

湖光岩玛珉湖非残渣态 Rb/Sr 比值研究及其古气候意义

曾艳^{1,2}, 陈敬安^{1*}, 张维³, 朱正杰^{1,4}, 李健¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 贵州省环境科学研究设计院, 贵州 贵阳 550002; 4. 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室, 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042)

摘要: 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值变化主要受控于 Sr 含量的变化, 而真正反映流域化学风化强度的主要是迁移至集水盆地(湖泊)的溶解态 Sr^{2+} , 在沉积物中主要以碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态等形式存在。通过对不同赋存状态的 Rb/Sr 比值与相应的 Sr 含量之间相关关系的对比分析发现, 沉积物非残渣态 Rb/Sr 比值更好地反映了流域化学风化。根据湖光岩玛珉湖沉积物非残渣态 Rb/Sr 比值的剖面变化, 恢复了该流域一千多年来的化学风化历史。湖光岩玛珉湖非残渣态的 Rb/Sr 比值在 AD704~1850 年存在 2 个低值, 即 AD740~860 年和 AD1400~1750 年, 表明这两个时段该流域化学风化较强, 其中 AD1550~1700 化学风化最强。湖光岩玛珉湖流域的化学风化主要受降水的控制, 而温度对它的影响不明显。

关键词: 沉积物; Rb/Sr 比值; 化学风化; 湖光岩玛珉湖

中图分类号: P595; X142 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2011)03-0249-09

The non-residual Rb/Sr ratio of the Huguangyan Maar Lake and its implications for paleoclimate change

ZENG Yan^{1,2}, CHEN Jing-an^{1*}, ZHANG Wei³, ZHU Zheng-jie^{1,4} and Li Jian¹

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Guizhou Research and Designing Institute of Environmental Science, Guiyang 550002, China;
4. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Minerallization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China

Abstract: The Rb/Sr ratios in lake sediments depend on Sr contents. The chemical weathering of the drainage basin can be better reflected by dissolved Sr^{2+} , which is mainly bound to carbonate and/or to Fe-Mn oxides in lake sediments. Through comparative analysis of Rb/Sr ratios in non-residual, residual and bulk samples, we found that the Rb/Sr ratios in non-residual samples were the closest to the chemical weathering in the catchment basin. The history of chemical weathering of the past 1000 years in the catchment of Huguangyan Maar Lake was reconstructed, on the basis of analyses of non-residual Rb/Sr ratio in the lake sediments. During AD740~860 and AD1400~1750, the non-residual Rb/Sr ratios were much lower, indicating that the chemical weathering of the two periods were relatively strong. Our results showed that chemical weathering in the catchment was dominantly controlled by precipitation, while the effect of temperature was not obvious.

Key words: sediments; Rb/Sr ratios; chemical weathering; Huguangyan Maar Lake

收稿日期(Received): 2010-07-23; 改回日期(Revised): 2010-10-15; 接受日期(Accepted): 2010-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(40873084, 40721002)

作者简介: 曾艳(1983-), 女, 博士研究生, 主要从事湖泊沉积物元素地球化学研究。E-mail: zyan-2004@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Jing-an, E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn, Tel: +86-851-5893158

ZENG Yan et al.: The non-residual Rb/Sr ratio of the Huguangyan Maar Lake and its implications for paleoclimate change

0 引言

利用湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值反映古气候变化已得到广泛应用^[1-9]。随着流域岩石与土壤化学风化强度的增强,更多的 Sr 从岩石与土壤中淋失迁移而进入湖盆, Rb 则残留在原地的岩石与土壤中,从而导致相应时期湖泊沉积物 Rb/Sr 比值减小^[5, 10, 11]。在化学风化过程中 Rb 与粘土矿物具有强亲和性,常造成细粒粘土矿物具有较高的 Rb/Sr 比值和较低的 Sr 含量,而粗粒硅酸盐碎屑矿物则具有较低的 Rb/Sr 比值^[12]。

事实上,真正反映流域化学风化强度的主要是迁移至集水盆地(湖泊)的溶解态 Sr^{2+} , 它们最终通过物理吸附和化学沉淀等形式沉降于湖底,在沉积物中主要以碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态等非残渣态形式存在。化学风化对温度和湿度变化敏感,在干冷的气候条件下,化学风化作用主要受温度的控制,随着温度的降低而降低;在暖湿的气候条件下,降水起主要作用,降水量增加,化学风化作用增强^[6, 13]。因此,对沉积物非残渣态 Rb/Sr 比值的研究有助于揭示流域化学风化历史乃至气候变化。本研究试图通过对湖光岩玛珥湖沉积物柱芯不同赋存状态 Rb、Sr 含量剖面变化的系统研究,探讨沉积物不同赋存状态 Rb/Sr 比值的古环境指示意义,进而揭示湖光岩玛珥湖流域化学风化历史。

1 研究区概况

湖光岩玛珥湖(21°9'N, 110°17'E)位于广东省湛江市西南方约 20 km 处,是雷琼新生代火山中一个典型的玛珥湖。该湖封闭无外流,分为东西两个部分,其中东湖小,西湖大,东西方向最长为 1.9 km,南北方向最宽为 1.4 km。湖盆周围为相对高程 10~20 m 的火山角砾岩、集块岩、凝灰岩组成的火山垣,最大海拔高度为 87.6 m。湖水面积约 2.3 km²,最大水深约 22 m,汇水面积较小,约 3.5 km²。湖光岩玛珥湖东临太平洋,西临南中国海,位于南亚热带-热带北部的气候过渡区,终年受海洋气候调节,该地区多年年平均温度为 23 °C,年均降水量为 1600 mm,干(10月—3月)湿(4月—9月)季明显。植被为半常绿雨林。该地区主要受东亚季风影响,夏季受来自西太平洋的东南季风和印度洋的西南季风影响,冬季西伯利

亚-蒙古季风盛行,以偏北风为主。此外热带风暴、台风和冬季的北方冷锋都影响该地区^[14]。

2 样品与方法

利用自制的重力采样器于 2004 年 12 月在湖光岩玛珥湖深水处采得长 106 cm 沉积物柱芯 F 柱,采样位置见图 1。所采沉积物柱芯保存完好,悬浮层未受扰动,界面水清晰。沉积物柱芯在野外现场按 1 cm 间隔分样,装入塑料自封袋中密闭保存。运回实验室后,沉积物样品经真空冷冻干燥器(型号:FD-IA-50)干燥后,称量样品干重,用玛瑙研钵研磨至 120 目以下。

按照 ASTM D3974-81 Practice B 推荐的方法,用 1 mol/L HCl 可提取氢氧化物结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态,以及铁锰氧化物结合态和弱有机质结合态^[15-16]。低浓度的 HCl 由于被碳酸盐中和,不足以提取其他成分,而高浓度的 HCl 会溶解部分残渣态(主要为陆源碎屑)。因此,本实验采用 1 mol/L HCl 浸取沉积物中以非残渣态形式存在的 Rb、Sr;浸取后剩余的残渣态 Rb、Sr 则采用 HNO₃-HF 高温密闭消解。

具体步骤如下:称取 0.500 g 干燥研磨后沉积物样品,放入 50 mL 聚乙烯离心管中。加入 20 mL 的 1 mol/L HCl,在室温下振荡反应 2 h 后离心提取上清液(4000 r/min, 20 min)。对剩余的酸不溶物,重复以上“HCl 浸取-离心-提取清液”步骤 2 次。将提取的上清液定容至 100 mL 后,取 10 mL 于 30 mL Teflon 烧杯中,蒸干,用 4% HNO₃ 溶解,定容至 50 mL,待测。经 HCl 提取后的残余物,加 20 mL 去离子水振荡 20 min 离心,丢弃上清液,重复以上步骤 2 次。经去离子水洗涤的残余物冷冻干燥后,利用 HNO₃-HF 高温密闭消解。

Rb、Sr 含量的分析采用中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室 Finnigan MAT 公司生产的 ELEMENT 型高分辨等离子体质谱仪,误差小于 ±5%。

3 沉积物计年

湖光岩玛珥湖 F 柱共获得 4 个不同层位的 6 个陆生植物残体,样品送往苏格兰大学环境研究中心(Scottish Universities Environmental Research Centre)进行 ¹⁴C 年代测定(表 1)。表层样品进行了放射性核

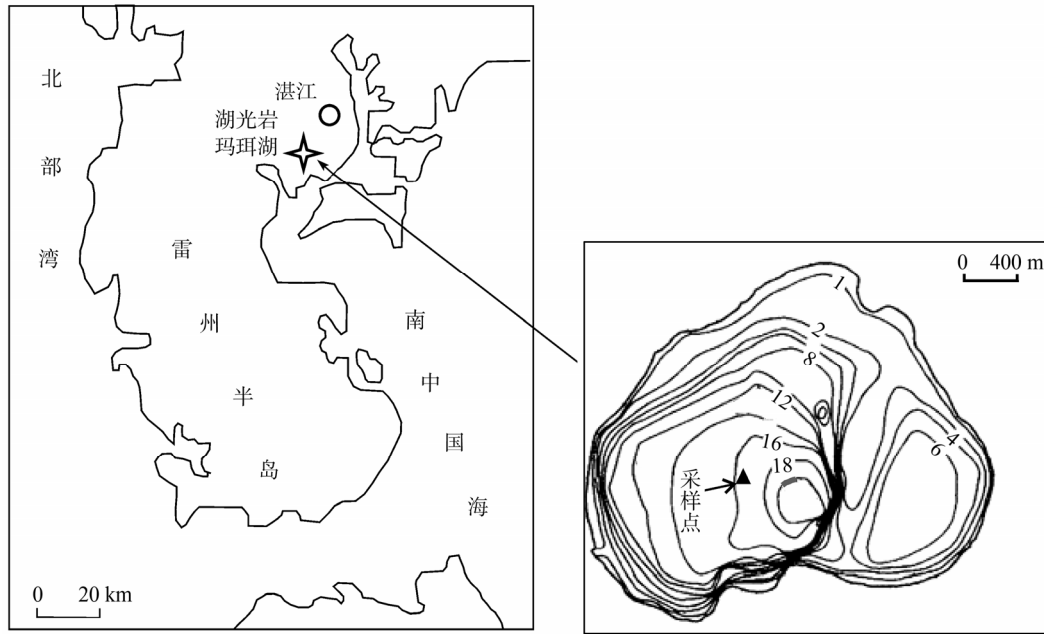


图 1 采样点位置

Fig.1 The location of the Huguangyan Maar Lake and core F site
右图为等高线图, 单位: m。

表 1 湖光岩玛珉湖沉积物 F 柱 6 个陆源植物碎片 ¹⁴C 定年数据
Table 1 Radiocarbon dating results in core F of the Huguangyan Maar Lake

样号	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	¹⁴ C 年龄 (a B.P.)	质量深度 (g/cm ²)	沉积速率 (g/(cm ² · a))
F55	-28.1	290±18	20.1766	0.0696
F57	-27.1	303±20	20.9572	0.0692
F58-1	-25.0	366±23	21.3621	0.0584
F58-2	-27.7	319±20	21.3621	0.0670
F58-3	-29.2	351±23	21.3621	0.0609
F-105	-25.0	1273±20	44.8934	0.0353

素 ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 计年。放射性核素 ¹³⁷Cs 在沉积物柱芯的分布特征证实了 ²¹⁰Pb 计年结果的有效性, 同时 ²¹⁰Pb 与 ¹³⁷Cs 计年的一致性也表明湖光岩玛珉湖表层沉积物堆积速率具有连续、稳定的堆积特点。²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 计年结果显示湖光岩玛珉湖表层沉积物的堆积速率约为 0.06 g/(cm² · a)^[17]。沉积物柱芯下半部分的年龄根据已获得的 ¹⁴C 年龄计算出的沉积速率进行内插和外推获得, 柱芯年龄见图 2。

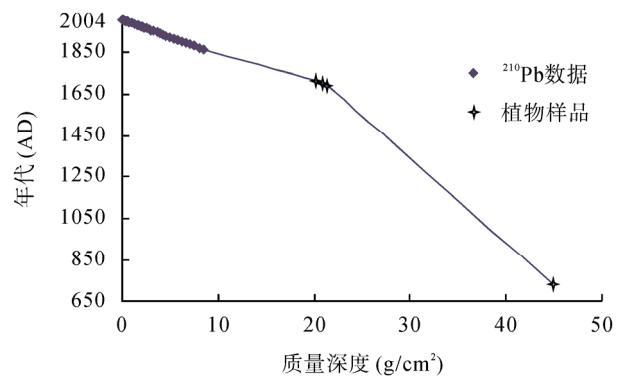


图 2 湖光岩玛珉湖 F 柱年代-质量深度关系图
Fig.2 Age versus mass-depth in core F of the Huguangyan Maar Lake

4 结果与讨论

湖光岩玛珉湖 F 柱非残渣态的 Rb 含量为 2.88~4.57 μg/g, 非残渣态的 Sr 含量为 21.58~50.74 μg/g; 残渣态的 Rb 含量为 20.29~43.16 μg/g, 残渣态的 Sr 含量为 31.18~95.06 μg/g。非残渣态的 Rb、Sr 含量

分别占全样 Rb、Sr 含量的 7.80%~15.59%和 23.37%~54.10%。不同赋存状态的 Rb、Sr 含量剖面变化(图 3)显示出全样中 Rb、Sr 含量的变化主要受

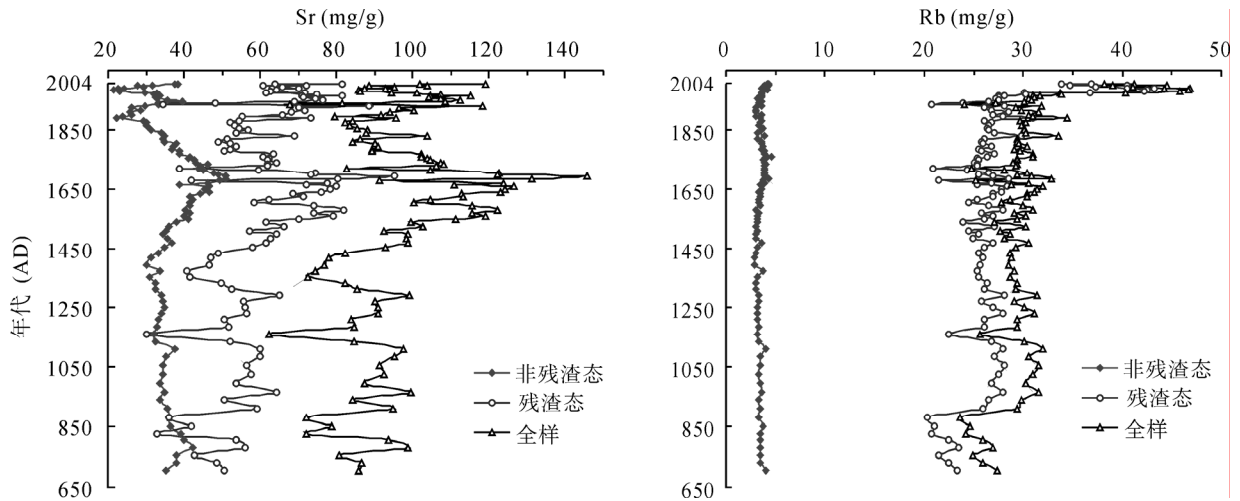


图3 不同赋存状态的 Rb、Sr 含量变化

Fig.3 The contents of Rb and Sr in non-residual, residual and bulk samples

控于残渣态 Rb、Sr 含量的变化; 非残渣态的 Sr 含量变化曲线起伏较大, 而非残渣态的 Rb 含量波动则很小。

地表风化过程中, 铷(Rb)、锶(Sr)地球化学行为的显著差异早就引起了国内外学者的关注^[12, 18-21]。Rb 的离子半径与 K 相近, 在自然界主要以类质同像形式赋存于钾长石和云母等相对难以风化的含 K 矿物中, 在风化过程中释放出的 Rb 也易于进入含 K 的粘土矿物, 因此在岩石风化成土过程中大部分 Rb 残留在原地; Sr 的离子半径与 Ca 相近, 表现出与 Ca 相似的地球化学行为, 主要赋存在斜长石和碳酸盐等易风化的矿物中, 在风化过程中多以溶解 Sr^{2+} 的形式迁移而淋失^[19, 21-24]。Dasch^[21]早在 20 世纪 60 年代在对风化剖面 Rb、Sr 变化的研究中就发现, 随着风化程度增强, 岩石与土壤的 Rb/Sr 比值逐渐升高。他因此提出 Rb/Sr 比值可反映母岩风化程度。在对中国黄土-古土壤序列微量元素的研究过程中, 国内外学者先后发现黄土剖面中的 Rb/Sr 比值与黄土风化成壤强度密切相关, 黄土层 Rb/Sr 比值明显低于古土壤层^[12, 19, 23, 25]。在此基础上, 一些学者利用黄土剖面的 Rb/Sr 比值成功反演了黄土高原数万年以来的化学风化历史与气候变化^[18, 22, 26, 27]。

上述有关陆地表生风化作用过程中 Rb、Sr 不同地球化学行为的研究为湖泊沉积物微量元素记录研究开启了新的思路。作为流域地表物质运移的主要宿体, 湖泊接收了大量流域岩石与土壤风化作用的产物。随着流域岩石与土壤化学风化程度的增强, 更多的 Sr 从岩石与土壤中淋失迁移而进入湖

盆, Rb 则残留在原地的岩石与土壤中, 从而导致相应时期湖泊沉积物 Rb/Sr 比值减小。简言之, 湖泊沉积物较低的 Rb/Sr 比值指示了流域较强的化学风化作用。化学风化对温度和湿度的变化很敏感, 在干冷的气候条件下, 溶解 Sr 的浓度主要受温度的控制, 随着温度的降低而降低; 在暖湿的气候条件下, 降水起主要作用, 降水量增加, 更多的 Sr 进入湖盆^[7, 13, 17]。

自然条件下, 湖泊沉积物物质来源主要包括两部分: 一是流域物理侵蚀直接带来的陆源碎屑组分, 在沉积物中多以残渣态(碎屑矿物)形式存在; 二是流域化学风化带来的溶解态物质, 在湖泊水体中通过物理吸附、化学沉淀和生物吸收等过程沉降至沉积物中, 多以非残渣态形式(包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态等)存在。事实上, 上述有关 Rb/Sr 比值指示流域化学风化的讨论只是针对非残渣态中的 Rb/Sr 比值, 如果用湖泊沉积物全样中地球化学元素的含量变化来说明流域化学风化历史, 势必受到残渣态组分(陆源碎屑)的干扰。湖光岩玛珥湖不同赋存状态的 Rb/Sr 比值与相应的 Sr 含量的相关关系也表明了这一点, 非残渣态的 Rb/Sr 比值与相应的 Sr 含量之间具有较好的相关关系, 而残渣态和全样的 Rb/Sr 比值分别与相应的 Sr 含量之间的相关性较差一些(图 4)。这一方面反映了 Rb/Sr 比值的变化主要受控于 Sr 含量的变化; 另一方面反映了与残渣态和全样的 Rb/Sr 比值相比, 非残渣态的 Rb/Sr 比值能更好地反映流域的化学风化。

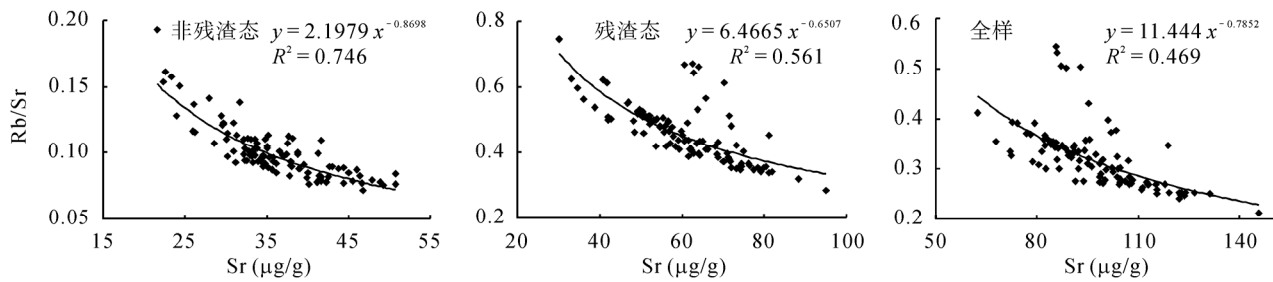


图 4 湖光岩玛珉湖不同赋存状态的 Rb/Sr 比值与相应的 Sr 含量的相关关系

Fig.4 Correlation of Rb/Sr ratios versus Sr contents in non-residual, residual and bulk samples of the Huguangyan Maar Lake

同时, 湖泊沉积物中陆源碎屑矿物的 Rb/Sr 值又存在明显的粒度效应, 即: 主要由粘土矿物组成的细粒碎屑物质的 Rb/Sr 比值远大于含有较多石英、长石矿物的粗粒碎屑物质^[4, 28, 29]。金章东等在对岱海的研究中也发现岱海沉积物中 Rb 与粘土含量同样存在正相关关系, Rb 与粘土具有强亲和性^[30]。Rb/Sr 比值的粒度效应在黄土中也有体现, Li *et al.*^[31] 在对下蜀黄土的研究中也发现 Rb 在小于 2 μm 的组分中含量最高, 在大于 45 μm 的组分中含量最低。Sr 含量随粒度的变化与 Rb 含量的变化正好相反。Sr 和 Rb 的负相关关系与 Rb、Sr 赋存在不同的矿物中有关: Rb 主要以类质同像形式赋存于钾长石和云母等相对难以风化的含 K 矿物中, 在风化过程中释放的 Rb 也易于进入含 K 的粘土矿物; Sr 主要赋存在斜长石和碳酸盐等矿物中。湖光岩玛珉湖由于无河流注入等因素, 沉积物粒度变化不是很大, 粒度对元素(包括 Rb、Sr)的影响较小, Rb 和 Sr 含量没有表现出显著的负相关变化, 但是粒度对元素含量的影响依然存在。从元素的赋存形式及元素的形态分析方法^[32] 中可知, 沉积物中各元素呈可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机质结合态(含硫化物结合态)和残渣态(主要为造岩硅酸盐矿物)等五种赋存形式; 其中前四种赋存形式与沉积物沉积时的地球化学环境有关, 残渣态一般只跟物源区的物质组成有关, 与沉积物沉积时的地球化学环境关系不大^[33]。因此利用非残渣态的 Rb/Sr 比值来反映流域所经历的化学风化在很大程度上消除了粒度对结果的影响。

以上的分析表明, 与流域化学风化相关(即能反映流域化学风化)的是非残渣态 Rb/Sr 比值的变化。湖泊沉积物中非残渣态的 Rb/Sr 比值与流域化学风化强度呈负相关关系。

湖光岩玛珉湖非残渣态 Rb/Sr 比值(图 5)在

AD704~1850 存在 2 个低值, 分别在 AD740~860 和 AD1400~1750, 其中在 AD1550~1700 最低, 表明这两个时段流域化学风化较强。AD1850 至今, 非残渣态的 Rb/Sr 比值偏高, 且波动幅度较大, 可能是受到湖盆流域人口密度增大^[34]以及人为活动干扰增强的影响。

湖光岩玛珉湖非残渣态的 Rb/Sr 值所揭示的强(弱)化学风化期与储国强等^[35-36]对该湖泊流域恢复的湿润(干旱)期具有较好的对应性(图 5)。湖光岩玛珉湖沉积物 TOC/TN 比值较低, 平均值为 10, 这可能说明沉积物中有机质大部分来源于浮游生物^[37-38]。一般认为气温高和降水携带的营养物质有利于藻类的繁盛, TOC 与 TN 的变化可能反映了温度与降水的变化^[39-40]。储国强等^[36]对湖光岩生物硅(BS)的研究结果显示 BS 与 TOC、TN、TOC/TN 呈相似的变化趋势。硅藻生产力主要受表层水温度和湖泊的营养状态控制。来自流域的溶解物质是湖泊营养物质的重要组成部分, 降雨量增加和流域侵蚀加强会导致湖泊营养物质增多^[41-42]。已有研究^[17, 43, 44]表明, 我国南方热带地区经历了小冰期寒冷气候事件。因此, 在小冰期期间温度不可能是湖光岩藻类生产力增大的因素, 降水量的变化才是 TOC、TN、TOC/TN 以及 BS 波动的主要原因。王文远等^[45]的研究也表明, 对于封闭的湖光岩玛珉湖, 硅藻发育可能相关于营养的供应, 也就是更相关于降水的变化。在湖光岩玛珉湖汇水盆地内无碳酸盐岩, 通过镜下观察也发现湖光岩沉积物中碳酸盐为自生成因。碳酸盐的含量可能主要反映了流域降水量的变化^[35]。在小冰期期间, 沉积物中低的 TIC、高的 TOC、TN、TOC/TN、BS 指示了流域降水量增加。近年来一些学者^[46-49]对小冰期气候模拟的结果也证实了这一点。在小冰期, 太阳辐射减少和火山灰增加的综合效果使中国东部地区的夏季风降水增加, 而南亚地区的西南季

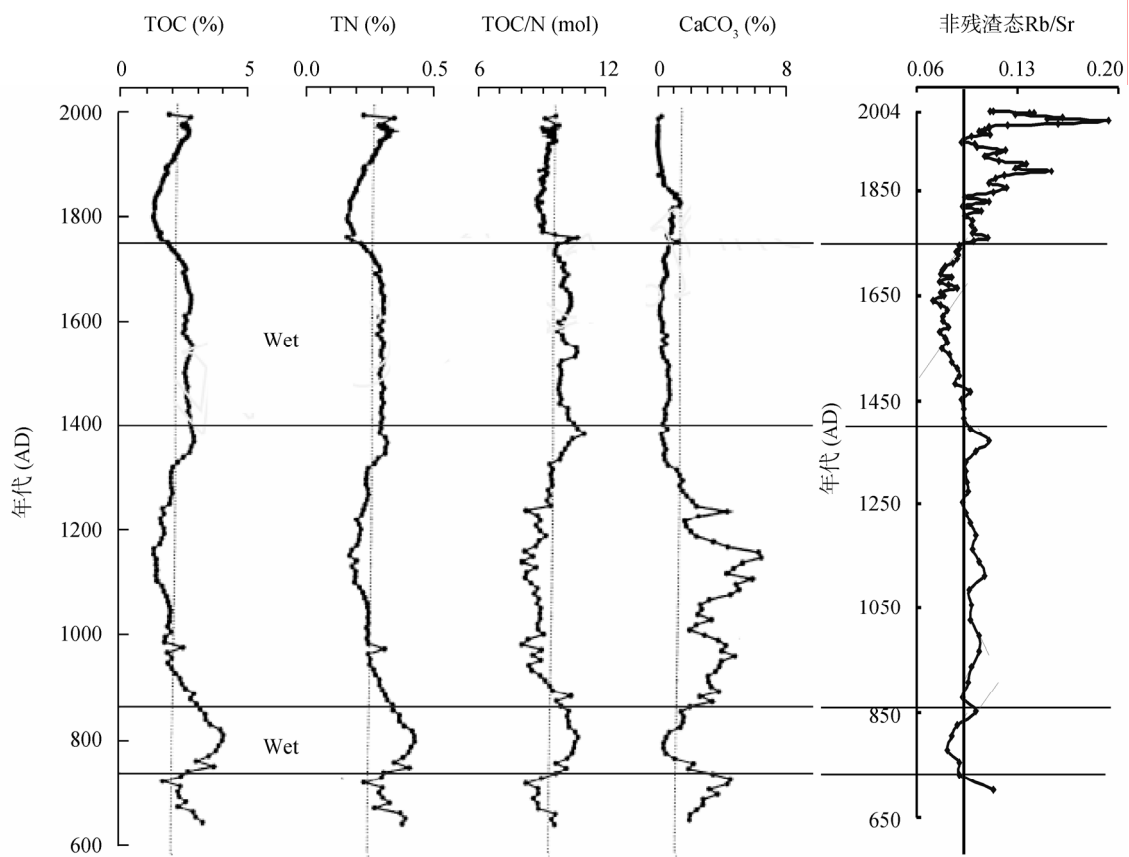


图5 湖光岩玛珉湖有机碳(TOC)、氮(TN)、TOC/TN、CaCO₃含量和非残渣态 Rb/Sr 比值变化

Fig.5 Variations of TOC, TN, TOC/TN, CaCO₃ and Rb/Sr ratios in non-residual samples of the Huguangyan Maar Lake
TOC、TN、TOC/TN 和 CaCO₃ 数据据储国强等^[35], 非残渣态 Rb/Sr 比值数据据本次研究(湖光岩 F 柱数据)。

风降水显著减少。湖光岩位于中国东南沿海, 主要受东亚夏季风的影响, 因此可以推测在小冰期期间降水量增加。与此形成鲜明对比的是, 在中世纪暖期, TOC、TN、TOC/TN、BS 处于低值, 而 TIC 处于高值, 可能暗示了降水量减少, 气候干旱。从图 5 中可以看出, 低的非残渣态 Rb/Sr 比值正好对应低的 TIC、高的 TOC、TN、TOC/TN; 高的非残渣态 Rb/Sr 比值正好对应高的 TIC、低的 TOC、TN、TOC/TN。这表明了湖光岩玛珉湖非残渣态 Rb/Sr 比值的变化对应着流域降水量的变化, 反映出该流域化学风化可能主要受降水的影响, 温度对流域化学风化的影响不明显。在以冷湿为特征的“小冰期”气候条件下, 非残渣态的 Rb/Sr 比值较低, 流域化学风化较强; 在温暖干燥的“中世纪暖期”, 非残渣态的 Rb/Sr 比值较高, 流域化学风化则较弱。

5 结 论

湖光岩玛珉湖沉积物柱芯 Sr 含量的剖面变化起

伏较大, 而 Rb 含量波动很小, 其 Rb/Sr 比值变化主要受控于沉积物 Sr 含量的变化。与残渣态和全样的 Rb/Sr 比值相比, 沉积物非残渣态 Rb/Sr 比值更好地反映了流域化学风化。湖光岩玛珉湖非残渣态的 Rb/Sr 比值在 AD704~1850 年存在 2 个低值, 即 AD740~860 年和 AD1400~1750 年, 表明这两个时段该流域化学风化较强, 其中 AD1550~1700 化学风化最强。湖光岩玛珉湖位于热带地区, 温度对该地区化学风化影响较小, 其流域化学风化作用主要受降水量变化影响, 因此沉积物非残渣态 Rb/Sr 比值可能指示了流域降雨量的变化。湖光岩玛珉湖 AD1550~1700 的低 Rb/Sr 比值可能指示了小冰期该地区降雨量较大, 气候湿润。

参考文献(References):

- [1] Wang G P, Zhai Z L. Geochemical data as indicators of environmental change and human impact in sediments derived from downstream marshes of an ephemeral river, Northeast China[J]. Environ Geol, 2008, 53(6): 1261-1270.
- [2] Chen L, Shen H Y, Jia Y L, Wu J L, Li X S, Wei L, Wang P L.

- Environmental change inferred from Rb and Sr of lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia[J]. *J Geogr Sci*, 2008, 18(3): 373–384.
- [3] Goldberg E L, Phedorin M A, Chebykin E P, Zolotarev K B, Zhuchenko N A. Decade-centenary resolution records of climate changes in East Siberia from elements in the bottom sediments of lake Baikal for the last 150 kyr[J]. *Nucl Instr Meth A*, 2007, 575(1): 193–195.
- [4] Kalugin I, Daryin A, Smolyaninova L, Andreev A, Diekmann B, Khlystov O. 800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye Lake sediments[J]. *Quatern Res*, 2007, 67(3): 400–410.
- [5] Jin Z D, Cao J J, Wu J L, Wang S M. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia[J]. *Earth Surf Process Land*, 2006, 31(3): 285–291.
- [6] Wu Y H, Andress L, Jin Z D, Wang S M, Schleser G H, Battacharjee R W, Xia W L. Holocene climate development on the central Tibetan Plateau: A sedimentary record from Cuoe Lake[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 234(2): 328–340.
- [7] Jin Z D, Li F C, Cao J J, Wang S M, Yu J M. Geochemistry of Daihai Lake sediments, Inner Mongolia, north China: Implications for provenance, sedimentary sorting, and catchment weathering[J]. *Geomorphology*, 2006, 80(3): 147–163.
- [8] 金章东, 张恩楼. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候含义[J]. *科学技术与工程*, 2002, 2(3): 20–22.
Jin Zhang-dong, Zhang En-lou. Paleoclimate implication of Rb/Sr ratios from lake sediments [J]. *Sci Technol Eng*, 2002, 2(3): 20–22 (in Chinese with English abstract).
- [9] 金章东, 沈吉, 王苏民, 张恩楼. 岱海的“中世纪暖期”[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(2): 209–216.
Jin Zhang-dong, Shen Ji, Wang Su-min, Zhang En-lou. The Medieval Warm Period in the Daihai area[J]. *J Lake Sci*, 2002, 14(2): 209–216 (in Chinese with English abstract).
- [10] Jin Z D, Wu J L, Cao J J, Wang S M, Shen J, Gao N H, Zou C J. Holocene chemical weathering and climatic oscillations in north China: Evidence from lacustrine sediments[J]. *Boreas*, 2004, 33(3): 260–266.
- [11] 金章东, 王苏民, 沈吉, 张恩楼, 季峻峰, 李福春. 小冰期弱化学风化的湖泊沉积记录[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(3): 221–225.
Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji, Zhang Enlou, Ji Junfeng, Li Fuchun. Weak chemical weathering during the Little Ice age recorded by lake sediments[J]. *Sci China (D)*, 2001, 31(3): 221–225 (in Chinese).
- [12] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 朱洪兵, 鹿化煜. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. *中国科学(D 辑)*, 1997, 27(6): 531–536.
Chen Jun, Ji Junfeng, Qiu Gang, Zhu Hongbing, Lu Huayu. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan Loess-Paleosol sequence, China[J]. *Sci China (D)*, 1997, 27(6): 531–536 (in Chinese).
- [13] Jin Z D, Wang S M, Shen J, Zhang E L, Li F C, Ji J F, Lu X W. Chemical weathering since the little ice age recorded in lake sediments: A high-resolution proxy of past climate[J]. *Earth Surf Process Land*, 2001, 26(7): 775–782.
- [14] 韩玉林, 谈晓冬, 陈忠, 向荣, 张兰兰. 湖光岩玛珥湖表层沉积物磁性粒度特征及其来源[J]. *科学通报*, 2010, 55(3): 261–267.
Han Yulin, Tan Xiaodong, Chen Zhong, Xiang Rong, Zhang Lanlan. Magnetic granulometry of recent sediments from the Huguang Maar and its implication for provenience[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(3): 418–424.
- [15] Snape I, Scouller R C, Stark S C, Stark J, Riddle M J, Gore D B. Characterisation of the dilute HCl extraction method for the identification of metal contamination in Antarctic marine sediments[J]. *Chemosphere*, 2004, 57(6): 491–504.
- [16] Lavilla I, Filgueiras A V, Valverde F, Millos J, Palanca A, Bendicho C. Depth profile of trace elements in a sediment core of a high-altitude lake deposit at the Pyrenees, Spain[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2006, 172(1): 273–293.
- [17] 李健, 张维, 田世洪, 陈敬安. 湖光岩玛珥湖沉积物硅藻硅同位素环境示踪[J]. *矿物学报*, 2009, 29(4): 530–535.
Li Jian, Zhang Wei, Tian Shi-hong, Chen Jing-an. Silicon isotope composition of diatom as indicators of environmental change in the sediment of Marr Lake Huguangyan, Guangdong Province, China[J]. *Acta Mineral Sinica*, 2009, 29(4): 530–535 (in Chinese with English abstract).
- [18] Chen J, An Z S, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130, 000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. *Quatern Res*, 1999, 51(3): 215–219.
- [19] 陈骏, 安芷生, 汪永进, 季峻峰, 陈 , 鹿化煜. 最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(6): 498–504.
Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, Ji Junfeng, Chen Yang, Lu Huayu. Distribution of Rb and Sr in the Luochuan Loess-Paleosol sequence of China during the last 800 ka: Implication for paleomonsoon variations [J]. *Sci China (D)*, 1998, 28(6): 498–504 (in Chinese).
- [20] Goldstein S L. Decoupled evolution of Nd and Sr isotopes in the continental-crust and the mantle[J]. *Nature*, 1988, 336(6201): 733–738.
- [21] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1969, 33(12): 1521–1552.
- [22] 庞奖励, 黄春长, 张占平. 陕西岐山黄土剖面 Rb、Sr 组成与高分辨率气候变化[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 637–641.
Pang Jiang-li, Huang Chun-chang, Zhang Zhan-ping. Rb, Sr elements and high resolution climatic records in the loess-paleosol profile at Qishan, Shaanxi[J]. *Acta Sedimentol Sinica*, 2001, 19(4): 637–641 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈骏, 汪永进, 季峻峰, 陈 , 鹿化煜. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义[J]. *第四纪研究*, 1999, 7(4): 350–356.
Chen Jun, Wang Yong-jin, Ji Jun-feng, Chen Yang, Lu

- Hua-yu. Rb/Sr variation and its climate stratigraphical significance of a Loess-Paleosol profile from Luochuan, Shaanxi Province[J]. Quatern Sci, 1999, 7(4): 350-356 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-143.
Liu Ying-jun, Cao Li-ming, Li Zhao-lin, Wang He-nian, Chu Tong-qing, Zhang Jing-rong. Geochemistry of Elements[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-143 (in Chinese).
- [25] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications[J]. Chem Geol, 1996, 133(1): 67-88.
- [26] 陈 , 陈骏, 刘连文, 季峻峰, 张建新. 最近 13 万年来黄土高原 Rb/Sr 记录与夏季风时空变迁[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(6): 513-519.
Chen Yang, Chen Jun, Liu Lianwen, Ji Junfeng, Zhang Jianxin. Spatial and temporal changes of summer monsoon on the Loess Plateau of central China during the last 130 ka inferred from Rb/Sr ratios[J]. Sci China (D), 2003, 33(6): 513-519 (in Chinese).
- [27] 陈骏, 汪永进, 陈 , 刘连文, 季峻峰, 鹿化煜. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259-266.
Chen Jun, Wang Yong-jin, Chen Yang, Liu Lian-wen, Ji Jun-feng, Lu Hua-yu. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate[J]. Acta Geol Sinica, 2001, 75(2): 259-266 (in Chinese with English abstract).
- [28] Gallet S, Jahn B M, Lanoe B V, Dia A, Rossello E. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust[J]. Earth Planet Sci Lett, 1998, 156(3/4): 157-172.
- [29] Kalugin I, Selegei V, Goldberg E, Seret G. Rhythmic fine-grained sediment deposition in Lake Teletskoye, Altai, Siberia, in relation to regional climate change[J]. Quatern Int, 2005, 136(1): 5-13.
- [30] 金章东, 王苏民, 沈吉, 季峻峰, 李福春, 卢新卫, 张恩楼. 内陆湖泊流域的化学风化及气候变化——以内蒙古岱海为例[J]. 地质论评, 2001, 47(1): 42-46.
Jin Zhang-dong, Wang Su-min, Shen Ji, Ji Jun-feng, Li Fu-chun, Lu Xin-wei, Zhang En-lou. Chemical weathering and paleoclimatic change in watershed record in lake sediments[J]. Geol Rev, 2001, 47(1): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- [31] Li F C, Jin Z D, Xie C R, Feng J Y, Wang L B, Yang Y Z. Roles of sorting and chemical weathering in the geochemistry and magnetic susceptibility of Xiashu loess, East China[J]. J Asian Earth Sci. 2007, 29(5/6): 813-822.
- [32] Tessier A, P Campbell, M Bisson. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals[J]. Anal Chem, 1979, 51(7): 844-851.
- [33] 王爱华. 不同形态锶钡比的沉积环境判别效果比较[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 168-173.
Wang Ai-hua. Discriminant effect of sedimentary environment by the Sr/Ba ratio of different forms [J]. Acta Sdimentol Sinica, 1996, 14(4): 168-173 (in Chinese with English abstract).
- [34] 储国强. 湖光岩玛珥湖近 2000 年来炭屑沉积通量的变化与人类活动[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 183.
Chu Guo-qiang. The charcoal flux and human activity recorded in Maar Huguangyan during the last 2000 years[J]. Quatern Sci, 2001, 21(2): 183 (in Chinese with English abstract).
- [35] 储国强, 孙青. 中世纪暖期前后我国雷州半岛地区的古气候变化[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 354-360.
Chu Guo-qiang, Sun Qing. Paleoclimate change around the Medieval Warm Period in Leizhou peninsula, China [J]. J Geomech, 2002, 8(4): 354-360 (in Chinese with English abstract).
- [36] Chu G Q, Liu J Q, Sun Q, Lu H Y, Gu Z Y, Wang W Y, Liu T S. The 'Mediaeval Warm Period' drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China [J]. Holocene, 2002, 12(5): 511-516.
- [37] Dean W E, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands[J]. Geology, 1998, 26(6): 535-538.
- [38] Talbot M R, Laerdal T. The Late Pleistocene-Holocene palaeolimnology of Lake Victoria, East Africa, based upon elemental and isotopic analyses of sedimentary organic matter [J]. J Paleolimnol, 2000, 23(2): 141-164.
- [39] Rein B, Negendank J F W. Organic Carbon Contents of Sediments from Lake Schalkenmehrener Maar: A Palaeoclimate Indicator[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 163-172.
- [40] Brenner M, Dorsey K, Song X L, Wang Z G, Ruihua L, Binford M W, Whitmore T J, Moore A M. Paleolimnology of Qilu Hu, Yunnan Province, China[J]. Hydrobiologia, 1991, 214(1): 333-340.
- [41] Colman S M, Peck J A, Karabanov E B, Carter S J, Bradbury J P, King J W, Williams D F. Continental climate response to orbital forcing from biogenic silica records in lake Baikal[J]. Nature, 1995, 378(6559): 769-771.
- [42] Xiao J L, Inouchi Y, Kumai H, Yoshikawa S, Kondo Y, Liu T S, An Z S. Biogenic silica record in Lake Biwa of central Japan over the past 145,000 years[J]. Quatern Res, 1997, 47(3): 277-283.
- [43] 黄镇国, 张伟强. 中国热带西部的小冰期[J]. 热带地理, 2007, 27(6): 489-492.
Huang Zhen-guo, Zhang Wei-qiang. The little Ice Age in the west part of tropical China[J]. Trop Geogr, 2007, 27(6): 489-492 (in Chinese with English abstract).
- [44] 张伟强, 黄镇国. 中国热带的小冰期及其环境效应[J]. 地理学报, 2000, 55(6): 744-750.
Zhang Wei-qiang, Huang Zhen-guo. The little Ice Age and its environmental effects in the tropical zone of China[J]. Acta Geogr Sinica, 2000, 55(6): 744-750 (in Chinese with English abstract).
- [45] 王文远, 刘嘉麒, 彭平安. 湖泊沉积生物硅的测定与应用: 以湖光岩玛珥湖为例[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 327-330.
Wang Wen-yuan, Liu Jia-qi, Peng Ping-an. Determination and

- application of biogenic silica in lake sediments: An example from Huguangyan maar lake, southern China[J]. *Geochimica*, 2000, 29(4): 327–330 (in Chinese with English abstract).
- [46] 陈星, 刘健, 王苏民. 东亚地区小冰期气候的模拟[J]. *气象科学*, 2005, 25(1): 1–8.
Chen Xing, Liu Jian, Wang Su-min. Climate simulation of Little Ice Age over eastern Asia[J]. *Sci Meteorol Sinica*, 2005, 25(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [47] 刘健, 陈星, 王苏明, 郑益群, 于革. 小冰期气候的模拟[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(4): 462–468.
Liu Jian, Chen Xing, Wang Su-min, Zheng Yi-qun, Yu Ge. Palaeoclimate simulation of Little Ice Age[J]. *Progr Nat Sci*, 2004, 14(8): 716–724.
- [48] 刘健, von Storch H, 陈星, Eduardo Zorita, 郑景云, 王苏民. 千年气候模拟与中国东部温度重建序列的比较研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(20): 2251–2255.
Liu Jian, von Storch H, Chen Xing, Zorita E, Zheng Jingyun, Wang Sumin. Simulated and reconstructed winter temperature in the eastern China during the last millennium[J]. *Chinese Sci Bull*, 2005, 50(24): 2872–2877.
- [49] 刘健, 陈星, 于革, 王苏民. 东亚小冰期气候形成中太阳辐射和火山灰作用的敏感性试验[J]. *湖泊科学*, 2002 (2): 97–105.
Liu Jian, Chen Xing, Yu Ge, Wang Su-min. Sensitivity experiment of climate change in eastern Asia during the Little Ice Age by changing solar radiation and volcanic dust[J]. *J Lake Sci*, 2002 (2): 97–105 (in Chinese with English abstract).