

# 火山灰年代学:原理与应用\*

陈宣谕<sup>1,2</sup> 徐义刚<sup>1</sup> Martin MENZIES<sup>1,3</sup>

CHEN XuanYu<sup>1,2</sup>, XU YiGang<sup>1</sup> and Martin MENZIES<sup>1,3</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. 伦敦大学皇家霍洛威学院地球科学系,萨里 TW20 0EX

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. Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London, Surrey TW20 0EX, UK

2014-01-02 收稿, 2014-07-12 改回.

**Chen XY, Xu YG and Menzies M. 2014. Tephrochronology: Principles and applications. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3491–3500**

**Abstract** Tephrochronology is based on the study of volcanic ash (<2mm) layers which are effectively time equivalent horizons. Direct or indirect dating of ash layers is possible if suitable fresh "primary" phenocrysts (e.g. sanidine, zircon, apatite) or extrinsic dateable materials (e.g. charcoal) exist. But in the majority of deposits, especially distal tephra deposits, this is not possible as they are dominated by juvenile clasts. A widely used alternative is the geochemistry of volcanic glass (magma) that occurs as juvenile (magmatic) particles found in both visible ash layers (<2mm) and invisible cryptotephra particles (usually <~125 microns) in proximal and distal deposits. These fresh glasses can be analysed for major, minor and trace elements and specific isotopes (e.g. Pb) using electron, laser and ion probe technologies. Proximal-distal matching of chemistries allows for time equivalent horizons to be linked in both time and space thus providing a powerful correlative tool that helps synchronise distal and proximal environmental, archaeological and volcanic archives. Vital age information exists in both proximal volcanic deposits (<sup>14</sup>C, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, U-Th) and distal ash layers allowing for cross-validation and integration of age information. The addition of relative age information (i.e., stratigraphy, annual layers) in distal marine and lacustrine deposits offers a powerful framework for unravelling the precise "order" of volcanic, environmental and archaeological event. Tephrochronology is applied across Earth Sciences and is particularly useful in Quaternary research for the synchronisation of multiple archives in the evaluation of causative links between volcanic eruptions, climate/environmental change and human evolution/migration.

**Key words** Tephra; Cryptotephra; Tephrochronology; Tephrostratigraphy; Age-equivalent dating; Volcanic glass

**摘要** 火山灰(<2mm)等时标志层是火山灰年代学研究的基础。火山灰地层的直接或间接测年依赖于火山灰中存在合适的原生矿物(如:透长石、锆石、磷灰石)或外来物质(如:炭化木)。然而大多数火山灰沉积层,尤其是远源火山灰,其主要由岩浆碎屑构成,开展测年显得十分困难。利用火山玻璃(岩浆)的地球化学,是一种被广泛应用的替代性方法。火山玻璃作为岩浆源物质普遍出现在各类近源、远源可见火山灰层和显微火山灰中,其主量、微量元素含量和特定的同位素组成能被电子、激光和离子探针技术准确测定。近源-远源玻璃化学成分的相互匹配,使得火山灰等时标志层得以在时间和空间上相互关联,构成有力的地层学工具,用以同步各类环境、考古和火山活动记录。近源火山沉积和远源火山灰层中的年龄信息得以实现交叉验证和整合。远源海洋、湖泊沉积中的相对年龄信息(氧同位素地层学,年纹层年代学)也为揭示火山活动、古环境变化和考古学事件的时间顺序提供了可能。火山灰年代学在地球科学中应用广泛,尤其是对于第四纪研究,其在同步各类记录从而评估火山活动、气候/环境变化和人类演化/迁移的因果关系中具有至关重要的作用。

**关键词** 火山灰;显微火山灰;火山灰年代学;火山灰地层学;等时定年;火山玻璃

中图法分类号 P317

\* 本文受中国科学院国际合作局对外合作重点项目(132744KYSB20130005)和国家重点基础研究规划项目(2011CB808906)联合资助。

第一作者简介:陈宣谕,男,1989年生,博士生,火山学和地球化学专业,E-mail: chenxy55@foxmail.com

## 1 引言

火山灰(Tephra)在广义上指火山喷发过程产生的所有未固结的火成碎屑产物(Lowe, 2011),按粒径大小可分为火山块或火山弹(>64mm)、火山砾(2~64mm)以及(狭义)火山灰(<2mm)。火山灰年代学(Tephrochronology)最原始的定义是指通过火山灰地层关联构成等时标志层,并利用其对海洋、湖泊、冰芯以及大陆等各类沉积层序进行链接、同步和定年(Thorarinsson, 1944)。如今广义的火山灰年代学囊括了火山灰地层学(Tephrostratigraphy)和年代学两大部分的内容(Lowe, 2011)。

年代学中涉及的火山灰测年(Tephrochronometry)包括直接和间接方法(Lowe, 2011)。直接测年利用火山灰中的原生矿物或玻璃确定火山灰年龄,主要包括 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、U-Th/He、裂变径迹等方法;间接测年利用包裹火山灰或被火山灰包裹的外来物质间接地确定火山灰年龄,主要包括 $^{14}\text{C}$ 、年纹层计数等方法。然而,受限于合适定年物质的获取以及年龄适用范围的限制,没有一种测年方法能够广泛地适用于所有火山灰地层,特别是远源沉积层序(如深海、湖泊、冰芯和黄土等)中的显微火山灰。与之存在诸多限制不同,火山灰年代学以地层关联为基础,实现火山灰标志层之间年龄信息的传递和交换,是一种不可多得的“等时”定年方法(age-equivalent dating method)。特别是最近一、二十年来,火山灰年代学家在显微火山灰(cryptotephra)的探测、提取和化学成分分析等方面取得的革命性进展(Blockley *et al.*, 2005; Pearce *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2008; Tomlinson *et al.*, 2010; Kylander *et al.*, 2012),极大地扩展了火山灰等时标志层在空间上的覆盖范围,使这类肉眼不可见的微细火山灰在第四纪各学科,如地层学、年代学、火山学、古气候学和考古学的研究中发挥了至关重要的作用(Bourne *et al.*, 2010; Moriwaki *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2011; Lowe *et al.*, 2012; Lane *et al.*, 2013; Albert *et al.*, 2013, 2014; Sun *et al.*, 2014a)。

本文旨在介绍火山灰年代学,包括火山灰的特征识别(fingerprinting)、关联(correlation)、测年法(chronometry)、年龄传递(age transfer)及其在沉积层序链接(linking)、同步(synchronization)和定年(dating)中的应用等内容。

## 2 火山灰年代学的基本原理

火山作用是自然界中的一种重要的地质作用。火山喷发的岩浆在成分上可以从基性的镁铁质变化至酸性的长英质,镁铁质岩浆遇水会形成爆炸性的射气岩浆喷发(phreatomagmatic eruption);长英质岩浆比镁铁质岩浆更富挥发分,通常形成爆炸性极强的普林尼式(Plinian)或超普林尼式(Ultraplinian)喷发。所有爆炸性火山喷发都可以产生火

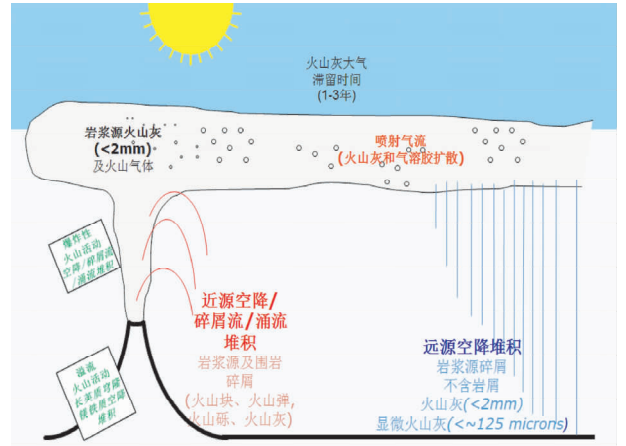


图1 火山喷发及其产生的近、远源火山堆积示意图(据Robock, 2000 修改)

各类爆炸性火山喷发均能产生火山碎屑(包括岩浆源碎屑以及围岩岩屑),在普林尼式到射气普林尼式喷发过程中,喷出的细粒岩浆源碎屑和火山气体能抵达平流层底部并随喷射气流长距离运移。对于处于上浮状态的喷发柱,碎屑物的降落会形成空降堆积,而当喷发柱最终发生垮塌,将形成火山碎屑流和涌流堆积。各类火山堆积中均可提取出火山玻璃,但提取的容易程度为:原生空降堆积>火山碎屑流堆积>涌流堆积

Fig. 1 Schematic illustration of volcanic eruptions and their production of proximal and distal volcanic deposits (after Robock, 2000)

Pyroclasts (juvenile [magmatic] and lithic [pre-existent rock]) are produced during all types of explosive eruptions but in the case of Plinian to Phreatoplinian eruptions fine juvenile particles and gases are transported to the base of the stratosphere and dispersed by the jet stream. Whilst the eruptive column is buoyant, sedimentation of particles produces fall deposits but eventual collapse of the column produces pyroclastic flow and surge deposits. Volcanic glass can be recovered from all types of volcanic deposits but juvenile material tends to be most easily recoverable from primary fall deposits > pyroclastic flow deposits > surge deposits

山碎屑物质(广义火山灰),而在普林尼式、超普林尼式或射气普林尼式喷发中,喷发柱能够达到平流层的高度,喷出的细粒岩浆源碎屑(狭义火山灰)和火山气体可随喷射气流长距离运移(图1)。颗粒较粗的火山碎屑通常堆积在火山口附近,形成近源空降堆积(proximal fall deposits, 图2),而细粒岩浆源碎屑则可在远离火山口的位置沉降,形成远源(distal)空降堆积。根据火山灰沉降的位置,远源空降堆积可有陆相(如:洞穴、冰芯等)、海相和湖相三类。除了空降堆积,当含有大量火山碎屑物质的喷发柱发生垮塌时,火山口及其周围的区域会被火山灰流横扫而过,形成火山碎屑流堆积(pyroclastic flow deposits)与涌流堆积(surge deposits)。与气溶胶组分不同,火山爆发喷出的固体碎屑物(包括火山玻璃、矿物晶体、浮岩和岩屑等)通常在数分钟至数天的尺度内快速沉降(Lowe, 2011),即使是颗粒极细的火山灰(<2mm)



图2 长白山天池火山口的近源空降堆积

Fig. 2 Proximal fall deposits at Tianchi volcanic crater, Changbaishan

甚至是火山尘 ( $< 1/16\text{mm}$ ), 其在大气中的滞留时间通常只有 1~3 年。

如果近源和远源火山灰沉积属于同一次喷发, 那么不管它们之间的距离如何, 两者中玻屑的化学成分是相同的, 这是火山灰年代学的基点。其次, 被研究的火山灰需要具有诊断性特征, 从而在特征识别之后可开展地层间的对比关联。再者, 由于火山灰的喷发、运移和在不同区域降落、沉积的整个过程在地质时间尺度上被认为是近乎瞬时的 (Lowe, 2011), 因此各处发现的同次火山喷发产物具有相同的年龄, 构成所谓的“时间标志层”。若能通过一种或多种定年方法确定火山灰的绝对年龄, 则该年龄可在这类时间标志层之间进行传递, 为各类沉积层序, 特别是常规测年方法开展受限的地层带来了间接定年的可能。图 3 示意了利用玻屑的地球化学特征进行火山灰关联的原理。主量元素二元图解显示湖相沉积中的下层火山灰 (+) 与近源沉积单元 Unit 3 很好地匹配, 二者为同次火山喷发的产物 (PG Albert pers. comm., 2013)。如果近源产物 Unit 3 能精确测年, 就可知道其对应物在湖泊沉积层位的绝对年龄, 与其他定年结果交叉验证, 并为其余沉积层提供相对年龄制约。反之, 也可以用湖泊年代学结果制约 Unit 3 火山活动的年龄, 尤其是同位素定年失效的近代火山喷发。当然, 火山灰地层匹配绝非仅仅依靠玻屑的主量元素特征, 可靠的关联结果通常需要多方面证据的共同制约, 其中包括但不限于诸如地层学信息 (相对年龄)、铁镁矿物组合、玻屑的形态学与元素、同位素地球化学特征等等, 综合利用上述信息方可成功区分不同来源的火山灰。

在火山灰的特征识别和地层关联方面, 随着研究的深入, 遇到了如下的挑战。其一, 研究表明, 成分类似且在主、次要元素上无法区分的岩浆可以在一段相当长的时期内多次从同一个火山中心喷发 (Brendryen *et al.*, 2010; Tomlinson *et al.*, 2012a; Albert *et al.*, 2013)。这一岩浆存留与再活化现象导致同源但不同期次喷发的火山灰无法仅靠主量元素进行区分, 该类火山灰的匹配关联需要用到更大范围的微量

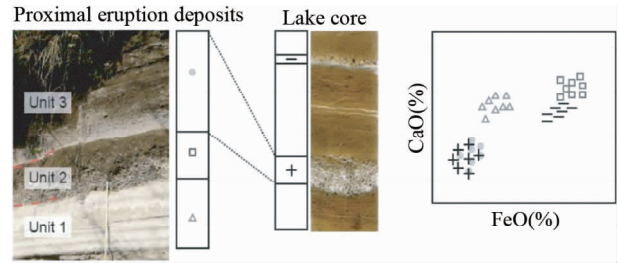


图3 火山灰地层关联示意图 (PG Albert pers. comm., 2013)

利用玻屑的地球化学, 将湖泊中的远源火山灰层与近源沉积单元相互关联。主量元素图解揭示近源沉积单元 unit3 与一层远源火山灰 (+) 成功关联, 而 units1&2 则无法与远源火山灰匹配

Fig. 3 Schematic illustration of the correlation of tephra layers (PG Albert pers. comm., 2013)

The use of the glass geochemistry to correlate the lacustrine distal tephra layers to their proximal counterparts. Major element data reveals that the proximal upper unit 3 correlates with a distal layer (+) whereas proximal units 1&2 do not correlate with any distal layers

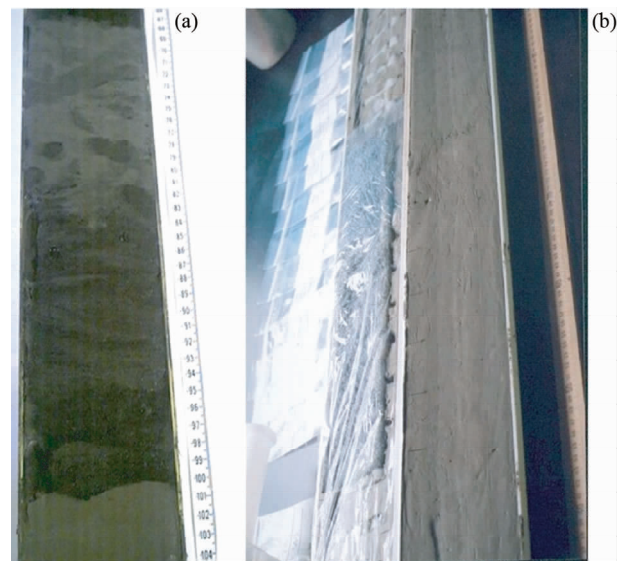


图4 海相或湖相远源火山灰

(a) 肉眼可见的次生火山灰层 ( $< 2\text{mm}$ ); (b) 肉眼不可见的显微火山灰 (通常  $< \sim 125\mu\text{m}$ , 据 Lowe, 2011)

Fig. 4 Distal tephra in marine or lake sediments

(a) reworked visible tephra layers ( $< 2\text{mm}$ ); (b) non-visible cryptotephra (usually  $< \sim 125\mu\text{m}$ , after Lowe, 2011)

元素或是同位素特征。其二, 受限于分析技术, 过去人们仅可对火山玻屑的微量元素或同位素进行“bulk analysis”。Ukstins Peate *et al.* (2008) 的研究显示, 小于 1mm 的带状玻屑之内可以存在极大的地球化学不均一。为避免真实信息被平均, 火山玻屑的“spot”分析方法亟待发展。其三, 随着距离火山口越来越远, 火山灰层从肉眼可见 (图 4a) 变为不可见 (图 4b), 该类散布于沉积物中的显微火山灰通常只包含少量极细小的火山玻屑 (图 5), 这对玻屑的微区分析提出

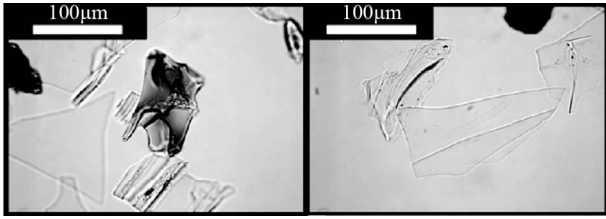


图5 挪威 Kråkenes 湖相火山灰 Vedde Ash 中的火山玻璃屑(据 Lane *et al.*, 2012)

Fig. 5 Photomicrograph of glass shards from the Vedde Ash in Kråkenes, Norway (after Lane *et al.*, 2012)

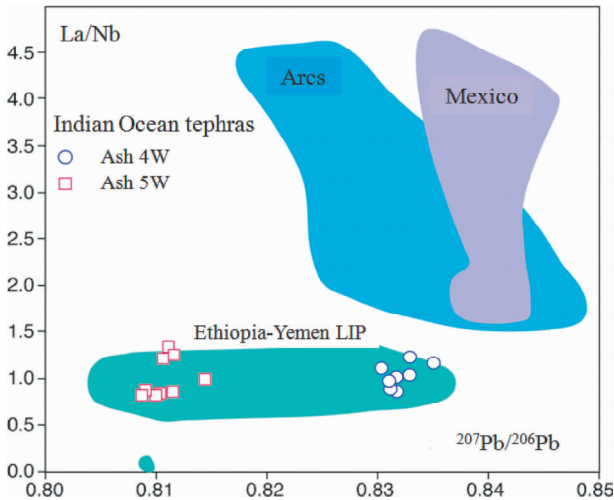


图6 利用微量元素比值结合同位素特征精确匹配近源-远源火山灰(据 Ukstins Peate *et al.*, 2003)

印度洋火山灰样品(4W, 5W)在微量元素-同位素二元图解中落入埃塞俄比亚-也门大火成岩省所在区域,显著区别于其他可能来源  
Fig. 6 The use of trace element ratio combines with isotopic characteristic to precisely match the proximal and distal tephtras (after Ukstins Peate *et al.*, 2003)

Indian Ocean tephtras (4W and 5W) plot within the range of Ethiopia-Yemen LIP in the trace element/isotope biplot which remarkably distinguishes from other possible source volcanoes

了更高的要求。近年来,微区分析在技术和方法上的改进(Pearce *et al.*, 2007; Tomlinson *et al.*, 2010),为上述问题的解决提供了可能。使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)或二次离子探针质谱(SIMS),玻璃屑的微量元素含量能在小至 5 ~ 57 μm 的范围内被准确测定(Tomlinson *et al.*, 2012a, b; Albert *et al.*, 2014)。利用大范围微量元素特征(从不相容元素到相容元素)进行火山灰地层的匹配,能够获得统计学上更为可靠的关联结果。图6示意了利用火山玻璃屑的微量元素结合同位素特征精确匹配近源-远源火山灰。印度洋火山灰样品在微量元素-同位素二元图解中落入埃塞俄比亚-也门大火成岩省所在区域,显著区别于其他可能来源,因此两者较好地关联(Ukstins Peate *et al.*, 2003)。图7是一种更为理想的火山灰匹配结果,近源产物 CI lower

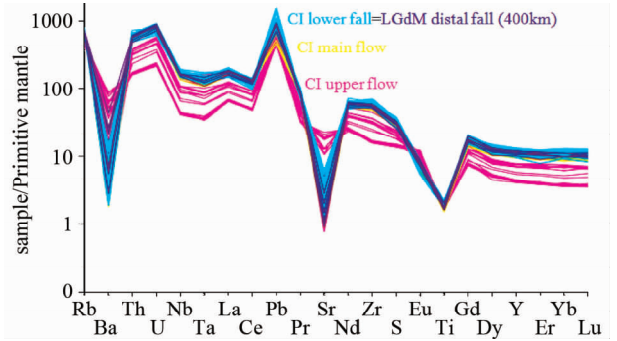


图7 多种微量元素共同制约为近源-远源火山灰关联提供了统计学上更为稳健的结果(据 Tomlinson *et al.*, 2012a)

近源产物 Campanian Ignimbrite (CI) 的特征揭示了由深部或浅部过程产生的化学不均一性(红黄蓝三色曲线), LGdM 湖泊远源火山灰微量元素特征(紫色)与近源产物中最分异的组分(CI lower fall)精确匹配

Fig. 7 Multi-elemental data offer a more statistically robust match of the proximal and distal tephtra chemistry(after Tomlinson *et al.*, 2012a)

The proximal fingerprint of Campanian Ignimbrite (CI) reveals chemical heterogeneity due to deep or shallow processes (red/yellow/blue curves). LGdM distal lake tephtras perfectly match the most fractionated proximal component (CI lower fall)

fall(蓝色)与 400km 以外的湖相火山灰 LGdM distal fall(紫色)在微量元素蛛网图中精确匹配,多种微量元素共同制约使得这一火山灰关联结果从统计学角度来看更为可信(Tomlinson *et al.*, 2012a)。

综上所述,火山灰年代学是一种近来发展较快的“等时”定年方法。其包含火山灰地层学和火山灰测年两大部分,强调在火山灰地层学研究(地层关联)的基础上,利用火山灰测年的结果,进行等时标志层之间年龄信息的传递和交换,从而达到对不同沉积层序进行链接、同步和定年,以及多元年龄结果间交叉验证的目的。

### 3 火山灰测年方法简介

火山灰年代学的年龄传递建立在火山灰测年的基础之上。通常来说,近源火山碎屑颗粒较大,更可能含有合适物质可以进行直接或间接测年,常见方法包括矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、(U-Th)/He法,有机质的 $^{14}\text{C}$ 法等等。对于湖相或海相远源火山灰,其颗粒较细甚至肉眼不可见,间接测年中的 $^{14}\text{C}$ 方法成为了主流。而在某些情况下,利用湖泊沉积物和冰芯中的年纹层计数(varve-counting)以及深海氧同位素天文年代标尺(astronomical timescale),也能有效地对远源火山灰进行年龄约束。下面简介各类测年方法的优缺点及其应用实例。

$^{14}\text{C}$ 方法精度较高,适用于小于~50ka的年轻火山作用

的定年(Reimer *et al.*, 2009)。以长白山天池火山的千年大喷发(Millennium Eruption)为例,大量 $^{14}\text{C}$ 测年工作间接地给出了包裹炭化木的火山灰的年龄,但校正问题的存在,使得这一事件准确的喷发时限至今仍有争议,不同研究得到的 $^{14}\text{C}$ 年龄校正结果有较大的差别:如1200~1230AD(Liu *et al.*, 1998)、949~989AD(Horn and Schmincke, 2000)、930~943AD(Nakamura *et al.*, 2007)和945~960AD(Yatsuzuka *et al.*, 2010)等等。最近,Yin *et al.* (2012)利用天池火山口四节炭化木共82个全新AMS  $^{14}\text{C}$ 年龄进行摇摆匹配(wiggle-match)定年,结果为923~939AD(95.4%),结合东亚气候变化的历史记录,推断千年大喷发的时间为938AD晚秋至939AD早春之间。这一结论与Fukusawa *et al.* (1998)利用湖泊沉积物年纹层计数得到的千年大喷发远源火山灰(B-Tm)的定年结果937~938AD相一致(通过湖泊沉积物中B-Tm火山灰与时间标志层To-a火山灰(915AD)之间的年纹层计数,确定B-Tm年龄)。Xu *et al.* (2013)报道了千年大喷发中一节被烧焦树干的27个等间距连续采样AMS  $^{14}\text{C}$ 年龄,通过摇摆匹配,得到940~952AD(95.4%)这一结果。结合外国史书资料,该研究给出了946AD冬天这一喷发时间。上述两项最近的研究表明,即使是比单一年龄结果更为可靠的摇摆匹配 $^{14}\text{C}$ 定年,也无法给出一致的千年大喷发年龄。该事件喷发时限的准确厘定,仍有待利用火山灰年代学进一步开展多种测年方法交叉验证的工作。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法同样具有较高的精度,但其对于超年轻的火山岩仍无法给出可靠的年龄结果,且目前国际上只有极少数的实验室能做出误差为千年尺度的年代学数据。例如,Yang *et al.* (2014)对天池火山口附近地层开展了系统的采样工作,挑出的透长石晶体进行激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,得到了5个20ka以来的年龄,其中3个是坪年龄数据,另外2个5ka以内的年龄则是通过数据分析获得,可靠性有待验证。该研究暗示天池火山冰后期火山活动可能比先前认识到的要更为频繁。

对于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法,未知捕获晶、包裹体的存在将导致给出错误的年龄结果(Yang *et al.*, 2014);而对于 $^{14}\text{C}$ 定年,随着年龄变老而增大的校正曲线的不确定性,影响了该方法在接近定年上限处(约40~50ka)的年龄精度(Reimer *et al.*, 2009)。最近发展起来的锆石(U-Th)/He方法,结合 $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$ 不平衡定年一起使用(Schmitt *et al.*, 2011; Danišik *et al.*, 2012),一定程度上弥补了上述方法的不足。与K/Ar衰变体系相比,U-Th衰变的积累在(U-Th)/He体系中显得更为敏感;加之 $^4\text{He}$ 在体系中能够快速扩散,因此极少存在捕获晶中的初始 $^4\text{He}$ 对年龄产生干扰的情况。而与 $^{14}\text{C}$ 方法相比,(U-Th)/He测年范围覆盖了其无法企及的~50ka至300ka的时间窗口,且锆石作为副矿物在酸性火山岩中较为常见。因此该方法有望被广泛应用于酸性火山灰定年,是第四纪火山作用年代学研究的又一有力手段。Danišik *et al.* (2012)利用该方法确定了广泛用于关联西南太平洋区域海

相-陆相沉积层序的Rotoehu火山灰的年龄,并用 $^{14}\text{C}$ 方法开展年龄间的交叉验证,确证了(U-Th)/He喷发年龄的可靠性。

年纹层年代学和天文年代标尺分别适用于湖相和海相火山灰的定年。湖泊尤其是玛珥湖中常常发育有年纹层,这是一种以年为单位的沉积层理,它能记录每年的季节变化。利用扫描电镜或X射线照相技术识别出湖泊沉积物中纹泥和硅藻的沉积韵律,便可得到如同树木年轮般的相对年龄序列,且其时间分辨率可达季节尺度。把年纹层揭示的相对年龄与用某种合适物质测量的绝对年龄相结合,便在这一沉积剖面建立起了高分辨率绝对时间序列(刘嘉琪等,1996)。深海沉积物也可利用有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 作为材料,建立高分辨率天文年代标尺,从而得到深海剖面的钻孔深度-氧同位素-年龄三者间的关系。Tian *et al.* (2002)根据南海大洋钻探184航次1143站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 资料,建立了西太平洋地区跨越5Ma、分辨率达2~3ka的天文调谐年代标尺。有了上述时间标尺,湖相或海相火山灰层均可根据其所处的层位得到其绝对年龄的估算(Lee *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2009; Brendryen *et al.*, 2010)。例如, Lee *et al.* (2004)利用天文年代标尺估算了深海钻孔中发现的Toba火山灰的绝对年龄,并据此将Oldest Toba Tuff(OTT)的年龄修正至 $788 \pm 2.2\text{ka}$ 。Liu *et al.* (2009)根据小龙湾玛珥湖连续的年纹层沉积(包括甲藻、金藻及碎屑年纹层),建立了我国龙岗火山区15ka以来的火山作用时间序列。

## 4 火山灰年代学方法的优、缺点

火山灰年代学近年来发展较快,显微火山灰提取和分析技术的革新,使其具备了普通年代学方法所不具有的时空优点。该方法并非对火山灰地层进行测年,而是通过地层关联从而实现不同沉积剖面之间年龄信息的交换和传递。与单一火山灰测年方法相比,火山灰年代学整合了各类测年方法的结果,并提供多元年龄间交叉验证的可能,在校正各类沉积层序的年龄-深度曲线方面起到关键作用。此外,对于具有诊断性特征的火山灰层,即使其物源、年龄均无法确定,其作为标志地层的作用仍然存在。换句话说,只要同次火山喷发产物能从不同沉积相中被识别出来,它们就可当作地层学工具用于链接、同步各类沉积层序,极大地方便了古环境古气候记录的对比研究。

火山灰年代学依赖于不同沉积层序中火山灰地层的对比关联,这要求一次爆炸性喷发的产物的体积量要大、面积分布要广,并非所有的爆炸喷发都能达到可对比的程度,因而该方法在应用上还存在一定限制。此外,方法本身的误差或精度以及可靠性尚存在一定问题,火山灰地层关联的可靠性以及火山灰测年的精度和准确度均会制约火山灰年代学工作的开展。许多因素均可能导致火山灰地层被错误关联,例如:(1)不完整的近源火山沉积单元,造成近源-远源

关联出现困难;(2)远源沉积层序中的火山灰层遭受二次剥蚀、搬运发生再沉积,造成地层对比的混乱;(3)具有类似组成的火山灰多次从同一火山中心喷发,使这类火山灰不具备诊断性特征;(4)火山灰喷发或长距离运移过程中发生的成分分异而造成火山灰关联困难,譬如同次喷发过程在近源沉积有铁镁质和长英质组分而在远源仅出现最演化的组分;(5)近源火山灰强烈风化或远源火山玻璃发生水化造成特征识别的困难等等。

## 5 火山灰年代学的应用领域

火山灰作为等时面和火山作用标志,在第四纪各学科中都有重要应用。火山灰年代学经典的应用领域包括地层学、年代学、岩石学、火山学、地貌学、冰川学、古气候学和考古学等,而最近其应用还被扩展至诸如评估古大气环流模式、古地震学、新构造运动、动植物生物多样性、生物地理学甚至是人类进化史研究等领域(Lowe, 2011)。本文举例进行介绍。

### 5.1 年代学——湖泊沉积物定年

通过火山灰等时标志层的年龄传递,对远源火山灰及其所在剖面进行年代学制约是火山灰年代学最基本的应用。上已述及,高精度 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法在湖相远源火山灰中的应用较为困难。Smith *et al.* (2011)对日本 Suigetsu 湖泊中的一层远源火山灰(SG06-1288)及其近源产物开展研究,实现了利用高精度 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法间接地对湖相沉积物进行年代学约束的目标。该研究的一个亮点在于作者同时利用 182 个植物化石 $^{14}\text{C}$ 年龄对 SG06-1288 火山灰层进行摇摆匹配 $^{14}\text{C}$ 定年,其结果用来与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄交叉验证。研究表明,湖相火山灰 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄与独立的 $^{14}\text{C}$ 年龄校正结果在 $1\sigma$ 可信度范围内一致,确证了该方法对湖相远源火山灰能有效定年。该方法的应用范围可向钻孔深部火山灰扩展,得到的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄一方面能使湖泊年纹层浮动时间序列转化为绝对年龄标尺,另一方面也可用于制约沉积剖面已有的 $^{14}\text{C}$ 年龄-深度曲线,校正年龄外推带来的巨大误差,在湖泊沉积物高精度年代学研究方面有重大意义。

### 5.2 古气候学——气候突变的时空差异

高分辨率古环境记录研究表明,气候突变会在数十年甚至一年的尺度内发生(Brauer *et al.*, 2008),同一事件在不同地区还存在时间和幅度的差异(Ma *et al.*, 2012; Lane *et al.*, 2013)。了解气候突变的时空差异,有助于预测各地对气候变化的响应情况。然而,古环境记录动辄数百年的定年误差,使得它们无法在时间上精确地同步,阻碍了人们探讨气候变化的区域差异及其驱动因素。相同的火山灰在不同沉积记录中出现,使得以年为单位同步沉积记录成为了可能。

Lane *et al.* (2013)利用 Vedde Ash 链接不同湖泊的沉积记录(德国 Meerfelder Maar 和挪威 Kråkenes Lake),将两者在时间上精确地同步。以此为基础,该作者发现新仙女木中期一次气候突变事件(Mid-YD transition)在两地的记录中存在时间差异(图 8),构成持续了 120 年的“时进”现象(time-transgressive phenomenon)。该研究表明,全球气候变化并不像气候模型假设的那样在大陆甚至是半球尺度上同时发生。一旦根据气候突变具有同时性这一假设将独立的气候记录进行摇摆匹配和同步,其中的区域差异信息将会丢失(Blaauw, 2012)。

### 5.3 考古学——自然灾害与人类演化

火山灰标志着火山喷发作用,其在考古层序中的发现,有助于了解古人类的分布、迁徙和更替与自然灾害间的相关关系。旧石器时代中期向晚期过渡的阶段,欧洲大陆古人类的区域分布和科技水平发生了突然且显著的变化——土著尼安德塔人(Neanderthals)被外来的现代人类(AMHs)所替代,考古遗迹中也出现了更先进的工具。这一古人类更替现象过去认为与同时期的 Campanian Ignimbrite (CI)火山喷发作用(40ka B. P.)以及显著的气候变冷事件(Heinrich Events, 48ka B. P.)有关,两者共同作用使尼安德塔人人口剧减,最终被更具竞争力的现代人类所替代。Lowe *et al.* (2012)提取了环地中海地区各类沉积层序中的 CI 显微火山灰,并用之关联考古和古气候记录,以验证上述认识的准确性。研究表明,欧洲和非洲北部旧石器时代中期向晚期的过渡以及现代人类在欧洲大陆的出现均发生在 CI 喷发事件之前(图 9),因而火山活动不是致使该时期欧洲大陆古人类发生更替的主要原因,早在 CI 喷发事件之前尼安德塔人就已经绝灭。结合火山灰在古气候记录中的位置,该作者同时推断气候恶化也非尼安德塔人绝灭的主要原因,他们更可能是受到来自现代人类(AMHs)生存和竞争压力的威胁才最终绝灭。

### 5.4 岩石学——岩浆演化与岩石成因

用于识别和关联火山灰地层的火山玻璃,与火山岩一样,其地球化学研究同样具有岩浆演化和岩石学成因方面的意义。Sólheimar 熔结凝灰岩是冰岛 Katla 火山一次大型喷发活动的产物, Tomlinson *et al.* (2012b)对其中的玻屑开展束斑分析,发现其基性组分与酸性组分并无成因联系,确认了喷发过程中的二元混合作用。通过对冰岛地壳岩石进行分离结晶(FC)、部分熔融(PM)的模拟计算并将其与玻屑的地球化学特征对比,作者揭示了冰岛酸性岩浆的成因,提出了 Sólheimar 熔结凝灰岩的多阶段成因模型。

远源火山灰在岩石学研究方面也有其独特的魅力。Ukstins Peate *et al.* (2008)利用束斑分析方法研究了印度洋深海钻孔中的远源火山灰,发现其中的带状玻屑在小于 1mm 的尺度内保存了单层火山灰约 85% 的主量元素变化范围(图 10),证明与玻屑的“bulk analysis”相比,“spot analysis”能给出更多有用信息而不是所有组分的一个简单平均。本

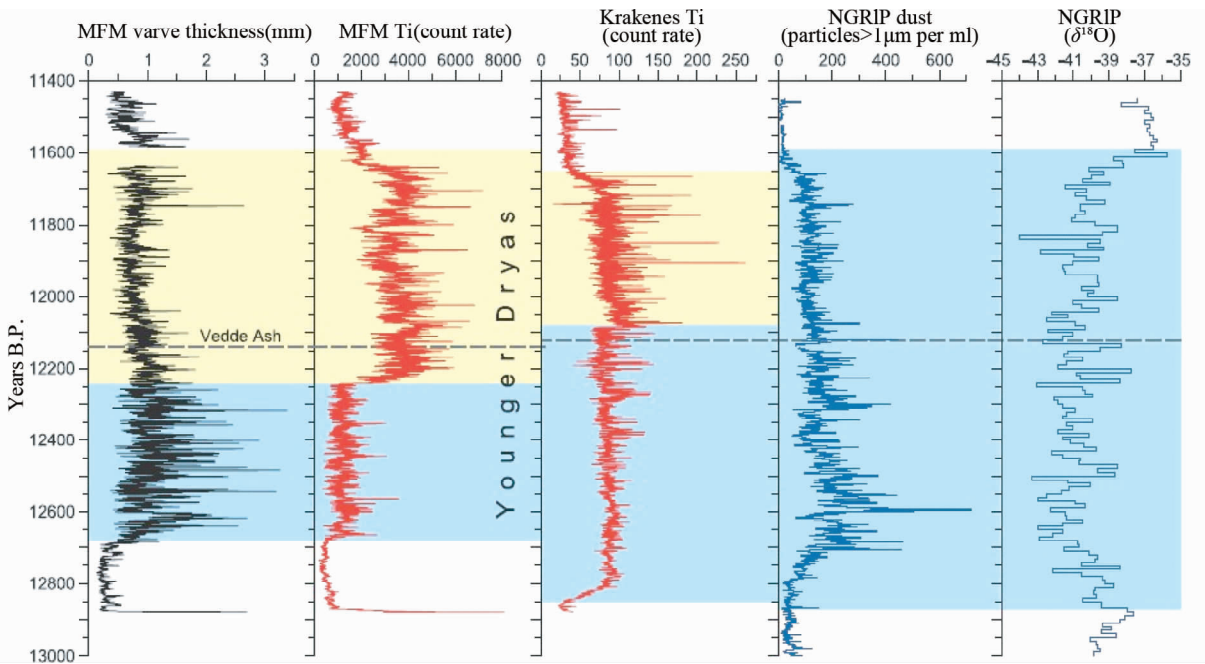


图8 新仙女木期气候转变事件在挪威 Kråkenes 湖和德国 Meerfelder 玛珥湖中的时间记录的对比,同时列出的还有北格林兰冰芯记录(据 Lane *et al.* , 2013)

气候记录根据各自独立的年龄模型进行投点,其中的 Vedde Ash 火山灰(虚线)存在约 20 年的年龄差异. 各记录中的气候转变用颜色的改变(从蓝色变为黄色)进行示意. 在 Kråkenes 湖,Ti 指标的突变发生在 Vedde Ash 出现后的 20 年;在 Meerfelder 玛珥湖,Ti 指标及年纹层厚度指标的突变发生在 Vedde Ash 出现的前 100 年

Fig.8 Comparison of the timing of the transition event of Younger Dryas observed in Kråkenes (Norway) and Meerfelder Maar (Germany), alongside North Greenland Ice core record (after Lane *et al.* , 2013)

Records are plotted on their independent age models, which agree within 20yr at position of Vedde Ash (dashed line). The transition event in each record is marked by color change from blue to yellow. In Kråkenes, Ti proxy records abrupt change occurring 20yr after Vedde Ash. In Meerfelder Maar, Ti and varve thickness proxies record abrupt change occurring 100yr before Vedde Ash

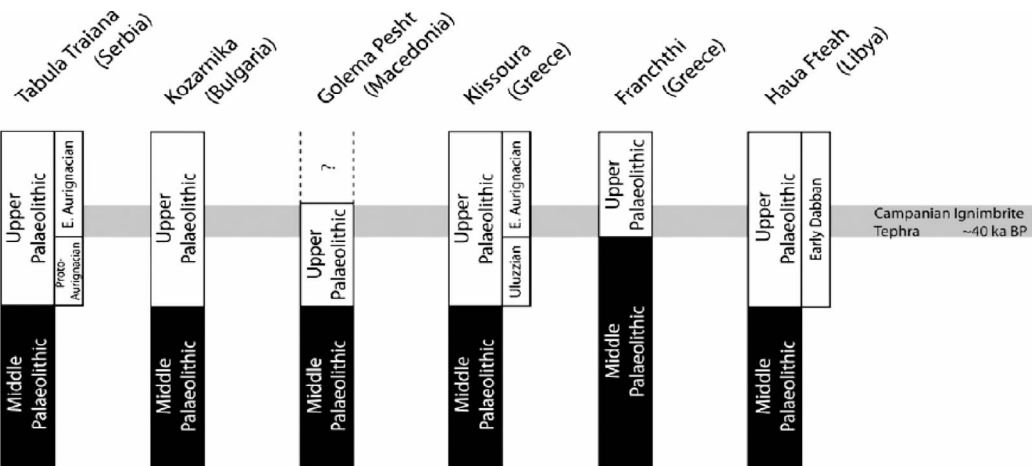


图9 六处考古层序中的 Campanian Ignimbrite(CI) 火山作用与旧石器时代中期向晚期过渡的时间关系示意图(据 Lowe *et al.* , 2012)

Fig.9 Schematic illustration of the temporal relationship between CI eruption and the Middle to Upper Paleolithic transition (after Lowe *et al.* , 2012)

例中火山源区位于 2700km 以外的海相远源火山灰,其展现出的化学组成的极端不均一性,很好地保存了近源陆相火山

灰无法记录到的复杂且详尽的岩浆房演化信息。

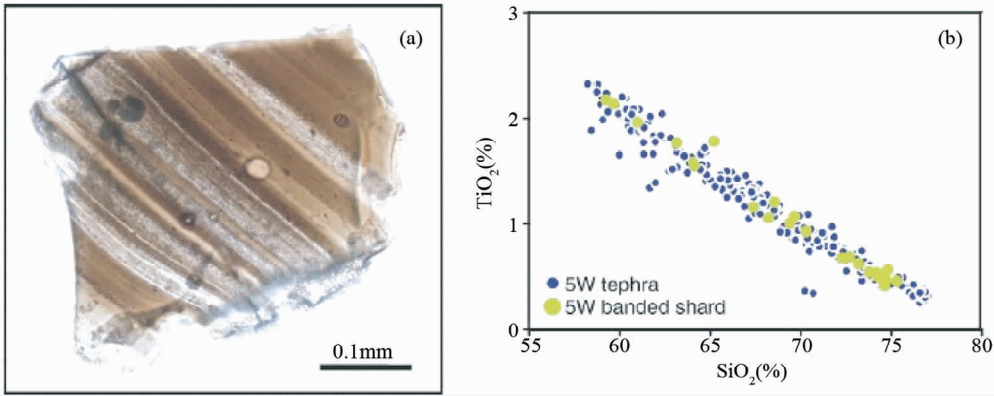


图 10 远源海相火山灰层 5W 中的带状玻屑 (a) 和带状玻屑与整层火山灰化学成分变化范围的对比 (b) (据 Ukstins Peate *et al.*, 2008)

5W 火山灰所有玻屑的  $\text{SiO}_2$  对  $\text{TiO}_2$  变化范围用蓝色圆圈表示,同一指标在带状玻屑中的变化范围用绿色圆圈表示.带状玻屑代表了整次火山活动大约 80% 的组分变化范围

Fig. 10 Photomicrograph of a banded shard from distal marine tephra layer 5W (a) and the comparison of chemical compositional variation between the banded shard and all shards from tephra layer 5W (b) (after Ukstins Peate *et al.*, 2008)

$\text{SiO}_2$  vs.  $\text{TiO}_2$  with the full compositional variation of all shards from 5W shown as blue circles, and compositions measured in the banded shard shown as green circles. The compositional variations observed in the banded shard represent approximately 80% of the variation observed in the entire eruption

### 5.5 火山学——喷发历史与灾害预警

火山灰是火山作用过程中影响范围最大的火山灾害之一,高强度爆炸性火山活动产生的火山灰可以影响数千千米以外的人类生活区域.查明具有潜在喷发可能的火山的喷发历史及其产物分布范围,有助于人们更好地进行火山灾害预警.过去的火山学研究通常更多地关注近源喷发产物,然而,近源沉积层有时会因火山重复喷发而遭到破坏,造成喷发历史保存的完整性不如人意;另一方面,忽视远源产物的存在也可能导致火山灰分布范围被低估.因此,远源火山灰研究工作的开展显得尤为重要,其对厘清喷发作用的期次问题、评估火山灰灾害的影响范围具有关键意义. Albert *et al.* (2013) 利用湖泊钻孔和洞穴沉积物中发现的远源火山灰,揭示了意大利埃特纳火山的喷发期次,并将其喷发产物的已知分布范围扩大至 800km 以外,为重建埃特纳火山喷发历史、火山灾害范围评估和灾害预警提供了关键信息.

## 6 长白山年轻火山作用定年新思路

长白山天池火山是我国著名的休眠火山,其形成与演化经历了数个时期,包括早期的玄武岩造盾阶段,随后的主体粗面岩造锥阶段,以及晚期碱流质爆发活动产生空降浮岩和熔结凝灰岩建造的阶段 (Wei *et al.*, 2007, 2013). 晚更新世以来天池爆发性火山活动频繁,尤其是在公元千年左右的普林尼式喷发事件,其估算的喷发柱高达 25km,喷出的火山碎屑体积达到  $100\text{km}^3$  的量级 (Horn and Schmincke, 2000); 火山灰向东运移至日本北海道和本州岛 (Machida *et al.*, 1981;

Machida and Arai, 1983), 最远者受到大气环流的影响远及格陵兰地区 (Sun *et al.*, 2014a). 天池火山作为世界上最危险的火山之一,了解其喷发历史、产物分布范围并进行火山灾害预警显得尤为重要.

关于天池火山近源产物的年代学研究,前人已开展过大量工作 (Liu *et al.*, 1998; Horn and Schmincke, 2000; 王非等, 2001; Nakamura *et al.*, 2007; Zou *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2014), 但年轻火山岩定年技术自身的应用限制以及地层保存不完整等问题的存在,使得仅靠近源产物无法建立起天池火山晚更新世以来的喷发时间序列.至于远源火山灰,过去的研究又仅局限于肉眼可见的喷发产物 B-Tm 及其在日本和日本海等区域的分布 (Machida *et al.*, 1981; Machida and Arai, 1983; Yu *et al.*, 2013), 较少学者关注显微火山灰以及火山灰在长白山以西的分布 (Sun *et al.*, 2014b). 郭正府等 (2005)、赵宏丽和刘嘉麒 (2012) 曾经报道在中国东北四海龙湾玛珥湖沉积物和龙岗火山区泥炭沉积物中发现了长白山火山灰,并根据其所处的层位以及玻屑的地球化学特征将它们与具体的火山喷发事件相关联. Lim *et al.* (2013) 最近利用显微火山灰探测技术,发现了日本海深海钻孔中存在比 B-Tm 更老的长白山火山灰并通过内插法大致估算了它们的年龄 (B-J 约 50.6ka, B-Sado 约 67.6ka, B-Ym 约 85.8ka). 上述研究提示我们,对中国东北的玛珥湖和日本海沉积物开展显微火山灰研究,利用来自远源火山灰的地层学和年代学信息,结合已有的近源数据,可能为揭示天池火山冰后期以来完整的喷发历史提供新的见解.目前这一工作正在进行当中.



## References

- Albert PG, Tomlinson EL, Lane CS, Wulf S, Smith VC, Coltelli M, Keller J, Lo Castro D, Manning CJ, Müller W and Menzies MA. 2013. Late glacial explosive activity on Mount Etna; Implications for proximal-distal tephra correlations and the synchronisation of Mediterranean archives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265: 9–26
- Albert PG, Hardiman M, Keller J, Tomlinson EL, Smith VC, Bourne AJ, Wulf S, Zanchetta G, Sulpizio R, Muller UC, Pross J, Ottolini L, Matthews IP, Blockley SPE and Menzies MA. 2014. Revisiting the Y-3 tephrostratigraphic marker; A new diagnostic glass geochemistry, age estimate, and details on its climatostratigraphical context. *Quaternary Science Reviews*, doi: 10.1016/j.quascirev.2014.04.002
- Blaauw M. 2012. Out of tune; The dangers of aligning proxy archives. *Quaternary Science Reviews*, 36: 38–49
- Blockley SPE, Pyne-O'Donnell SDF, Lowe JJ, Matthews IP, Stone A, Pollard AM, Turney CSM and Molyneux EG. 2005. A new and less destructive laboratory procedure for the physical separation of distal glass tephra shards from sediments. *Quaternary Science Reviews*, 24 (16–17): 1952–1960
- Bourne A, Lowe J, Trincardi F, Asiola A, Blockley S, Wulf S, Matthews I, Piva A and Vigliotti L. 2010. Distal tephra record for the last ca. 105000 years from core PRAD 1–2 in the central Adriatic Sea: Implications for marine tephrostratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 29(23): 3079–3094
- Brauer A, Haug GH, Dulski P, Sigman DM and Negendank JFW. 2008. An abrupt wind shift in Western Europe at the onset of the Younger Dryas cold period. *Nature Geoscience*, 1(8): 520–523
- Brendryen J, Hafliðason H and Sejrup HP. 2010. Norwegian Sea tephrostratigraphy of marine isotope stages 4 and 5: Prospects and problems for tephrochronology in the North Atlantic region. *Quaternary Science Reviews*, 29(7–8): 847–864
- Danišik M, Shane P, Schmitt AK, Hogg A, Santos GM, Storm S, Evans NJ, Fifield LK and Lindsay JM. 2012. Re-anchoring the Late Pleistocene tephrochronology of New Zealand based on concordant radiocarbon ages and combined  $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$  disequilibrium and (U-Th)/He zircon ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 349–350: 240–250
- Fukusawa H, Tsukamoto S, Tsukamoto H, Ikeda M, Okamura M and Matsuoka H. 1998. Falling age of Baegdusan-Tomakomai tephra (B-Tm) estimated by using non-glacial varves. *Laguna*, 5(2): 55–62
- Guo ZF, Liu JQ, Fan QC, He HY, Sui SZ, Chu GQ, Liu Q and Negendank JFW. 2005. Source of volcanic ash in the sediments of Sihailongwan maar lake, NE China, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 251–255 (in Chinese with English abstract)
- Horn S and Schmincke HU. 2000. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969AD. *Bulletin of Volcanology*, 61(8): 537–555
- Kylander ME, Lind EM, Wastegard S and Lowemark L. 2012. Recommendations for using XRF core scanning as a tool in tephrochronology. *Holocene*, 22(3): 371–375
- Lane CS, Blockley SPE, Mangerud J, Smith VC, Lohne ØS, Tomlinson EL, Matthews IP and Lotter AF. 2012. Was the 12.1ka Icelandic Vedde Ash one of a kind? *Quaternary Science Reviews*, 33: 87–99
- Lane CS, Brauer A, Blockley SPE and Dulski P. 2013. Volcanic ash reveals time-transgressive abrupt climate change during the Younger Dryas. *Geology*, 41(12): 1251–1254
- Lee MY, Chen CH, Wei KY, Iizuka Y and Carey S. 2004. First Toba supereruption revival. *Geology*, 32(1): 61–64
- Lim C, Ikehara K and Toyoda K. 2008. Cryptotephra detection using high-resolution trace-element analysis of Holocene marine sediments, Southwest Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(20): 5022–5036
- Lim C, Toyoda K, Ikehara K and Peate DW. 2013. Late Quaternary tephrostratigraphy of Baegdusan and Ulleung volcanoes using marine sediments in the Japan Sea/East Sea. *Quaternary Research*, 80(1): 76–87
- Liu J, Chu G, Han J, Rioual P, Jiao W and Wang K. 2009. Volcanic eruptions in the Longgang volcanic field, northeastern China, during the past 15000 years. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 645–654
- Liu JQ, Liu DS, Chu GQ, Xiao JL and Luo XJ. 1996. Maar lake and varve chronology. *Quaternary Science Reviews*, (4): 353–358 (in Chinese with English abstract)
- Liu R, Qiu S, Cai L, Wei H, Yang Q, Xian Z, Bo G and Zhong J. 1998. The date of last large eruption of Changbaishan-Tianchi volcano and its significance. *Science in China (Series D)*, 41(1): 69–74
- Lowe DJ. 2011. Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary Geochronology*, 6(2): 107–153
- Lowe J, Barton N, Blockley S, Ramsey CB, Cullen VL, Davies W, Gamble C, Grant K, Hardiman M, Housley R, Lane CS, Lee S, Lewis M, MacLeod A, Menzies M, Mueller W, Pollard M, Price C, Roberts AP, Rohling EJ, Satow C, Smith VC, Stringer CB, Tomlinson EL, White D, Albert P, Arienzo I, Barker G, Boric S, Carandente A, Civetta L, Ferrier C, Guadelli JL, Karkanis P, Koumouzelis M, Mueller UC, Orsi G, Pross J, Rosi M, Shalamanov-Korobar L, Sirakov N and Tzedakis PC. 2012. Volcanic ash layers illuminate the resilience of Neanderthals and early modern humans to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(34): 13532–13537
- Ma ZB, Cheng H, Tan M, Edwards RL, Li HC, You CF, Duan WH, Wang X and Kelly MJ. 2012. Timing and structure of the Younger Dryas event in northern China. *Quaternary Science Reviews*, 41: 83–93
- Machida H, Arai F and Moriwaki H. 1981. Two Korean tephra, Holocene markers in the Sea of Japan and the Japan Islands. *Kagaku*, 51: 562–569
- Machida H and Arai F. 1983. Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late quaternary eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18(1–4): 151–164
- Moriwaki H, Suzuki T, Murata M, Ikehara M, Machida H and Lowe DJ. 2011. Sakurajima-Satsuma (Sz-S) and Noike-Yumugi (N-Ym) tephra: New tephrochronological marker beds for the last deglaciation, southern Kyushu, Japan. *Quaternary International*, 246(1–2): 203–212
- Nakamura T, Okuno M, Kimura K, Mitsutani T, Moriwaki H, Ishizuka Y, Kim KH, Jing BL, Oda H, Minami M and Takada H. 2007. Application of  $^{14}\text{C}$  wiggle-matching to support dendrochronological analysis in Japan. *Tree-Ring Research*, 63(1): 37–46
- Pearce NJG, Denton JS, Perkins WT, Westgate JA and Alloway BV. 2007. Correlation and characterization of individual glass shards from tephra deposits using trace element laser ablation ICP-MS analyses: Current status and future potential. *Journal of Quaternary Science*, 22(7): 721–736
- Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Blackwell PG, Ramsey CB, Buck CE, Burr GS, Edwards RL, Friedrich M, Grootes PM, Guilderson TP, Hajdas I, Heaton TJ, Hogg AG, Hughen KA, Kaiser KF, Kromer B, McCormac FG, Manning SW, Reimer RW, Richards DA, Southon JR, Talamo S, Turney CSM, van der Plicht J and Weyhenmeyer CE. 2009. Intcal09 and marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 years cal bp.

- Radiocarbon, 51(4): 1111–1150
- Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2): 191–219
- Schmitt A, Danišik M, Evans N, Siebel W, Kiemele E, Aydin F and Harvey J. 2011. Acigöl rhyolite field, Central Anatolia (part 1): High-resolution dating of eruption episodes and zircon growth rates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(6): 1215–1231
- Smith VC, Mark DF, Staff RA, Blockley SPE, Ramsey CB, Bryant CL, Nakagawa T, Han KK, Weh A, Takemura K and Danhara T. 2011. Toward establishing precise  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronologies for Late Pleistocene palaeoclimate archives: An example from the Lake Suigetsu (Japan) sedimentary record. *Quaternary Science Reviews*, 30(21–22): 2845–2850
- Sun C, Plunkett G, Liu J, Zhao H, Sigl M, McConnell JR, Pilcher JR, Vinther B, Steffensen JP and Hall V. 2014a. Ash from Changbaishan Millennium eruption recorded in Greenland ice: Implications for determining the eruption's timing and impact. *Geophysical Research Letters*, 41(2): 694–701
- Sun C, You H, Liu J, Li X, Gao J and Chen S. 2014b. Distribution, geochemistry and age of the Millennium eruptives of Changbaishan volcano, Northeast China: A review. *Frontiers of Earth Science*, 8(2): 216–230
- Thorarinsson S. 1944. Tefrokronologiska studier på Island. *Geografiska Annaler*, 26: 1–217
- Tian J, Wang P, Cheng X and Li Q. 2002. Astronomically tuned Pliocene benthic  $\delta^{18}\text{O}$  record from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(3–4): 1015–1029
- Tomlinson EL, Thordarson T, Müller W, Thirlwall M and Menzies MA. 2010. Microanalysis of tephra by LA-ICP-MS: Strategies, advantages and limitations assessed using the Thorsmörk ignimbrite (Southern Iceland). *Chemical Geology*, 279(3–4): 73–89
- Tomlinson EL, Arienzo I, Civetta L, Wulf S, Smith VC, Hardiman M, Lane CS, Carandente A, Orsi G, Rosi M, Müller W and Menzies MA. 2012a. Geochemistry of the Phlegraean Fields (Italy) proximal sources for major Mediterranean tephras: Implications for the dispersal of Plinian and co-ignimbritic components of explosive eruptions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 93: 102–128
- Tomlinson EL, Thordarson T, Lane CS, Smith VC, Manning CJ, Müller W and Menzies MA. 2012b. Petrogenesis of the Sólheimar ignimbrite (Katla, Iceland): Implications for tephrostratigraphy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 86: 318–337
- Ukstins Peate I, Baker JA, Kent AJR, Al-Kadasi M, Al-Subbary A, Ayalew D and Menzies M. 2003. Correlation of Indian Ocean tephra to individual silicic eruptions from the Oligocene Afro-Arabian flood volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(3): 311–327
- Ukstins Peate I, Kent AJR, Baker JA and Menzies MA. 2008. Extreme geochemical heterogeneity in Afro-Arabian Oligocene tephras: Preserving fractional crystallization and mafic recharge processes in silicic magma chambers. *Lithos*, 102(1–2): 260–278
- Wang F, Chen WJ, Peng ZC and Li Q. 2001. Activity of Cangbaishan Tianchi Volcano since Late Pleistocene: The constrain from geochronology of high precision U-series TIMS method. *Geochimica*, 30(1): 88–94 (in Chinese with English abstract)
- Wei H, Wang Y, Jin J, Gao L, Yun SH and Jin B. 2007. Timescale and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China. *Lithos*, 96(1–2): 315–324
- Wei HQ, Liu GM and Gill J. 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, Northeast China: Implications for possible future eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 75(4): 1–14
- Xu J, Pan B, Liu T, Hajdas I, Zhao B, Yu H, Liu R and Zhao P. 2013. Climatic impact of the Millennium eruption of Changbaishan volcano in China: New insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating. *Geophysical Research Letters*, 40(1): 54–59
- Yang LK, Wang F, Feng HL, Wu L and Shi WB. 2014.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Holocene volcanic activity at Changbaishan Tianchi volcano, Northeast China. *Quaternary Geochronology*, 21: 106–114
- Yatsuzuka S, Okuno M, Nakamura T, Kimura K, Setoma Y, Miyamoto T, Kim KH, Moriwaki H, Nagase T and Jin X. 2010.  $^{14}\text{C}$  wiggle-matching of the B-Tm tephra, Baitoushan volcano, China/North Korea. *Radiocarbon*, 52(3): 933–940
- Yin J, Jull AJT, Burr GS and Zheng Y. 2012. A wiggle-match age for the Millennium eruption of Tianchi Volcano at Changbaishan, Northeastern China. *Quaternary Science Reviews*, 47: 150–159
- Yu H, Xu J, Luan P, Zhao B and Pan B. 2013. Probabilistic assessment of tephra fallout hazard at Changbaishan volcano, Northeast China. *Natural Hazards*, 69(3): 1369–1388
- Zhao HL and Liu JQ. 2012. Cryptotephra discovered in Gushantun peat of NE China and its significance. *Seismology and Geology*, 34(3): 516–530 (in Chinese with English abstract)
- Zou H, Fan Q and Zhang H. 2010. Rapid development of the great Millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U-Th zircon dating. *Lithos*, 119(3–4): 289–296

### 附中文参考文献

- 郭正府, 刘嘉麒, 樊祺诚, 贺怀宇, 隋淑珍, 储国强, 刘强, Nengendank JFW. 2005. 四海龙湾玛珥湖沉积物中碱流质火山灰的来源及其意义. *岩石学报*, 21(1): 251–255
- 刘嘉麒, 刘东生, 储国强, 肖举乐, 骆祥君. 1996. 玛珥湖与纹泥年代学. *第四纪研究*, (4): 353–358
- 王菲, 陈文寄, 彭子成, 李齐. 2001. 长白山天池火山晚更新世以来的喷发活动: 高精度铀系 TIMS 年代学制约. *地球化学*, 30(1): 88–94
- 赵宏丽, 刘嘉麒. 2012. 东北龙岗火山区孤山屯泥炭中显微火山灰的发现及其意义. *地震地质*, 34(3): 516–530