 推测是火山灰(韩吟文等, 2003)。考虑到 Fe、Mg 常见于偏基性火成岩中(韩吟文等, 2003), 判定 Fe

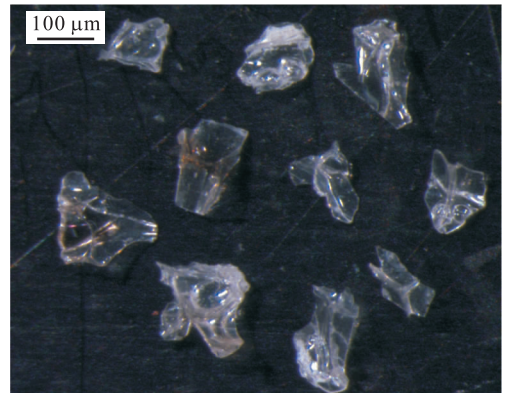


图 5 WP7 岩心沉积物中的火山玻璃

Fig. 5 Volcanic glasses in core WP7

和 Mg 元素除来源于碎屑物质外, 主要来源于基性火山灰, Fe/Ti 和 Mg/Ti 变化可以反映偏基性火山灰的输入。

WP7 站位沉积物中, Fe/Ti 和 Mg/Ti 随时间变化的特征明显不同于可代表碎屑物质的 TiO_2 (图 4)。在 19.8 ~ 24.4 ka、50.0 ~ 62.6 ka、143.2 ~ 150.5 ka 和 160.8 ~ 171.1 ka, Fe/Ti 和 Mg/Ti 变化特征相似, 且明显高于相邻层位, 说明这时有明显的偏基性火山灰输入。

4.2 火山灰存在的其他证据

在显微镜下观察, 387.5 ~ 390.0 cm 层位可以看到明显存在火山玻璃(图 5), 无色透明, 隐晶质, 尖棱角状, 有气泡。说明火山喷发时, 熔体被抛溅至

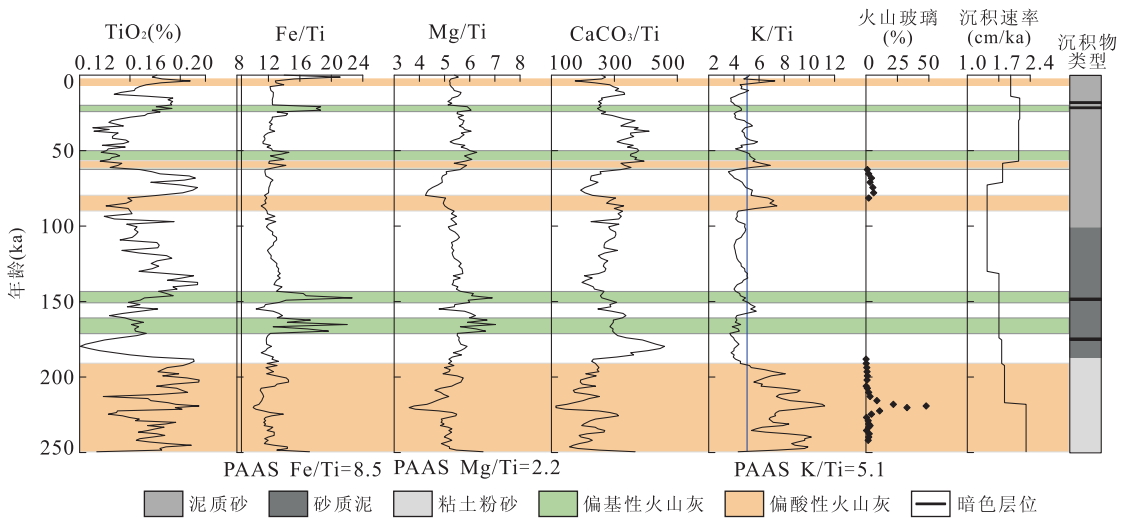


图 6 WP7 站位火山灰存在的证据

Fig. 6 Evidence of tephra existence in core WP7

空气中,内部的易挥发组分在压力减小情况下迅速成为气体,形成气泡;同时迅速冷却,随之沉降进入沉积物被埋藏,尖棱角形状得以保存。而陆源碎屑物质经远距离搬运,往往磨圆较好,内部也很少具有气泡结构。因此可以确定 WP7 沉积物中确实存在火山玻璃等火山灰物质。

据向荣和阎军(2000)对大于 $150\ \mu\text{m}$ 的组分中火山玻璃百分比的统计(图 6),在 62.6~81.4 ka 和 188.2~241.9 ka 时间段内,火山玻璃明显存在,说明当时有大量火山灰输入。

当大量火山灰输入时,其他来源的沉积物组分将被稀释而使含量显著降低。据向荣和阎军(2000),WP7 站位的碳酸钙含量在岩心 150~160 cm (74.5~81.4 ka)和 380~395 cm(215.6~222.4 ka)处明显降低,正是大量火山灰输入形成稀释效应的表现。219.2 ka 的火山玻璃百分比高达 47.8%,可能是因为该时期由 K/Ti 指示的偏酸性火山灰的输入增强而使碳酸钙含量下降,从而造成火山玻璃相对比例显著升高。

除稀释效应外,火山灰存在的沉积物层也会发生颜色变化(图 6)。在 WP7 站位,当有偏基性火山灰输入时,沉积物的颜色比相邻层位要深,呈现出褐色或灰绿色的异常变化。在 35~37 cm (17.5~18.6 ka)、42~44 cm (20.9~22.1 ka)、260.0~262.5 cm(147.6~149.1 ka)和 305.0~307.5 cm (174.0~175.4 ka),分别能看到沉积物中有褐色锈斑、褐色条带、灰绿色团块和绿灰色团块出现,且颜色比相邻层位要深(孙荣涛,2006)。

火山灰的输入增强时,沉积速率也有相应提高(图 6)。在 MIS 7 时,虽然碳酸钙含量较低,但沉积速率仍然高达 2.3 cm/ka,高于 249.5 ka 以来的平均沉积速率($\sim 1.9\ \text{cm/ka}$),说明有大量火山灰在 MIS 7 时期输入。

沉积物中的火山灰,或者以颜色、矿物组成均能明显识别的火山灰层形式出现,或者以分散形式出现(隋淑珍等,2003; Scudder *et al.*, 2009)。后者多数因火山灰微粒在水体中缓慢沉降(Ninkovich *et al.*, 1978)或层状火山灰被生物扰动等混合过程改造形成。

在显微镜下观察元素地球化学指示的火山灰层,并不是总能找到火山玻璃等火山物质,且与大于 $150\ \mu\text{m}$ 火山玻璃统计(向荣和阎军,2000)、沉积物颜色指示的火山灰层并不完全一致。这可能是分散的火山灰优先被风化形成粘土矿物(Schacht *et al.*, 2008),继而在颜色和火山玻璃统计中无法识别而在元素地球化学上却有明显改变的原因。火山玻璃百分比未能记录到所有火山灰增强的时期,可能是因为大多数火山灰物质粒径小于 $150\ \mu\text{m}$ (Rose *et al.*, 2003),未能参与统计。

WP7 位于翁通爪哇海台之上,其西部和西南部是一系列活跃的俯冲带—岛弧—盆地体系(Petterson *et al.*, 1999; Hall, 2002),火山活动非常活跃(Licence *et al.*, 1987; Horz *et al.*, 2004; Coulter *et al.*, 2009),推测正是这些地区的火山活动向 WP7 提供了大量火山灰。

虽然其他地方的火成岩、变质岩碎屑或火山物

质等经再搬运和沉积,也有可能造成 WP7 站位沉积物中火山灰相关元素的富集,形成火山灰输入的假象,但翁通爪哇海台特殊的地理位置排除了这一可能性。翁通爪哇海台远离大陆(图 1),周围无河流存在,可以排除河流携带火成岩、变质岩碎屑或被再搬运火山物质输入的影响。表层海流南赤道流(SEC)(Johnson *et al.*, 2002)和深层西边届深层流(DWBC)(Kawabe *et al.*, 2003, 2006, 2009)都来自水深更大的西南部开阔大洋,也不会带来碎屑物质和再搬运的火山物质。次表层赤道逆流(EUC)自西向东掠过翁通爪哇北部,但由于新爱尔兰岛的阻拦和自东向西流向的逆向 SEC 的阻隔,即使其携带了碎屑物质和再搬运火山物质,对 WP7 位置的影响也比较小。WP7 柱状沉积物中未见地层倒转、浊流沉积等现象,说明并无重力滑塌、浊流等发生,可以排除较老变质岩、火成岩碎屑物质带来的影响。因此 WP7 岩心沉积物的元素地球化学异常指示了翁通爪哇海台 25 万年以来的火山活动和火山灰输入。

5 结论

根据沉积物元素地球化学分析,可以得出如下结论:(1)火山灰相关元素(Al、Na、K、Fe、Mg、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th)与 Ti 的比值不同于平均页岩,反映出这些元素除陆源碎屑之外,还存在火山灰来源;元素地球化学指示的火山灰层位与火山玻璃统计、沉积物颜色指示的火山灰层并不严格一致。(2)元素 Al、Na、K、Be、Ga、Rb、Zr、Nb、Cs、Ce、Hf、Ta 和 Th 经 Ti 标准化后,指示在 2.5~6.4 ka、57.0~61.2 ka、79.7~88.4 ka 和 193.7~249.5 ka,有大量偏酸性火山灰输入。(3)元素 Fe、Mg 经 Ti 标准化后,指示在 19.8~24.4 ka、50.0~62.6 ka、143.2~150.5 ka 和 160.8~171.1 ka,有大量偏基性火山灰输入。(4)火山灰的输入对沉积物碳酸钙含量产生了稀释效应,使得沉积物颜色发生了相应变化,沉积速率也显著提高了。

致谢:在 WP7 站位沉积物地球化学分析中,殷学博、孙晗杰、陈双喜热情提供了帮助;在文章撰写过程中,徐兆凯、熊志方提出了许多有益的评论和建议,在此表示衷心的感谢!此外,两位匿名审稿人提供了中肯、深刻的评论和修改意见,使文章有很多改进,在此一并表示感谢!

References

- Coffin, M. F., Eldholm, O., 1994. Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics*, 32(1): 1–36. doi: 10.1029/93RG02508
- Coleman, P., Kroenke, L. W., 1981. Subduction without volcanism in the Solomon Islands arc. *Geo-Marine Letters*, 1(2): 129–134. doi: 10.1007/BF02463330
- Coulter, S. E., Turney, C. S. M., Kershaw, P., et al., 2009. The characterization and significance of a MIS 5a distal tephra on mainland Australia. *Quaternary Science Reviews*, 28(19–20): 1825–1830. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.04.018
- Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353–431. doi: 10.1016/S1367-9120(01)00069-4
- Han, Y. W., Ma, Z. D., Zhang, H. F., et al., 2003. *Geochemistry*. The Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Horz, K. H., Worthington, T. J., Winn, K., et al., 2004. Late Quaternary tephra in the New Ireland basin, Papua New Guinea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132(1): 73–95. doi: 10.1016/s0377-0273(03)00421-9
- Jiang, F. Q., Li, A. C., Li, T. G., 2010. Sedimentary response to volcanic activity in the Okinawa trough since the last deglaciation. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28(1): 171–182. doi: 10.1007/s00343-010-9272-2
- Johnson, G. C., Sloyan, B. M., Kessler, W. S., et al., 2002. Direct measurements of upper ocean currents and water properties across the tropical Pacific during the 1990s. *Progress in Oceanography*, 52(1): 31–61. doi: 10.1016/S0079-6611(02)00021-6
- Kawabe, M., Fujio, S., Yanagimoto, D., 2003. Deep-water circulation at low latitudes in the western North Pacific. *Deep-Sea Research Part I—Oceanographic Research Papers*, 50(5): 631–656. doi: 10.1016/s0967-0637(03)00040-2
- Kawabe, M., Fujio, S., Yanagimoto, D., et al., 2009. Water masses and currents of deep circulation southwest of the Shatsky rise in the western North Pacific. *Deep-Sea Research Part I—Oceanographic Research Papers*, 56(10): 1675–1687. doi: 10.1016/j.dsr.2009.06.003
- Kawabe, M., Yanagimoto, D., Kitagawa, S., 2006. Variations of deep western boundary currents in the Melanesian

- basin in the western North Pacific. *Deep-Sea Research Part I—Oceanographic Research Papers*, 53(6): 942—959. doi: 10.1016/j.dsr.2006.03.003
- Lea, D. W., Pak, D. K., Spero, H. J., 2000. Climate impact of Late Quaternary equatorial Pacific Sea surface temperature variations. *Science*, 289(5485): 1719—1724. doi: 10.1126/science.289.5485.1719
- Li, T. G., Zhao, J. T., Nan, Q. Y., et al., 2011. Paleoproductivity evolution in the center of the western Pacific warm pool during the last 250 ka. *Journal Quaternary Science*, 26(5): 478—484. doi: 10.1002/jqs.1471
- Li, T. G., Zhao, J. T., Sun, R. T., et al., 2008. Paleoproductivity evolution in the Ontong Java plateau—center of the western Pacific warm pool during the last 250 ka. *Quaternary Sciences*, 28(3): 447—457 (in Chinese with English abstract).
- Licence, P. S., Terril, J. E., Fergusson, L. J., 1987. Epithermal gold mineralisation, Ambitle Island, Papua New Guinea. Proceedings of the Pacific Eim congress. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20(1): PA1003. doi: 10.1029/2004PA001071
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., et al., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27(1): 1—29. doi: 10.1016/0033-5894(87)90046-9
- Ninkovich, D., Sparks, R. S., Ledbetter, M. J., 1978. The exceptional magnitude and intensity of the Toba eruption, Sumatra; an example of the use of deep-sea tephra layers as a geological tool. *Bulletin of Volcanology*, 41(3): 286—298. doi: 10.1007/BF02597228
- Palmer, M. R., Pearson, P. N., 2003. A 23 000-year record of surface water pH and $p\text{CO}_2$ in the western equatorial Pacific Ocean. *Science*, 300(5618): 480—482. doi: 10.1126/science.1080796
- Perfit, M. N., Langmuir, C. N., Baekisapa, M., et al., 1987. Geochemistry and petrology of volcanic rocks from the Woodlark basin; addressing questions of ridge subduction. *Marine Geology, Geophysics, and Geochemistry of the Woodlark Basin-Solomon Islands*, 7: 113—154.
- Petterson, M. G., Babbs, T., Neal, C. R., et al., 1999. Geological-tectonic framework of Solomon Islands, SW Pacific; crustal accretion and growth within an intra-oceanic setting. *Tectonophysics*, 301(1—2): 35—60. doi: 10.1016/S0040-1951(98)00214-5
- Petterson, M. G., Neal, C. R., Mahoney, J. J., et al., 1997. Structure and deformation of north and central Malaita, Solomon Islands; tectonic implications for the Ontong Java plateau-Solomon arc collision, and for the fate of oceanic plateaus. *Tectonophysics*, 283(1—4): 1—33. doi: 10.1016/S0040-1951(97)00206-0
- Pichat, S., Sims, K. W. W., Francois, R., et al., 2004. Lower export production during glacial periods in the equatorial Pacific derived from $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ measurements in deep-sea sediments. *Paleoceanography*, 19(4): PA4023. doi: 10.1029/2003PA000994
- Rose, W. I., Riley, C. M., Darteville, S., 2003. Sizes and shapes of 10 Ma distal fall pyroclasts in the Ogallala Group, Nebraska. *The Journal of Geology*, 111(1): 115—124. doi: 10.1086/344668
- Schacht, U., Wallmann, K., Kutterolf, S., et al., 2008. Volcanogenic sediment-seawater interactions and the geochemistry of pore waters. *Chemical Geology*, 249(3—4): 321—338. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.01.026
- Scudder, R. P., Murray, R. W., Plank, T., 2009. Dispersed ash in deeply buried sediment from the northwest Pacific Ocean; an example from the Izu-Bonin arc (ODP site 1149). *Earth and Planetary Science Letters*, 284(3—4): 639—648. doi: 10.1016/j.epsl.2009.05.037
- Sinton, J. M., Ford, L. L., Chappell, B., et al., 2003. Magma genesis and mantle heterogeneity in the Manus back-arc basin, Papua New Guinea. *Journal of Petrology*, 44(1): 159—195. doi: 10.1093/petrology/44.1.159
- Sui, S. Z., Liu, J. Q., Guo, Z. F., et al., 2003. Extraction and measuring techniques of volcanic ash. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 111—116 (in Chinese with English abstract).
- Sun, R. T., 2006. Research of the paleoenvironment of the Kuroshio current system and the warm pool during the Late Pleistocene (Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust; its composition and evolution. Blackwell, Oxford.
- Xiang, R., Yan, J., 2000. Calcium carbonate depositional characteristics and their paleoceanographic implication in the western equatorial Pacific during the past 240 ka. *Oceanologica et Limnologica Sinica*, 31(5): 535—542 (in Chinese with English Abstract).
- Yan, X. H., Ho, C. R., Zheng, Q., et al., 1992. Temperature and size variabilities of the western Pacific warm pool. *Science*, 258(5088): 1643—1645. doi: 10.1126/science.258.5088.1643

Zhao, J. T., Li, T. G., Chang, F. M., et al., 2008. Variations of paleoproductivity in the nuclear region of western Pacific warm pool since MIS 7: response to ENSO-like process. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(4): 87–94 (in Chinese with English Abstract).

附中文参考文献

韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等, 2003. 地球化学. 北京: 地质出版社.

李铁刚, 赵京涛, 孙荣涛, 等, 2008. 250 ka B. P. 以来西太平洋暖池中心区——Ontong Java 海台古生产力演化. 第

四纪研究, 28(3): 447–457.

隋淑珍, 刘嘉麒, 郭正府, 等, 2003. 火山灰的提取及测试技术. *地学前缘*, 10(1): 111–116.

孙荣涛, 2006. 黑潮流系与暖池区晚更新世以来的古环境研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.

向荣, 阎军, 2000. 240 ka 以来西赤道太平洋碳酸钙沉积特征及其古海洋学意义. *海洋与湖沼*, 31(5): 535–542.

赵京涛, 李铁刚, 常凤鸣, 等, 2008. 西太平洋暖池核心区 MIS 7 期以来的古生产力变化: 类 ENSO 式过程的响应. *海洋学报*, 30(4): 87–94.