

# 中国玛珥湖及其研究意义<sup>\*</sup>

储国强 刘嘉麒

CHU GuoQiang and LIU JiaQi

中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室,北京 100029

Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2017-09-01 收稿, 2017-12-12 改回.

**Chu GQ and Liu JQ. 2018. Maar lakes in China and their significance in paleoclimatic research. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (1): 4–12**

**Abstract** As research progress in the Past Global Changes, scientists understand that Earth's paleoclimate varies at quasi-periodicities ranging from millennial to decadal timescale and intervened by abrupt paleoclimatic events besides the low-frequency orbital variations. In order to well understand these variations, the time resolution of paleoclimatic archives should be at annual-decadal timescale, and cover longer time scale and enrich in paleoclimatic information. Maar Lakes are the products of Phreatomagmatic volcanic eruptions. They can provide a continuously sedimentary record spanning hundreds of thousands of years. In China, Maar lakes distribute from tropical to the North Temperate Zone, and are ideal documents for studying regional climatic variability and dynamics at different temporal scales. In view of Maar lakes in China, we present some scientific questions that may be obtained from Maar lake archives. On the orbital timescale, a challenging scientific question is what time the next glacial age will be onset. The sedimentary record in tropical maar lakes in southern China span at least four glacial-interglacial cycles. They provide excellent document for understanding scientific questions such as predicting the onset of next ice age, the interaction of ice sheet dynamics and carbon cycle, and links between high and low latitude. On the millennial timescale, one of the puzzling features of Earth's past climate is that a series of paleoclimatic oscillations occurred roughly at millennial years and abrupt paleoclimatic events recorded in paleoclimatic archives. They may be inherent nature in Earth, but with different physical appearances and dynamic origins. In order to gain an overall view on a hemispherical scale, regional sedimentary documents derived from different localities will greatly help us to integrate regional data and understand dynamics between atmospheres and oceans. On annual to decadal timescale, the paleoclimatic data of last two millennia is a key data-base of global network. As a basis for evaluating and projecting global changes, PAGES, IPCC and Asia-2K are striving for this goal. Archives from sediments of Maar lakes, especially annually laminated sediments, will provide high-resolution dataset in data-sparse regions.

**Key words** Maar lake; Phreatomagmatic eruption; Sediment; China; Orbital cycles; Millennial oscillations; Paleoclimatic changes on annual to decadal timescale

**摘 要** 随着全球变化研究的深入,科学家们认识到古气候变化除轨道尺度的冰期/间冰期旋回之外还存在年代际-千年尺度的高频变化和突变事件。要认知这些变化,古气候记录的时间分辨率要达到“年-年代际”。因此,寻求时间跨度长、连续性好、信息丰富的高分辨率记录是过去全球变化研究面临的主要任务之一。玛珥湖为火山射汽喷发形成的封闭湖泊,由于其独特的形成机制及水文背景,使其能够提供数万年乃至几十万年连续稳定的沉积记录,是高分辨率古气候、古环境变化研究的重要对象。中国玛珥湖得天独厚,从热带到寒温带均有分布,为系统研究中国不同气候区各种时间尺度古气候变化规律提供了理想材料。本文基于中国玛珥湖的分布及沉积特征,探讨玛珥湖沉积记录能够为古全球变化研究做出怎样的贡献,解决什么科学问题,具体包括以下三个方面的内容:(1)在轨道尺度上,精确定位现代气候在地质历史中的位置是未来最具挑战性的科学问题之一。我国热带地区玛珥湖沉积物跨越了至少4个冰期-间冰期旋回,能够为理解冰期驱动机制、下一次冰期来临、高低纬关联等关键科学问题提供多学科数据;(2)千年尺度古气候变化,其成因可能源于不同的动力学机制,是气候系统对各

<sup>\*</sup> 本文受国家重点研发计划(2017YFA0603401)和国家自然科学基金项目(41320104006、41672174、41371219)联合资助。

第一作者简介:储国强,男,1965年生,研究员,第四纪地质学专业,E-mail: chuguoqiang@mail.igcas.ac.cn

种外部和内部驱动因子响应的结果,因此千年震荡可能存在明显的时空差异。集成不同气候带的玛珥湖沉积记录将为理解千年震荡规律及其驱动因子做出贡献;(3)年-年代际气候变化是预测未来气候变化的基础,PAGES、IPCC 以及 PAGES-Asia 2K 均将过去 2 千年来气候变化作为预测未来几十年至百年尺度上重大全球变化的背景,并为此构建全球数据体系,玛珥湖沉积特别是纹层沉积记录能够填补某些地区高分辨率数据的空白。

**关键词** 玛珥湖;火山射汽喷发;沉积;中国;轨道尺度准周期变化;千年震荡;年~年代际尺度古气候变化

**中图法分类号** P317

过去全球变化是地球科学的研究热点和前沿,几十年来科学家们通过对深海沉积、极地冰芯和黄土-古土壤的研究,认识到地球过去气候变化存在 10 万年左右的冰期-间冰期旋回,验证了地球轨道变化是驱动冰期旋回的主导因素。随着古全球变化研究的深入,人们发现过去气候变化也存在轨道尺度的演变,而且存在年代际-千年尺度的高频变化和古气候突变事件。全球变化研究的主要科学目标是“预测未来几十年至百年尺度上重大全球变化”,要实现上述目标,古气候记录的时间分辨率要达到“年-年代际”。由于器测记录只有 100 多年,难以评估自然内部年代际乃至更长时间尺度的气候变化,制约了人们对气候渐变/突变机制及区域响应的理解。因此,寻找分辨率较高、连续性好、时间跨度长、信息丰富的沉积记录是过去全球变化研究面临的课题。

玛珥湖由于其形成和保存信息方面的优势,受到了国内外学术界的广泛关注。早在 20 世纪 80 年代,国际地圈生物圈计划就倡导在全球范围内寻找更多高分辨率沉积记录。为此,欧洲开展了一系列钻探计划,例如地质玛珥湖研究计划(GEO-MAARS)、欧洲玛珥湖研究计划(EU-ROMAARS)和欧洲湖泊钻探计划(ELDP)(Creer, 1996),以及近几年开展的 Potrok Aike 玛珥湖钻探计划(PASADO)(Zolitschka *et al.*, 2013)。在这些重大科研项目的支持下,科学家们获得了连续的玛珥湖沉积记录,并开展了纹层年代学、沉积学、地球化学、孢粉学、硅藻学、古地磁学等多学科综合研究,取得了丰硕的成果,显示出玛珥湖在解决一些重要的古气候、古环境问题方面的巨大潜力。

我国玛珥湖的研究始于 1996 年(刘嘉麒等, 1996),主要研究对象为我国南方湖光岩玛珥湖和东北龙岗火山区的玛珥湖,经过近二十年的努力,在纹层年代学和气候环境演化等多个方面取得了丰富的成果,但仍然是“大学之道,方兴未艾”。

## 1 玛珥湖形成过程及沉积特征

玛珥湖(Maar Lake)为火山射汽喷发而形成的封闭湖泊(图 1)。其形成过程为富含气体的岩浆在上升过程中随着压力减小释放出气体,同时炽热岩浆与地下水混合产生大量蒸汽,在巨大的压力作用下,发生爆炸式火山喷发或称之为射汽喷发(Phreatomagmatic eruption),经过多次爆炸式喷发后,喷发物堆积在喷出口周围形成火山碎屑岩环,而喷发中心则形成深度巨大的盆地,随后积水成湖(Lorenz, 1973;

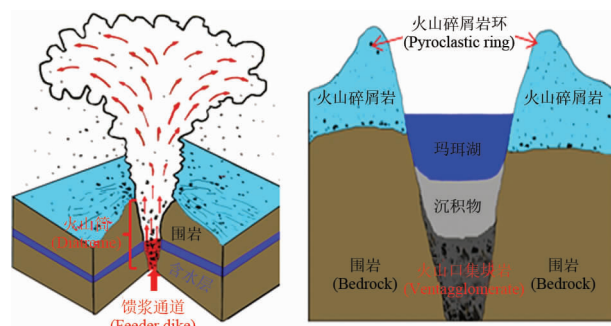


图 1 玛珥湖形成过程示意图

左:岩浆在上升过程中与地下水混合产生大量蒸汽,在巨大的压力作用下,发生爆炸式火山喷发或称之为射汽喷发;右:经多次爆炸式喷发后,喷发物堆积在周围形成火山碎屑岩环,而喷发中心则形成深度巨大的盆地,随后积水成湖

Fig. 1 Sketch maps showing the formation of a Maar Lake

Left: a phreatomagmatic eruption is a violent water-magma interaction when magma contacts groundwater to produce large amounts of steam and magmatic gases; Right: a Maar Lake is formed when water (groundwater and precipitation) fills the basin surrounded by pyroclastic ring after many phreatomagmatic eruptions

Negendank and Zolitschka, 1993; 刘嘉麒等, 1996; Lutz and Lorenz, 2013)。

值得指出的是玛珥湖不是一次火山喷发形成的,而是经历了几十次乃至数百次火山射汽喷发才得以形成,喷发中心有时也会迁移。图 2 为龙岗火山群大龙湾玛珥湖射汽喷发形成的火山碎屑岩沉积序列,从图中至少可以看出 15 个由粗到细的韵律层,对应于 15 次火山射气喷发。现代观测结果证实了火山射汽喷发多期次特征,例如 1977 年 3 月 30 日至 4 月 9 日,火山学家观测到美国阿拉斯加 Ukinrek 玛珥湖的形成,在 10 天内发生了多次火山射汽喷发,最终形成了 2 个玛珥湖,西 Ukinrek 玛珥湖直径 170m,深 35m;东 Ukinrek 玛珥湖直径 300m,深 70m(Kienle *et al.*, 1980)。

玛珥湖与其它火山口湖的区别在于:1)在机制上,玛珥湖为炽热岩浆与地下水混合,迅速汽化、爆炸而形成的,区别于溢流式和爆破式火山喷发;2)在喷发产物上,常规火山喷发产物主要为岩浆喷出/溢流物,而玛珥湖火山喷发产物包含了大量的围岩/基底岩石碎屑;3)在火山碎屑沉积构造方面,由于爆炸冲击波的作用产生火山碎屑流(pyroclastic surge)或称基浪(Base surge),形成独特的大型交错层理、波状层理、板状层理、爬升层理、逆向沙丘以及增生砾等具有标志意义的沉积构造(Fisher and Waters, 1970)。

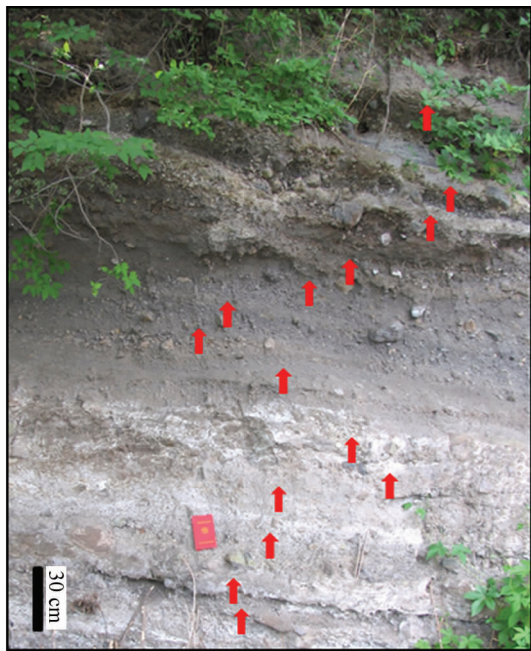


图2 大龙湾玛珥湖火山碎屑岩沉积层序

Fig. 2 A pyroclastic profile in Maar Lake Dalongwan

由于玛珥湖形成机制的特殊性,使玛珥湖在古气候、古环境变化研究中具有如下突出的特点:1)玛珥湖为封闭湖泊,无河流流进、流出,水位平衡主要由降水和蒸发因子控制,相对而言,玛珥湖水文、沉积系统比较简单,易于解译古气候、古环境变化;2)射汽喷发一般位于地下数百米,形成的玛珥湖深度大,沉积物厚,能够提供数万年乃至百万年连续稳定的沉积记录;3)玛珥湖的“深水、厌氧”环境,使沉积物很少受波浪和底栖生物的扰动,有利于年纹层的形成和保存,年纹层的存在能够将古气候、古环境变化研究的分辨率提高到季节-年的尺度;4)在古气候变化替代指标方面,具有丰富的多样性,例如反映水生生境的硅藻、金藻、藻类、摇蚊、介形等,指示陆地植被的孢粉、植硅体,以及各种物理化学指标,使我们能够从不同的角度认识古气候、古环境变化、检验重建数据的可靠性。因此,玛珥湖是形成和保存高分辨率沉积记录的理想场所,为开展多学科古气候、古环境变化研究提供了难得的材料。

## 2 中国玛珥湖分布

玛珥湖是常见的地貌景观,遍布于全球各大陆,其中以德国、中国、美国、意大利、西班牙、以色列、加拿大、墨西哥、阿根廷、新西兰以及缅甸等分布最多。中国玛珥湖得天独厚,跨越了热带、亚热带、温带和高寒地带,其中有的水深达127m,有的则干枯(图3)。

热带地区,雷琼新生代火山活动孕育了众多的玛珥湖,例如湖光岩、田洋、九斗洋、青桐洋、龙门、罗经盘、雷虎岭、龙

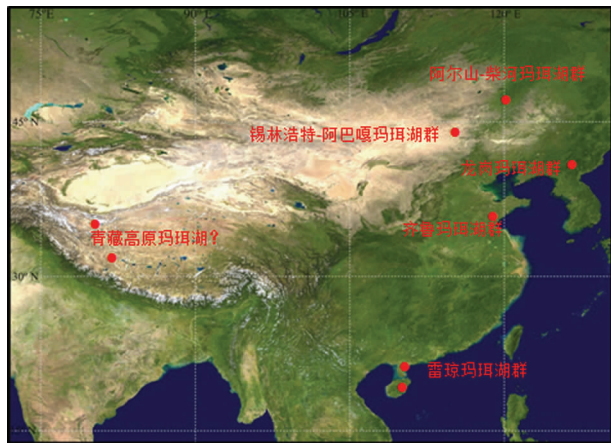


图3 中国玛珥湖主要分布区

Fig. 3 The distribution of Maar lakes in China

凤、涠洲、杨花、双池等(黄镇国等,1993;刘嘉麒,1999;孙谦等,2003;郑卓等,2003;樊祺诚等,2004)。其中湖光岩和双池玛珥湖现代仍有积水,其它的玛珥湖多已干枯。田洋干玛珥湖直径约3000m,深度约223m,是中国乃至世界最大的干玛珥湖之一。其形成年代存在不确定性,二十世纪八十年代对TY1钻孔底部玄武岩进行K-Ar测年为距今47.8万年,随后获得的K-Ar年龄为距今96.7万年(陈俊仁等,1990;隋淑珍和王文远,2003)。尽管田洋干玛珥湖沉积物年龄还存在不确定性,但玛珥湖沉积物跨越了至少4个冰期-间冰期旋回,是高分辨率古气候变化研究的优良载体。雷琼地区的玛珥湖群东临西太平洋,南接南海,是东亚夏季风、南海夏季风和西南夏季风的必经之地,玛珥湖沉积记录为研究这些季风的变化以及厄尔尼诺影响提供了难得的载体。

暖温带玛珥湖主要分布于齐鲁火山群中部,山东临朐、山旺、昌乐一带,该区中新世和上新世火山活动频繁,多为基性火山喷发,并形成大量火山锥和火山口,其中一些火山口可能为玛珥湖,目前已经干枯。山旺盆地是玛珥湖分布比较集中的区域,山旺组是一套由泥岩、页岩、灰质页岩、硅藻土及油页岩组成的淡水湖泊相沉积,沉积物厚度达210m。过去认为是山间湖盆或火山口湖成因,现在多数火山学家认为山旺、临朐、昌乐一带的深湖相沉积属于古玛珥湖。山旺组湖泊相沉积中富有保存精美的古生物化石,以“化石宝库”享誉中外。目前发现的化石高达十几个门类700余属种,特别是蛇类、鸟类、鳄类、东方祖熊等保存完整的化石在世界上是不多见的。山东山旺地区的古玛珥湖与德国Eifel地区Eckfelder玛珥湖形成时间大致相近,Eckfelder玛珥湖形成于始新世,也以其丰富的化石闻名(Mertz *et al.*, 2000)。

中温带玛珥湖主要分布于东北龙岗火山群、锡林浩特-阿巴嘎火山群以及辽西四合屯。龙岗火山群是世界上玛珥湖较多的区域之一,目前有积水玛珥湖为大龙湾、小龙湾、二龙湾、三角龙湾、东龙湾、南龙湾、龙泉龙湾和四海龙湾,其中东龙湾水深达127m。十几年来,中外地质学家对该区玛珥

湖进行大量的研究(樊祺诚等,1999; Mingeram *et al.*, 2004; 白志达等,2006)。龙岗地区玛珥湖可能自中更新世至早全新世均有形成,这些玛珥湖沉积物中发育了年纹层,是中外学者关注的热点地区。

锡林浩特-阿巴嘎火山群可能也存在干枯了的玛珥湖,例如,阿巴嘎旗浩特乌拉、车勒乌拉和额斯格乌拉(王锡娇等,2012)。根据火山碎屑岩环热释光测年数据,这些玛珥湖可能形成于距今 0.112Ma(王锡娇等,2012)。

辽西四合屯以大量的早期鸟类及“长毛”的小型兽脚类恐龙化石而闻名于世,这些保存完好的化石赋存于深湖相沉积中。尽管经历了 1 亿多年的风化剥蚀,火山射汽喷发具有标志意义的沉积构造已很难见到,但从深湖相沉积分布特征推测该区在晚侏罗世或早白垩世可能存在玛珥湖。Liu *et al.* (2000) 根据辽西四合屯深湖相沉积分布,推测该区有 8 个玛珥湖,保存完好的化石均赋存于其中,正是玛珥湖的深水、厌氧环境使这些精美的化石完好地保存下来(Liu *et al.*, 2000, 2002)。

北暖温带阿尔山-柴河玛珥湖群分布于大兴安岭哈拉哈河-淖尔河火山群,该区第四纪火山岩分布面积约 1000km<sup>2</sup>, 有 14 个火山成因的湖泊,其中卧牛泡子和乌苏浪子湖可能为玛珥湖(赵勇伟等,2008; 王丽丽等, 2013)。玛珥湖火山碎屑岩环中见有大型交错层理、板状层理、爬升层理等具有标志意义的沉积构造。除上述地区外,我国青藏高原西昆仑和可可西里可能也存在玛珥湖,尚有待进一步研究(刘嘉麒, 1999)。

### 3 中国玛珥湖研究意义

二十年来,中国玛珥湖研究取得了丰硕的成果,对此前人已经进行过总结(刘嘉麒等,2013),本文重点在于探讨中国玛珥湖沉积记录能够为古全球变化研究做出怎样的贡献,解决什么科学问题。

#### 3.1 轨道尺度:定位现代气候在地质历史中的位置

米兰科维奇理论是二十世纪国际地学界公认的两大成就之一。米氏理论认为全球冰期-间冰期气候变化主要受控于北半球高纬夏季太阳辐射变化(Milankovitch, 1941)(图 4a),随后深海沉积、极地冰芯和黄土-古土壤研究成果证实了第四纪古气候古气候变化米氏轨道周期的存在,但科学家们仍然不能很好地回答冰期成因以及下一次冰期何时来临(Lea *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2003; 丁仲礼,2006)。在纪念《科学》杂志创刊 125 周年之际,“冰期之谜”被认为是未来最具挑战性的科学问题之一。如果米兰科维奇理论是正确的,即全球气候变化在轨道尺度上主要受控于偏心率、地轴倾斜度和岁差,那么将之外推一个周期应该是可信的。问题在于科学家们对南北半球气候系统如何耦合各种轨道要素,导致南北球同步出现冰期-间冰期旋回以及海洋系统如何调

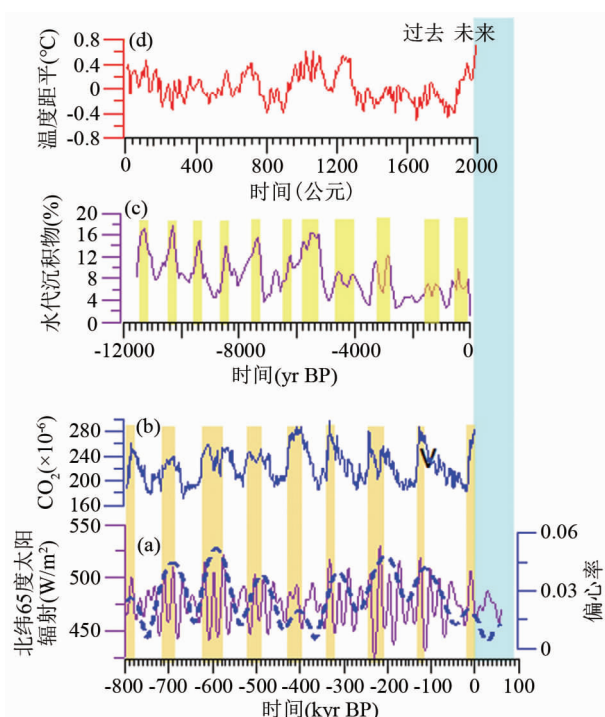


图 4 轨道、千年、年代际-百年尺度古气候变化

(a) 轨道尺度古气候变化:北纬 65 度太阳辐射(紫色)和偏心率(蓝色)(据 Berger and Loutre, 1991);(b) 南极冰芯大气 CO<sub>2</sub> 浓度(据 Ahn and Brook, 2008; Lüthi *et al.*, 2008), 棕色条示意间冰期;(c) 千年尺度古气候变化:北大西洋千年尺度准周期(据 Bond *et al.*, 1997), 黄色条示意千年震荡;(d) 年代际-百年尺度古气候变化:中国的年温度序列(基准时段:1851 ~ 1950)(据葛全胜等,2015)

Fig. 4 Paleoclimatic change curves on orbital, millennial and centennial-decadal time scales

(a) orbital paleoclimatic changes reflected by the June 21 insolation at 65°N (purple) and long term variations of eccentricity (blue dashed line) (after Berger and Loutre, 1991); (b) atmospheric concentration of CO<sub>2</sub> from Antarctic ice cores (after Ahn and Brook, 2008; Lüthi *et al.*, 2008) in which the brown bars showing the interglacial periods; (c) millennial cycles: millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates (after Bond *et al.*, 1997) in which the yellow bars showing the millennial-scale cycles; (d) climatic variations on centennial-decadal time scales: Annual temperature of China (referenced period: 1851 ~ 1950) (after Ge *et al.*, 2015)

节轨道要素变化等问题不是很清楚。

在众多的第四纪冰期假说中,低纬海洋驱动和温室气体驱动是继米兰科维奇理论之后两个主要的假说(Lea *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2003; 丁仲礼,2006)。热带海洋,特别是太平洋,由于其巨大的能量储存能力,在调节两个半球以及东、西太平洋热力平衡方面起着重要的作用。在年至年代际尺度上,学术界对热带海洋在全球变化中的作用没有太大的争论,例如:学术界一致认为厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和太平洋年代际涛动(PDO)对全球 70% 地区的气候变化产生

了深刻的影响。既然在年-年代际尺度上,低纬海洋在全球变化中起着至关重要的作用,为什么在轨道尺度上不能?

依据每个冰期-间冰期旋回中间冰期只有 1 万年左右(图 4b),现代间冰期早在 1.15 万年或 1.45 万年之前就已经开始,因此下一次冰期已经来临或即将来临(Broecker, 1966)。全球变暖似乎扰乱了地球气候的自然进程,2002 年, Berger 等预测全球下一次冰期大约在 5 万年之后(Berger and Loutre, 2002)。基于对中国黄土-古土壤序列的研究, Hao *et al.* (2012) 指出某些冰期可能由南极过程驱动,北半球当前温暖气候将继续至少 4 万年。最近, Ganopolski *et al.* (2016) 通过对太阳辐射和二氧化碳数据的模拟,推测下一次冰期来临要等待 10 万年。

在回答下一次冰期何时来临这一科学问题上,玛珥湖记录给出了不一样的答案。法国 Ribains 玛珥湖高分辨率多指标(硅藻、孢粉、硅藻氧同位素等)记录揭示了上次冰期-间冰期转变的细节,在距今 12.7 ~ 11.0 万年,欧洲大陆经历了一个持续 1 ~ 1.2 万年稳定的暖期,随后为 1 万年温度逐渐下降但仍然稳定的阶段,再进入冰期。如果现代气候变化进程与之类似,那么地球未来气候可能要经历时间长度大约为 1 万年逐渐降温但仍然比较稳定的过程,然后再进入下一次冰期(Rioual *et al.*, 2001)。遗憾的是这一论点缺少其它地区高分辨率、多指标记录的验证。我国热带地区玛珥湖(例如田洋、九斗洋、青桐洋)沉积物跨越了至少 4 个冰期-间冰期旋回,能够提供冰期-间冰期转变阶段变化的细节,是研究轨道尺度高分辨率古气候变化的优良载体,但目前科学家们还没有开展高分辨率、多指标的研究。虽然冰期-间冰期的历史不太可能是简单地重复,但了解几个旋回的变化细节将有助于我们定位现代气候在轨道尺度上的位置。

我国热带玛珥湖在理解低纬作用方面有巨大的潜力,郑卓和 Guiot (1999) 通过对田洋玛珥湖沉积物孢粉及孢粉转换函数的研究,重建了 40 万年来年均温度和年降雨量。过去 40 万年来,温度变化的 4 个降温期大致与深海同位素阶段 10、8、6、4、2 可以对比,冰期与间冰期之间的年均温度变化幅度约为  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,但从年降雨量来看,冰期-间冰期旋回变化不明显,除末次冰期有短暂的干旱期外,其它时段变化较小(郑卓和 Guiot, 1999)。值得强调的是田洋玛珥湖孢粉记录揭示的冰期-间冰期尺度的降水量变化与我国北方黄土-古土壤序列以及南方石笋氧同位素记录存在巨大差异,可能说明在轨道尺度上,中国不同地区的气候变化不是简单的冰期-干冷、间冰期-暖湿的匹配。不同气候区,各种气候变化要素(温度、冰量、季风、降水量、大气海洋循环)是否均有明显的轨道周期? 因此,明确周期的性质(温度、冰量、季风、降水量、大气海洋循环等)十分重要。

低纬气候最显著的特点之一是 2 万年岁差周期,南北半球的石笋氧同位素记录提供了有力的支持。理论上,低纬海洋在调控南北半球的能量、物质(降水)平衡方面应该起主导作用。如果我们能够在定量-近似定量方面能够有所突破,

我国热带地区的几个玛珥湖沉积记录将能够很好地回答下面这两个问题:(1)温度和降水变化是否均存在 2 万年的岁差周期?(2)厄尔尼诺-南方涛动和太平洋年代际涛动等是否存在更长时间尺度的准周期变化?

准确可靠的年代框架是研究冰期-间冰期尺度沉积记录的基础,对玛珥湖沉积物而言,除常规的磁性地层学方法外,建议运用 Ar-Ar 法确定玄武岩(射汽喷发)的形成年龄,另外玛珥湖沉积物中常有火山灰夹层,可以从中挑选出捕虏晶体(注意区别非同次火山爆发来源的晶体)进行单颗粒 Ar-Ar 测年或锆石 U-Pb SIMS 测年。其它方法如热释光、光释光、电子自旋共振、纹层年代学等也可以应用于较老的玛珥湖沉积物定年。例如, Mingram (1998) 对德国始新世玛珥湖沉积物进行了纹层年代学研究。值得指出的是年纹层不仅广泛见于中高纬度地区的湖泊中,热带地区的玛珥湖也发育年纹层,例如北美洲赤道区的 Valle de San-tiago 玛珥湖(Kienel *et al.*, 2009)、缅甸 Twintaung 玛珥湖(孙青等, 2015)。即使沉积物中年纹层不是连续的,也能提供某一时段的浮动年龄及沉积速率,为判断其它年代学数据的正确与否提供参考。总之,运用多种方法,相互验证,才能获得可信度较高的时间标尺。

综上所述,我国热带地区玛珥湖沉积记录在理解冰期-间冰期驱动机制、岁差周期等关键科学问题方面是大有可为的。虽然冰期-间冰期的历史不太可能是简单地重复,但了解几个旋回的变化细节将有助于我们定位现代气候在轨道尺度上的位置。

### 3.2 千年尺度:驱动因子的不确定性

几十年来科学家们在南北半球不同纬度的各种高分辨率古气候记录均检测到千年尺度的气候波动。千年尺度气候变化可能是地球气候系统固有的特征,其成因可能源于不同的动力学机制,是气候系统对各种外部和内部驱动因子响应的结果。

从千年尺度看,轨道三要素引起的太阳辐射的变化很小,不足以引起千年尺度的变化;温室气体的变化也没有明显的千年震荡。因此,其原因或许可以理解为由于能量在地球各圈层(大气、海洋、冰盖)的分布发生了变化,引起了地球气候系统内部的震荡,或者是气候系统对外部因素(太阳活动)变化的响应与自我调控。

在全新世千年尺度气候古气候变化研究方面, Bond *et al.* (1997) 早在 1997 就发现北大西洋冰筏碎屑含量变化存在准周期性,其周期为  $1470 \pm 500$  年(1000 ~ 2000 年)。冰筏碎屑含量的气候意义为:气候寒冷期,由于浮冰扩展能够携带颗粒较粗的陆源碎屑,随着浮冰的融化,这些颗粒较粗的陆源碎屑在远海沉积下来,因此,冰筏碎屑含量能够很好的表征浮冰扩张的历史(图 4c)。Bond *et al.* (1997) 发现北大西洋冰筏碎屑增加的时段似乎与  $^{14}\text{C}$  和  $^{10}\text{Be}$  通量高的阶段对应,暗示千年震荡可能受控于太阳活动。但由于年代控制等

方面的不确定性,北大西洋其它岩芯中未能很好的重现 Bond 周期 (Moros *et al.*, 2004)。另外,太阳活动的千年周期为 1000 和 2115 年 (Hallstatt cycle) (Damon and Jirikiowic, 1992),似乎没有 1500 年左右的准周期,Bond 的伟大之处在于将不确定性标注为  $\pm 500$  年,充分考虑到了定年以及海洋碳库的不确定性。

我国热带和温带玛珥湖沉积记录均揭示出千年尺度的准周期变化(刘嘉麒等,2000;Chu *et al.*, 2014)。由于敏感性及指标反映的气候要素等方面的差异,不同地区或者同一地区不同指标揭示的周期长度不同。例如湖光岩沉积物干密度变化揭示的 2930、1140、220 年准周期(刘嘉麒等,2000),而磁化率揭示的全新世准周期为 1028、335、220、137、90、86 年,有机质含量变化的准周期为 2204、1208、116、82、53 年(Wang *et al.*, 2016,据该文数据计算)。东北小龙湾长链正构烷烃单体碳同位素显示的周期为 1750 ~ 2041、1020 ~ 1050 以及 205 ~ 212 年(Chu *et al.*, 2014),而孢粉记录揭示的周期则为 500 年,千年周期不明显(Xu *et al.*, 2014)。由于指标的气候意义不同,千年尺度变化的性质(温度、降水、季风等)也存在很大的差异。Wang *et al.* (2012)通过对湖光岩硅藻的研究,发现冬季风变化存在千年尺度的变化,自全新世以来是由强变弱的,而非由弱变强,全新世冬季风和夏季风的关系也不是简单的反相关联。

相对于复杂多样的千年尺度准周期性,湖光岩玛珥湖沉积物揭示的最明显的气候突变是发生在 6 ~ 7ka 之间,质量磁化率(指示湖泊氧化-还原环境指标)在此期间发生了巨大的变化。该突变有很好的重现性,不同部位的钻孔均揭示了该突变的存在(Yancheva *et al.*, 2007;Jia *et al.*, 2015;Wang *et al.*, 2016)。最近的成果显示质量磁化率从  $100 (10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  (6.6 ~ 6.4 ka 平均值)跃变到  $461 (10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  (6.4 ~ 6.2 ka 平均值)只经历了 200 年。湖光岩玛珥湖沉积物磁化率主要受氧化-还原状况控制(Yancheva *et al.*, 2007;Wang *et al.*, 2016),6.4ka 之前为深湖还原环境,而 6.4ka 之后为湖泊水位较低的氧化环境(Wang *et al.*, 2016)。这一突变可能与中全新世 ENSO 转型有关,南美 Laguna Pallcacocha 湖记录表明 7.0ka 之前 ENSO 的周期为 15 年或大于 15 年,随后周期逐渐演变到与现代 ENSO 相似的 2 ~ 8.5 年周期(Rodbell *et al.*, 1999)。值得指出的是湖光岩揭示 6.5ka 的突变在中高纬度的玛珥湖以及其它记录中不是很明显,暗示由于不同气候区的主控因子不同,千年尺度的渐变-突变在全球不存在统一的模式。正如前文指出的,热带海洋在年-年代际全球变化中起着重要作用,厄尔尼诺-南方涛动和太平洋年代际涛动等可能存在更长时间尺度的准周期或阶段性变化。

由于影响因子的复杂性(非单一因素控制),使千年尺度气候变化的准周期有很大的不确定性。另外,区域响应也存在很大的空间差异,某一区域或者某些时间段并不一定存在千年震荡。因此,理解千年尺度气候变化的机理需要更多的

区域数据支撑,中国不同气候区的玛珥湖沉积记录将为了了解千年尺度气候的渐变与突变过程提供可靠的地质证据。另外,气候变化是不同尺度的周期变化相互叠加的结果,因而要认识十年至百年尺度变化的规律,必须以千年尺度变化为背景。

### 3.3 年代尺度:预测未来气候变化的基础

过去 2 千年气候变化为预测和模拟未来提供了时间尺度比较合适的背景,PAGES 和 IPCC 均将过去 2 千年古气候变化作为预测未来几十年至百年尺度上重大全球变化的背景,为此构建全球数据体系并与器测记录对接,其中年-年代际气候变化规律是关键。过去 2000 年亚洲气候(PAGES-Asia 2K)是全球数据体系的组成部分之一,其目的在于建立亚洲过去 2000 年气候代用资料数据库,集成区域温度和干湿变化的时空序列,探讨区域气候变化的驱动机制(葛全胜等,2015)(图 4d),其中年代际是关键。气候变化包括季节、年际、年代际等多种时间尺度,聚焦于年代际是考虑到多数替代指标和自然档案很难达到季节或年分辨率,另外由于气候系统的超前/滞后的耦合过程,使人们很难在更高分辨的基础上讨论相关科学问题。

在年代际气候变化方面,湖光岩玛珥湖多指标(碳酸盐、TOC、TN、生物硅和非残渣态 Sr 含量等)记录表明该区降水量存在年代际到百年尺度的变化,小冰期为湿润期,中世纪暖期(公元 1300 ~ 900)为干旱期(Chu *et al.*, 2002;Zeng *et al.*, 2012)。东北四海龙湾纹层沉积长链烯酮定量温度重建表明生长季温度存在准周期性变化,其周期分别为 250、140、65 ~ 70 年,可能主要受控于太阳和火山活动(Chu *et al.*, 2012)。在区域降水量方面,小龙湾纹层沉积物的多指标( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、有机碳/氮含量、碎屑含量等)表明该区近 2 千年来经历了七次较为干旱的时期,中世纪暖期既是沙生活动较强的时期,也是湖泊生产率较高的时期(Chu *et al.*, 2009)。

玛珥湖沉积的特色之一是年纹层(Negendank and Zolitschka, 1993)。年纹层是季节气候变化的产物,形成于无扰动的深水环境,不仅能够提供可靠的时间标尺,而且蕴含了丰富的气候、水文、环境变化信息,是研究年际、年代际变率的理想材料。目前,国内外学者只对中国温带的 3 个玛珥湖(四海龙湾、小龙湾、二龙湾)开展了年纹层研究。最近的一些研究发现湖泊年纹层不仅分布于高、中纬地区,而且在低纬热带地区也有年纹层沉积。例如,赤道附近的 Valle de Santiago 玛珥湖,湖水深 76m,碳酸盐年纹层发育良好(Kienel,2009)。缅甸热带地区 Twintaung 玛珥湖(湖水深 50m)也发育了碳酸盐年纹层(Sun *et al.*, 2016)。我国热带地区的几个玛珥湖(深水期)也有可能存在年纹层沉积,即使是部分时段存在年纹层沉积,也将为建立、验证年代学标尺提供可靠的依据。

在全球变化研究中,年-年代际数据体系是科学预测的

基础,如何提高分辨率、将古气候时间序列与器测记录对接是“气候变率与可预报性研究”和“过去全球变化研究”共同面临的交叉科学问题(丁一汇等,2013)。年代际气候波动是地球系统对各种外部和内部驱动因子响应的结果,时空变化必定会十分复杂。在古气候变化研究中,应该借鉴现代气候研究成果,研究高频古气候变化(例如:厄尔尼诺-南方涛动现象、太平洋年代际涛动、北极涛动和大西洋年代际涛动等)在地质历史中的时空分布规律,以便更好地评估未来这些变化发生的可能性。

## 4 结论

玛珥湖由于其独特的形成背景和水文特征,使之能够提供数万年乃至几十万年来连续稳定的沉积记录,是高分辨率古气候、古环境变化研究的重要对象。中国玛珥湖得天独厚,从热带到寒温带均有分布,应当为解决古全球变化研究中的一些关键科学问题作出贡献。

在轨道尺度上,我国热带地区玛珥湖沉积跨越了至少4个冰期-间冰期旋回,能够为精确定位现代气候在地质历史中的位置,理解冰期驱动机制、高低纬关联等关键科学问题提供多学科数据;千年尺度古气候变化是气候系统对各种外部和内部驱动因子响应的结果,因此千年震荡可能存在明显的时空差异。集成不同气候带的玛珥湖沉积记录将为理解千年震荡规律及其驱动因子做出贡献;年-年代际气候变化是预测未来气候变化的基础,玛珥湖沉积能够填补某些地区高分辨率数据的空白,为构建全球数据体系作出努力。

玛珥湖的沉积特色主要在于连续性(未间断)和稳定性(深水、厌氧环境有利于沉积物保存和无扰动),沉积物中蕴含了丰富的生物、物理化学指标,使我们能够从不同的角度认识古气候、古环境变化、检验重建数据的可靠性。今后研究工作应强调多学科(年代学和指标)的综合研究,相互验证,以期获得可信度较高的数据;在空间上,应该加强数据集成研究。

**致谢** 感谢特邀编辑徐义刚研究员及匿名审稿人提出的宝贵修改意见。

## References

Ahn J and Brook EJ. 2008. Atmospheric CO<sub>2</sub> and climate on millennial time scales during the last glacial period. *Science*, 322(5898): 83–85

Bai ZD, Xu DB, Zhang BL, Zhang T and Bu J. 2006. Study on type and phase of Quaternary explosive volcanism in Longgang volcanic cluster. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1473–1480 (in Chinese with English abstract)

Berger A and Loutre MF. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4): 297–317

Berger A and Loutre MF. 2002. An exceptionally long interglacial ahead?

*Science*, 297(5585): 1287–1288

Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, de Menocal P, Priore P, Cullen H, Hajdas I and Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278(5341): 1257–1266

Broecker WS. 1966. Absolute dating and the astronomical theory of glaciation. *Science*, 151(3708): 299–304

Chen JR, Huang CY, Ling MF, Jin QH and Han JX. 1990. Quaternary Geology of Tianyang Volcanic Lake, Guangdong Province. Beijing: Geological Publishing House, 30–81 (in Chinese)

Chu GQ, Liu J, Sun Q, Lu HY, Gu ZY, Wang WY and Liu TS. 2002. The “Mediaeval Warm Period” drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China. *The Holocene*, 12(5): 511–516

Chu GQ, Sun Q, Gu ZY, Rioual P, Liu Q, Wang KJ, Han JT and Liu JQ. 2009. Dust records from varved lacustrine sediments of two neighbouring lakes in northeastern China over the last 1400 years. *Quaternary International*, 194: 108–118

Chu GQ, Sun Q, Wang XH, Liu MM, Lin Y, Xie MM, Shang WY and Liu JQ. 2012. Seasonal temperature variability during the past 1600 years recorded in historical documents and varved lake sediment profiles from northeastern China. *The Holocene*, 22(7): 785–792

Chu GQ, Sun Q, Xie MM, Lin Y, Shang WY, Zhu QZ, Shan YB, Xu DK, Rioual P, Wang L and Liu JQ. 2014. Holocene cyclic climatic variations and the role of the Pacific Ocean as recorded in varved sediments from northeastern China. *Quaternary Science Reviews*, 102: 85–95

Creer KM. 1996. The EUROMAARS Project: A Multidisciplinary Approach Directed to the Reconstruction of Palaeoenvironmental, Palaeoclimatic and Palaeogeomagnetic Changes Recorded by Sediments Deposited in Maar Lakes Located in Western Europe. Oxford: Pergamon, 1–20

Damon PE and Jirakovic JL. 1992. The sun as a low-frequency harmonic oscillator. *Radiocarbon*, 34(2): 199–205

De Geer G. 1912. A geochronology of the last 12000 years. In: *Proceedings of the International Geological Congress*. Stockholm: International Geological Congress, 1: 241–253

Ding YH, Sun Y, Liu YY, Si D, Wang ZY, Zhu YX, Liu YJ, Song YF and Zhang J. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 37(2): 253–280 (in Chinese with English abstract)

Ding ZL. 2006. The Milankovitch theory of Pleistocene glacial cycles: Challenges and chances. *Quaternary Sciences*, 26(5): 710–717 (in Chinese with English abstract)

Fan QC, Liu RX, Wei HQ, Sui JL and Li N. 1999. The petrology and geochemistry of Jinlongdingzi modern active volcano in Longgang area. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 584–589 (in Chinese with English abstract)

Fan QC, Sun Q, Li N and Sui JL. 2004. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 533–544 (in Chinese with English abstract)

Fisher RV and Waters AC. 1970. Base surge bed forms in maar volcanoes. *American Journal of Science*, 268(2): 157–180

Ganopolski A, Winkelmann R and Schellnhuber HJ. 2016. Critical insolation-CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature*, 529(7585): 200–203

Ge QS, Zheng JR and Hao ZX. 2015. PAGES synthesis study on climate changes in Asia over the last 2000 years: Progresses and perspectives. *Acta Geographica Sinica*, 70(3): 354–363 (in Chinese with English abstract)

Hao QZ, Wang L, Oldfield F, Peng SZ, Qin L, Song Y, Xu B, Qiao YS, Bloemendal J and Guo ZT. 2012. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400000-year minima in insolation variability. *Nature*, 490(7420): 393–396

Huang ZG, Cai FX and Han ZY. 1993. Quaternary Volcanoes of Lei and Qiong Peninsulas. Beijing: Science Press, 1–281 (in Chinese)

- Jia GD, Bai Y, Yang XQ, Xie LH, Wei GJ, Ouyang TP, Chu GQ, Liu ZH and Peng PA. 2015. Biogeochemical evidence of Holocene East Asian summer and winter monsoon variability from a tropical maar lake in southern China. *Quaternary Science Reviews*, 111: 51–61
- Kienel U, Bowen SW, Byrne R, Park J, Böhnelt H, Dulski P, Luhr JF, Siebert L, Haug GH and Negendank JFW. 2009. First lacustrine varve chronologies from Mexico: Impact of droughts, ENSO and human activity since AD 1840 as recorded in maar sediments from Valle de Santiago. *Journal of Paleolimnology*, 42(4): 587–609
- Kienle J, Kyle PR, Self S, Motyka RJ and Lorenz V. 1980. Ukinrek Maars, Alaska, I. April 1977 eruption sequence, petrology and tectonic setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7(1–2): 11–37
- Lea DW, Pak DK and Spero HJ. 2000. Climate impact of Late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 289(5485): 1719–1724
- Liu JQ, Liu DS, Chu GQ, Xiao JL and Luo XJ. 1996. Maar lake and varve chronology. *Quaternary Sciences*, 16(4): 353–358 (in Chinese with English abstract)
- Liu JQ. 1999. Volcanoes in China. Beijing: Science Press, 1–125 (in Chinese)
- Liu JQ, Chu GQ and Liu TS. 2000. Fossil-rich Early Cretaceous maar lakes in Liaoxi, Northeast China. *Terra Nostra*, 6: 274–278
- Liu JQ, Lu HY, Negendank J, Mingram J, Luo XJ, Wang WY and Chu GQ. 2000. Periodicity of Holocene climatic variations in the Huguangyan Maar Lake. *Chinese Science Bulletin*, 45(18): 1712–1717
- Liu JQ, Wu J, Chu GQ, Liu Q, Wang L, Rioual P, Liu JL and You HT. 2013. Progress of palaeoclimatic and palaeoenvironmental studies on Maar Lakes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(6): 639–650 (in Chinese with English abstract)
- Liu TS, Liu JQ and Chu GQ. 2002. Early cretaceous maars, depositional environments and their relationship to the fossil preservation in Sihetun, Liaoning, Northeast China. In: Zhou ZH and Zhang FC (eds.). *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Symposium of the Society of Avian Paleontology and Evolution*. Beijing: Sciences Press, 309–312
- Lorenz V. 1973. On the formation of maars. *Bulletin Volcanologique*, 37(2): 183–204
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, Blunier T, Barnola JM, Siegenthaler U, Raynaud D, Jouzel J, Fischer H, Kawamura K and Stocker TF. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650000 ~ 800000 years before present. *Nature*, 453(7193): 379–382
- Lutz H and Lorenz V. 2013. Early volcanological research in the Vulkaneifel, Germany, the classic region of maar-diatreme volcanoes: The years 1774 ~ 1865. *Bulletin of Volcanology*, 75: 743
- Mertz DF, Swisher CC, Franzen JL, Neuffer FO and Lutz H. 2000. Numerical dating of the Eckfeld maar fossil site, Eifel, Germany: A calibration mark for the Eocene time scale. *Naturwissenschaften*, 87(6): 270–274
- Milankovitch MM. 1941. Canon of Insolation and the Ice-Age Problem, Beograd: Koniglich Serbische Akademie. [English translation by the Israel Program for Scientific Translations]. U.S. Department of Commerce, and National Science Foundation, Washington, D. C., 1–633
- Mingram J. 1998. Laminated Eocene maar-lake sediments from Eckfeld (Eifel region, Germany) and their short-term periodicities. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 140(1–4): 289–305
- Mingram J, Allen JRM, Brüchmann C, Liu J, Luo X, Negendank JFW, Nowaczyk N and Schettler G. 2004. Maar and crater lakes of the Longgang Volcanic Field (N.E. China): Overview, laminated sediments, and vegetation history of the last 900 years. *Quaternary International*, 123–125: 135–147
- Moros M, Emeis K, Risebrobakken B, Snowball I, Kuijpers A, McManus J and Jansen E. 2004. Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: Climate influences on northern Europe and Greenland. *Quaternary Science Reviews*, 23(20–22): 2113–2126
- Negendank JFW and Zolitschka B. 1993. *Paleolimnology of European Maar Lakes*. Berlin: Springer-Verlag, 1–509
- Rioual P, Andrieu-Ponel V, Rietti-Shati M, Battarbee RW, de Beaulieu JL, Cheddadi R, Reille M, Svobodova H and Shemesh A. 2001. High-resolution record of climate stability in France during the last interglacial period. *Nature*, 413(6853): 293–296
- Rodbell DT, Seltzer GO, Anderson DM, Abbott MB, Enfield DB and Newman JH. 1999. An ~ 15000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science*, 283(5401): 516–520
- Sui SZ and Wang WY. 2003. The discussion of the bottom age of TY2 core from paleo-maar-lake Tianyang, Guangdong Province. *Quaternary Sciences*, 23(2): 232 (in Chinese with English abstract)
- Sun Q, Fan QC, Wei HQ, Sui JL, Bai ZD, Xu DB, Shi LB, Zhang BL and Hong HJ. 2003. Preliminary study on Late Pleistocene phreatomagmatic eruption of northern Hainan Island. *Seismology and Geology*, 25(2): 289–297 (in Chinese with English abstract)
- Sun Q, Shan YB, Sein K, Su YL, Zhu QZ, Wang L, Sun JM, Gu ZY and Chu GQ. 2015. Carbonate varves and minor element variations during the past 100 years in Maar Lake Twintaung, Myanmar. *Science Bulletin*, 60(11): 1038–1047 (in Chinese)
- Sun Q, Shan YB, Sein K, Su YL, Zhu QZ, Wang L, Sun JM, Gu ZY and Chu GQ. 2016. A 530 year long record of the Indian Summer Monsoon from carbonate varves in Maar Lake Twintaung, Myanmar. *Journal of Geophysics Research: Atmosphere*, 121(10): 5620–5630
- Wang LL, Tian MZ and Bai ZD. 2013. Volcanic geological relics and their features in Arshan-Chaihe area in Inner Mongolia. *Resources & Industries*, 15(1): 89–95 (in Chinese with English abstract)
- Wang PX, Tian J, Cheng XR, Liu CL and Xu J. 2003. Carbon reservoir changes preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event. *Geology*, 31(3): 239–242
- Wang XJ, Bai ZD, Tan L, Wu ZL and Wang Y. 2012. Maars in Xilinhot-Abaga volcanic cluster. *Seismology and Geology*, 34(3): 440–448 (in Chinese with English abstract)
- Wang XS, Chu GQ, Sheng M, Zhang SQ, Li JH, Chen Y, Tang L, Su YL, Pei JL and Yang ZY. 2016. Millennial-scale Asian summer monsoon variations in South China since the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 451: 22–30.
- Xu DK, Lu HY, Chu GQ, Wu NQ, Shen CM, Wang C and Mao LM. 2014. 500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record. *Scientific Reports* 4, 3611
- Yancheva G, Nowaczyk NR, Mingram J, Dulski P, Schettler G, Negendank JFW, Liu JQ, Sigman DM, Peterson LC and Haug GH. 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 445(7123): 74–77
- Zeng Y, Chen JA, Zhu ZJ, Li J, Wang JF and Wan GJ. 2012. The wet Little Ice Age recorded by sediments in Huguangyan Lake, tropical South China. *Quaternary International*, 263: 55–62
- Zhao YW, Fan QC, Bai ZD, Sun Q, Li N, Sui JL and Du XX. 2008. Preliminary study on Quaternary volcanoes in the Halaha River and Chaoer River area in Daxing'an Mountain range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2569–2575 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Z and Guiot J. 1999. A 400000-year paleoclimate reconstruction in tropical region of China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 38(6): 94–98 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Z, Wang JH, Wang B, Liu CL, Zou HP, Zhang H, Deng Y and Bai Y. 2003. High-resolution records of Holocene from the Shuangchi Maar Lake in Hainan Island. *Chinese Science Bulletin*, 48(5): 497–502
- Zolitschka B, Anselmetti F, Ariztegui D, Corbella H, Francus P, Lücke A, Maidana NI, Ohlendorf C, Schäbitz F and Wastegård S. 2013. Environment and climate of the last 51000 years-new insights from the Potrok Aike maar lake Sediment Archive Drilling project (PASADO). *Quaternary Science Reviews*, 71: 1–12

## 附中文参考文献

- 白志达, 徐德斌, 张秉良, 张焘, 卜景. 2006. 龙岗火山群第四纪爆破式火山作用类型与期次研究. 岩石学报, 22(6): 1473–1480
- 陈俊仁, 黄成彦, 林茂福, 金庆焕, 韩建修. 1990. 广东田洋火山湖第四纪地质. 北京: 地质出版社, 30–81
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 司东, 王遵娅, 朱玉祥, 柳艳菊, 宋亚芳, 张锦. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测. 大气科学, 37(2): 253–280
- 丁仲礼. 2006. 米兰科维奇冰期旋回理论: 挑战与机遇. 第四纪研究, 26(5): 710–717
- 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 隋建立, 李霓. 1999. 龙岗金垅顶子近代活动火山的岩石学与地球化学. 岩石学报, 15(4): 584–589
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 隋建立. 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化. 岩石学报, 20(3): 533–544
- 葛全胜, 郑景云, 郝志新. 2015. 过去 2000 年亚洲气候变化 (PAGES-Asia2k) 集成研究进展及展望. 地理学报, 70(3): 354–363
- 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元. 1993. 雷琼第四纪火山. 北京: 科学出版社, 1–281
- 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, 16(4): 353–358
- 刘嘉麒. 1999. 中国火山. 北京: 科学出版社, 1–125
- 刘嘉麒, 吕厚远, Negendank J, Mingram J, 骆祥君, 王文远, 储国强. 2000. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性. 科学通报, 45

(11): 1190–1194

- 刘嘉麒, 伍婧, 储国强, 刘嘉丽, 刘强, 旺罗, Rioual P, 游海涛. 2013. 玛珥湖古气候环境研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 32(6): 639–650
- 隋淑珍, 王文远. 2003. 广东田洋古玛珥湖 TY2 孔基底岩芯的年龄探讨. 第四纪研究, 23(2): 232
- 孙谦, 樊祺诚, 魏海泉, 隋建立, 白志达, 徐德斌, 史兰斌, 张秉良, 洪汉净. 2003. 琼北地区晚更新世射气岩浆喷发初步研究. 地震地质, 25(2): 289–297
- 孙青, 单雅冰, Sein K, 苏有亮, 朱庆增, 旺罗, 孙继敏, 顾兆炎, 储国强. 2015. 缅甸 Twintaung 玛珥湖碳酸盐年纹层及 100 年来微区原位元素分析. 科学通报, 60(11): 1038–1047
- 王丽丽, 田明中, 白志达. 2013. 内蒙古阿尔山-柴河火山地质遗迹类型及其特征. 资源与产业, 15(1): 89–95
- 王锡娇, 白志达, 谭琳, 吴之理, 王妍. 2012. 锡林浩特-阿巴嘎火山群内的玛珥式火山. 地震地质, 34(3): 440–448
- 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 孙谦, 李霓, 隋建立, 杜星星. 2008. 大兴安岭哈拉哈河-淖尔河地区第四纪火山活动初步研究. 岩石学报, 24(11): 2569–2575
- 郑卓, Guiot J. 1999. 我国热带地区 40 万年以来古气候的定量恢复. 中山大学学报(自然科学版), 38(6): 94–98
- 郑卓, 王建华, 王斌, 刘春莲, 邹和平, 张华, 邓韞, 白雁. 2003. 海南岛双池玛珥湖全新世高分辨率环境纪录. 科学通报, 48(3): 282–286