

文章编号: 1001-8166(2011)08-0805-06

湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望^①

曾 艳^{1,2} 陈敬安^{1*} 朱正杰¹ 李 键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)

摘 要: Rb 和 Sr 在赋存矿物和表生地球化学行为等方面存在显著差异, 因而各种记录体中的 Rb/Sr 比值被广泛应用于古气候/古环境研究。湖泊沉积物中的 Rb、Sr 主要包括 2 部分来源: 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湖泊沉积物中, 多以非残渣态形式存在(包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和弱有机结合态等)。沉积物中不同赋存形态的 Rb、Sr 记录了不同的环境过程与信息, 笼统地利用沉积物全样的 Rb/Sr 比值来反演古气候/古环境往往存在偏差, 尤其是在物理风化和化学风化呈反向变化的地区, 采用沉积物全样 Rb/Sr 比值反演的古环境信息可能是混淆的, 甚至是错误的。开展湖泊沉积物不同赋存形态 Rb/Sr 比值的研究可有效解决上述问题, 并可提供更加全面、准确的流域物理搬运与化学风化信息: 非残渣态 Rb/Sr 比值反映流域化学风化作用, 适用于相对低分辨率(10 年际)的研究; 而残渣态 Rb/Sr 比值反映了流域物理搬运作用, 可用于年际甚至更高分辨率的研究。

关 键 词: 湖泊沉积物; Rb/Sr 比值; 古气候/古环境; 化学风化; 物理风化

中图分类号: P595; X142 **文献标志码:** A

Rb 和 Sr 在表生环境下显著不同的地球化学性质使其被广泛应用于古环境研究。Dasch^[1]通过对各种母岩在表生风化条件下 Rb、Sr 迁移过程的详细研究, 发现 Rb/Sr 比值可反映母岩的风化程度。此后, 利用黄土—古土壤剖面 Rb/Sr 比值变化反演风化—成壤强度取得了一系列可喜进展^[2~4]。Gallet 等^[5]对洛川黄土—古土壤剖面的 Rb/Sr 比值的研究表明该比值可清晰识别古土壤地层单元。陈骏等^[4]基于黄土—古土壤序列中 Rb/Sr 比值变化与磁化率变化的一致性, 提出了黄土—古土壤序列中 Rb/Sr 比值可作为东亚季风气候信号的指示剂。刘连文等^[6]对黄土和古土壤的连续提取实验结果表

明, K 和 Rb 等元素主要赋存在残留态中, 而 Sr 主要赋存于碳酸盐结合态和残留态中, 进一步证实黄土—古土壤剖面中 Rb/Sr 比值指示了黄土和古土壤遭受的淋溶程度, 可反映黄土高原的降雨量变化, 是夏季风强度变化的替代性指标。陈旻等^[7]对黄土高原 6 个剖面表层土壤样品的研究发现, Rb/Sr 比值随年均气温、年均降雨量的增高而增大, 尤其是与降雨量具有显著的正相关关系, 表明 Rb/Sr 比值主要受降雨量的控制, 进一步证实了 Rb/Sr 比值可作为夏季风环流要素中降水量的替代性指标。一方面, 对黄土—古土壤剖面 Rb/Sr 比值的研究成果为第四纪古气候/古环境和全球物质循环等研究领域

① 收稿日期: 2010-08-25; 修回日期: 2011-05-02.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“湖泊沉积物不同赋存状态 Rb/Sr 比值与古环境研究”(编号: 40873084); 国家科技支撑计划项目“草海湿地生态系统恢复与重建关键技术研究示范”(编号: 2011BAC02B02) 资助.

作者简介: 曾艳(1983-), 女, 陕西汉中, 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

① 通讯作者: 陈敬安(1973-), 男, 湖北麻城人, 研究员, 主要从事环境地球化学研究. E-mail: chenjingan@vip.skle.com; http://www.cnki.net

提供了大量有价值的信息^[8]。另一方面,有关黄土—古土壤剖面 Rb/Sr 比值的研究还为湖泊沉积物微量元素古环境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,湖泊接收了流域岩石与土壤风化作用产生的各种碎屑物质和化学溶解物。近年来,一些学者通过 Rb/Sr 比值和其他环境代用指标及历史记录的综合分析,发现湖泊沉积物 Rb/Sr 比值能很好地反映流域古气候/古环境变迁。湖泊沉积物中的 Rb、Sr 来源于流域物理侵蚀带来的陆源碎屑物质和化学风化带来的溶解物质在湖水中产生的沉淀物。不同来源的 Rb、Sr 在沉积物中的赋存形态不同,其反映的古环境信息也显著不同。本文在总结前人研究工作的基础上,系统分析了沉积物不同赋存形态 Rb/Sr 比值的古气候/古环境指示意义及其敏感性。

1 Rb、Sr 的地球化学特征

Rb 是典型的亲石分散稀有碱金属元素,在自然界中主要以分散形式存在,极少形成单独矿物。从 Rb⁺ 的地球化学性质来看,其离子半径较大(147 pm)和 K⁺(123 pm)比较接近,故在自然界中常以类质同象的形式赋存于钾长石、云母等富含 K 的矿物中。在岩石中 Rb 的含量和 K 的含量呈正相关,反映了二者在地球化学性质上的一致性。在岩石风化过程中,碱金属元素从硅铝酸盐格架中解离出来,并以离子形式迁移至水体中,但在海水中富集的碱金属主要是 Na,其他碱金属元素大部分被风化过程中形成的黏土矿物所吸附。Rb 比 K 更易于被黏土矿物吸附,在风化成壤过程中 Rb 的淋溶迁移量非常有限。

Sr 也是典型的亲石分散稀有金属元素, Sr²⁺ 的离子半径(112 pm)介于 Ca²⁺(99 pm)和 K⁺(123 pm)之间,在自然界中常以微量元素形式赋存于方解石、斜长石、钾长石、云母等矿物中。此外, Sr 也可形成独立矿物,如菱锶矿(碳酸盐)、天青石(硫酸盐)等。风化成壤过程中释放出的 Sr 一部分被黏土矿物吸附而滞留在原地,但相当一部分 Sr 以离子形式(主要以重碳酸盐、氯化物、硫酸盐的形式)随土壤溶液或地表水进行迁移,结果导致地层中 Sr 的淋失。

有关黄土—古土壤序列的研究结果表明, Rb 和 Sr 的赋存形态是决定二者在沉积成壤过程中不同地球化学行为的主要因素。Rb 在黏粒中含量高,主要存在于稳定的残渣态中,在风化成壤过程中呈现相对富集的特征; Sr 则主要分布于砂和粉砂粒级

中,赋存于残渣态和碳酸盐结合态中,随碳酸盐分解而部分淋失。

Rb 和 Sr 在黄土和古土壤中的分异特征必然导致不同气候条件下形成的黄土—古土壤中 Rb/Sr 比值的显著差异。黄土—古土壤序列中 Rb/Sr 比值应用于环境变迁方面的研究,就是基于表生环境中 Sr 相对于 Rb 的迁移活性差异建立起来的。

2 湖泊沉积物不同赋存形态 Rb/Sr 比值对古气候/古环境的响应特征

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。在自然条件下,湖泊沉积物主要包括 2 部分物质来源: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于湖泊沉积物中,多以非残渣态形式存在(包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和弱有机结合态等)。非残渣态与沉积时的地球化学环境有关,而残渣态一般只跟物源区的物质组成有关,与沉积时的地球化学环境无关^[9]。

2.1 非残渣态的 Rb/Sr 比值反映的流域化学风化信息

如前所述, Rb 在自然界主要以类质同象形式赋存于钾长石、云母等相对难风化的含 K 矿物中,在风化过程中释放出的 Rb 也易于进入含 K 的黏土矿物,因此在岩石风化成土过程中大部分 Rb 残留在原地; Sr 主要赋存在斜长石、碳酸盐等易风化的矿物中,在风化过程中多以溶解 Sr²⁺ 的形式迁移而淋失。因此,化学风化过程造成了进入湖泊水体 Rb 和 Sr 的分异。强的化学风化导致更多的溶解态 Sr²⁺ 迁移进入湖泊,致使湖泊水体和沉积物 Rb/Sr 比值降低。因此沉积物 Rb/Sr 比值可指示流域化学风化强度。岱海全新世时期的湖泊沉积物中的 Rb/Sr 比值变化被认为是气候变化导致径流中溶解物质通量变化造成的^[10]。一些研究相继发现湖泊沉积物中 Rb/Sr 值与流域化学风化强弱成负相关关系^[2,10~14],沉积物中较低的 Rb/Sr 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变化敏感,在干冷气候条件下,化学风化作用主要受温度控制,随着温度的降低而减弱;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^[11,15,16]。已有研究证实湖泊沉积物中 Rb/Sr 比

值可指示流域降雨量变化^[7, 17, 18]。

事实上, 以上利用湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值反映流域化学风化的研究从本质上来讲涉及到的是湖泊沉积物中的非残渣态部分。曾艳等^[19]在对湖光岩玛珥湖的研究中也发现, 非残渣态的 Rb/Sr 比值与非残渣态的 Sr 含量之间具有较好的相关关系, 而残渣态和全样的 Rb/Sr 比值与相应的 Sr 含量之间的相关性较差, 表明非残渣态的 Rb/Sr 比值能更好地指示流域的化学风化历程。

2.2 残渣态 Rb/Sr 比值反映的流域物理风化信息

沉积物中的残渣态物质主要来源于以颗粒态形式随径流迁移至湖泊的陆源碎屑物质, 因而其化学组分很大程度上继承了物源区物质组成的特性。在利用湖泊沉积物中陆源碎屑物质反映流域气候变化时, 需结合流域基岩的岩性特征。

Kalugin 等^[20]在对 Teletskoye 湖的研究中发现沉积物中的 Rb/Sr 比值取决于陆源碎屑物质的输入来源。如小支流悬浮物中砂和黏土组分中的 Rb/Sr 比值均比干流中的 Rb/Sr 比值高。与过去 160 年的气候变化进行比较发现, 当年降雨量降低时, Rb/Sr 升高, 正好与小支流径流量小、碎屑矿物输入少相吻合。在进一步的研究中发现, Teletskoye 湖沉积物的 Rb/Sr 值与沉积物粒度呈显著负相关变化, 粗粒沉积物中 Rb/Sr 比值较小, 含有较多的长石类矿物和相对较少的黏土矿物, 反映湖盆流域弱的化学风化作用下较强的陆源碎屑物质搬运^[21]。当物理搬运作用较强时, 更多的石英、长石等粗粒径的物质被搬运至湖泊, 沉积物中 Rb/Sr 比值减小; 当地表径流贫乏、物理搬运作用较弱时, 被搬运至湖泊的陆源物质大多为细粒黏土物质, 粗粒碎屑物质减少, 沉积物 Rb/Sr 比值增大。

Teletskoye 湖地处 Altai 地区东北部针叶林地带, 大部分的湖水输入来自于季节性的冰雪融化水^[21]。在这些陡峭的山区河流, 碎屑物质搬运快, 在物源区和水体滞留时间短, 流域物理风化作用占主导地位, 化学风化而来的溶解物质对湖泊沉积物的贡献相对较小。事实上, Kalugin 等^[20, 21]关于 Rb/Sr 比值指示流域物理风化的研究本质上涉及的是沉积物中的残渣态组分。

3 不同粒径沉积物 Rb/Sr 比值对古气候/古环境的响应特征

Kalugin 等^[21]发现 Teletskoye 湖沉积物中 Rb/Sr 比值与沉积物粒度呈显著负相关变化, 粗粒沉积物

中 Rb/Sr 比值较小。Sr 含量随粒度的变化与 Rb 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 主要赋存在细粒黏土矿物中, Sr 主要赋存在长石类矿物中。因此, Rb/Sr 比值在一定程度上可反映沉积物粒径, 进而反映流域陆源碎屑物质搬运作用。

孙倩等^[22]对内蒙古黄旗海湖泊沉积物全样和不同粒径沉积物 Rb、Sr 含量的研究表明, Rb、Sr 在不同粒径沉积物中的含量具有显著差异, 但二者还是表现出基本相似的粒径赋存特征: 在小于 20 μm 粒径中含量最高, 在 77 ~ 20 μm 粒径与全样中含量较低, 表明其趋向富集于细粒中。Chen 等^[17]和申洪源等^[23]的研究表明小于 20 μm 粒径的沉积物 Rb/Sr 比值能更好地反映流域的化学风化。这可能是因为黄旗海沉积物中, 细粒自生文石中的 Sr 主要来源于流域化学风化带来的溶解态物质。

在风化壳和湖泊沉积物中, Rb 都主要赋存在黏土矿物中, 但 Sr 的粒度效应则相对要复杂得多。在黄土和古土壤序列中, Sr 主要分布于砂和粉砂粒径中; 在 Teletskoye 湖沉积物中, Sr 主要赋存在砂和粉砂中; 而在内蒙古黄旗海沉积物中, Sr 倾向富集于细粒沉积物中。

通过以上分析可知, 湖泊沉积物中自生矿物(如碳酸盐)和陆源碎屑矿物中的 Sr 的粒度分布是不同的。当 Sr 以自生矿物为主要赋存矿物时, Sr 主要分布在细粒沉积物中; 当 Sr 以陆源碎屑矿物为主要赋存矿物时, Sr 主要分布在粗粒沉积物中。由于流域地质背景和气候条件不同, Sr 在不同湖泊中所赋存的矿物组分不同, 使 Rb/Sr 比值的环境指示意义不同。细颗粒沉积物中的 Sr 主要来自于水体中溶解 Sr 离子的沉淀, 其 Rb/Sr 比值能更好地反映流域的化学风化过程; 当沉积物中的 Sr 主要存在于粗粒陆源碎屑矿物中时, Rb/Sr 比值反映了流域物理搬运作用的强弱。

Xu 等^[24]对青海湖不同点位的表层沉积物 Rb/Sr 比值的研究发现, 表层湖泊沉积物中全样 Rb/Sr 比值的空间格局主要受陆源物质输入(水动力)的控制。一方面, 由于陆源碎屑物质含有较高的 Rb/Sr 比值, 从岸边/河流入口处到湖中心, 随着水动力的减弱, 陆源碎屑物质逐渐减少, 沉积物中的 Rb/Sr 比值逐渐降低; 另一方面, 在越靠近湖中心的位置, 沉积物中的陆源碎屑物质组分就越少, 而生物/化学沉降组分的含量就越高, 这部分物质相对更富集 Sr, 从而导致靠近湖中心的位置, Rb/Sr 比值较低。

这也表明采用沉积物全样 Rb/Sr 比值反演古气候可能会产生偏差。

4 湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值研究展望

由于 Rb 和 Sr 在赋存矿物和表生地球化学行为等方面存在显著差异,使湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值在反演古气候变化方面具有重要的研究价值。在前人的研究中有许多利用湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值反演流域气候变化的成功范例。但是,流域物理侵蚀和化学风化共同影响着湖泊沉积物中的 Rb/Sr 比值。物理侵蚀带来的陆源碎屑物质和化学风化带来的溶解态物质反映了不同的环境信息。笼统地利用沉积物全样中的 Rb/Sr 比值进行古气候/古环境分析很可能得出错误的结论。在利用湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值反映环境变迁时,需注意/结合以下几点:

(1) 从区域气候特征方面来讲,不同的气候特征下,流域化学风化和物理侵蚀对气候变化的响应不同。如在热带季风气候区,化学风化和物理侵蚀都主要受降水的影响。降水量增强导致流域内物理侵蚀增强的同时,化学风化也增强,二者的结果都使湖泊沉积物中 Sr 含量相对较高,而 Rb 含量相对较低,Rb/Sr 比值减小。在这种情况下,使用沉积物中全样 Rb/Sr 比值反映流域物理风化或者化学风化,对结果的影响不大。而在寒冷地区,流域的化学风化主要受温度的控制,温度的变化又影响植被覆盖度的变化。茂盛的植被在加剧岩石化学风化进程的同时,降低机械剥蚀的发展^[26]。温暖时期,在化学风化加速的同时,茂盛的植被和稳固的土壤使物理风化减弱;相反,在寒冷时期,植被减少,物理风化加强,大量尘土被带入湖泊。在这类地区,流域物理风化和化学风化可能呈现相反的变化趋势,使用湖泊沉积物全样中的 Rb/Sr 比值无法正确地反映古气候/古环境的变化,需要通过对不同赋存形态的 Rb/Sr 比值的系统分析来探讨流域物理风化和化学风化历程。可以发现,在物理风化和化学风化同向变化的地区,以往采用沉积物全样 Rb/Sr 比值反演的古气候/古环境信息不会存在大的偏差,但在物理风化和化学风化呈反向变化的地区,采用沉积物全样 Rb/Sr 比值反演的古气候/古环境信息可能是混淆的,甚至是错误的。开展湖泊沉积物不同赋存形态 Rb/Sr 比值的研究可有效解决这一问题,并可提供更加全面、准确的流域物理搬运与化学风化信息。

(2) 从时间尺度上来讲,不同赋存形态的 Rb/Sr 比值对气候变化响应的敏感性不同。元素从风

化壳中被淋溶、迁移至湖泊水体中,再通过物理、化学和生物作用发生沉降而封存在湖泊沉积物中。整个过程除了与气候环境有关外,还与湖泊自身的水化学环境有关。化学风化是一个持续、渐变的过程,非残渣态的 Rb/Sr 比值反映流域化学风化的分辨率不会太高,适用于相对低分辨率(10 年际)的研究。而残渣态组分则是流域物理侵蚀结果的直接记录,物理搬运入湖的颗粒态物质通过重力沉降迅速到达湖泊底部。因此,残渣态的 Rb/Sr 比值能够反映的时间尺度分辨率较高,能够反映年际变化。我们在对湖光岩玛珉湖沉积物中不同赋存形态的 Rb/Sr 比值的分析结果也显示出:非残渣态的 Rb/Sr 比值曲线较为平滑,而残渣态的 Rb/Sr 比值曲线波动较为剧烈(尚未发表数据)。

(3) 利用湖泊沉积物中非残渣态 Rb/Sr 比值反映流域化学风化时还应注意:沉积物中非残渣态的 Rb、Sr 主要是以溶解态形式迁移入湖,最后沉降于湖泊的内源组分。当湖泊沉积物中含有陆源碎屑碳酸盐等组分时,需要采用其他有效的方法来提取湖泊自生碳酸盐等矿物中的 Sr。如通过粒度分级的方法来提取化学风化来源的 Sr,利用细粒沉积物中的 Rb/Sr 比值来反映流域化学风化历程。

参考文献 (References):

- [1] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, 33(12): 1 521-1 552.
- [2] Jin Zhangdong, Zhang Enlou. Paleoclimate implication of Rb/Sr ratios from lake sediments [J]. *Science Technology and Engineering* 2002, 2(3): 20-22. [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.]
- [3] Liu Xiuming, An Zhisheng, Qiang Xiaoke, et al. Magnetic properties of the tertiary red clay from Gansu province, China and its paleoclimatic significance [J]. *Science in China (Series D)* 2001, 31(7): 635-651. [刘秀铭, 安芷生, 强小科, 等. 甘肃第三系红粘土磁学性质初步研究及古气候意义 [J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(3): 192-205.]
- [4] Chen Jun, Wang Yongjin, Ji Junfeng, et al. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a Loess-Paleosol profile from Luochuan, Shaanxi province [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 7(4): 350-356. [陈骏, 汪永进, 季峻峰, 等. 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.]
- [5] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(1/4): 67-88.
- [6] Liu Lianwen, Chen Jun, Chen Yang, et al. Sequential extraction

- procedure of loess and paleosol and the implications of Rb/Sr ratios [J]. *Acta Pedologica Sinica* 2002, 39(1): 65-70. [刘连文, 陈俊, 陈旻, 等. 黄土的连续提取实验及 Rb/Sr 值意义[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 65-70.]
- [7] Chen Yang, Chen Jun, Liu Lianwen, *et al.* 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]. *Science in China (Series D)* 2003, 33(6): 513-519. [陈旻, 陈骏, 刘连文, 等. 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.]
- [8] Li Yumei. Luochuan Loess-Paleosol sequence and paleoenvironment implications: A brief review [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(1): 118-125. [李玉梅. 最近 2.5 Ma 黄土高原环境变化研究进展——来自洛川黄土地层的证据[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 118-125.]
- [9] Wang Aihua. Discriminant effect of sedimentary environment by the Sr/Ba ratio of different forms [J]. *Acta Sdimentologica Sinica*, 1996, 14(4): 168-173. [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.]
- [10] Jin Z D, Cao J J, Wu J L *et al.* A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(3): 285-291.
- [11] Jin Z D, Wang S M, Shen J, *et al.* Chemical weathering since the little ice age recorded in lake sediments: A high-resolution proxy of past climate [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(7): 775-782.
- [12] Jin Z D, Wu J L, Cao J J *et al.* Holocene chemical weathering and climatic oscillations in north China: Evidence from lacustrine sediments [J]. *Boreas*, 2004, 33(3): 260-266.
- [13] Jin Zhangdong, Wang Suming, Shen Ji *et al.* Carbonate versus silicate Sr isotope in lake sediments and its response to Little Ice Age [J]. *Chinese Science Bulletin* 2003, 48(1): 95-100. [金章东, 王苏明, 沈吉, 等. 湖泊沉积物 Sr 同位素记录的小冰期 [J]. 科学通报, 2002, 47(19): 1 512-1 516.]
- [14] Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji, *et al.* Weak chemical weathering during the Little Ice Age recorded by lake sediments [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(3): 221-225. [金章东, 王苏明, 沈吉, 等. 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.]
- [15] Yanhong W, Lücke A, Zhangdong J *et al.* Holocene climate development on the central Tibetan Plateau: A sedimentary record from Cuoe Lake [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 234(2/4): 328-340.
- [16] 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]. *Quaternary Research*, 1999, 51(3): 215-219.
- [17] Chen L, Shen H Y, Jia Y L *et al.* Environmental change inferred from Rb and Sr of lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3): 373-384.
- [18] Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin *et al.* Distribution of Rb and Sr in the Luochuan Loess-Paleosol sequence of China during the last 800 ka: Implication for paleomonsoon variations [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(3): 225-232. [陈骏, 安芷生, 汪永进, 等. 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.]
- [19] Zeng Yan, Chen Jing'an, Zhang Wei, *et al.* The non-residual Rb/Sr ratio of the Huguangyan Maar Lake and its implications for paleoclimate change [J]. *Geochimica*, 2011, 40(3): 249-257. [曾艳, 陈敬安, 张维, 等. 湖光岩玛珥湖非残渣态 Rb/Sr 比值研究及其古气候意义 [J]. 地球化学, 2011, 40(3): 249-257.]
- [20] Kalugin I, Selegei V, Goldberg E *et al.* Rhythmic fine-grained sediment deposition in Lake Teletskoye, Altai, Siberia, in relation to regional climate change [J]. *Quaternary International*, 2005, 136(1): 5-13.
- [21] Kalugin I, Daryin A, Smolyaninova L *et al.* 800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye Lake sediments [J]. *Quaternary Research* 2007, 67(3): 400-410.
- [22] Sun Qian, Jia Yulian, Shen Hongyuan, *et al.* Distribution and environmental implication of Rb, Sr in the Holocene lacustrine sediments of Huangqihai Lake, Inner Mongolia [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 4(4): 444-450. [孙倩, 贾玉连, 申洪源, 等. 内蒙古黄旗海全新世湖泊沉积物中 Rb、Sr 分布及其环境意义 [J]. 古地理学报, 2010, 4(4): 444-450.]
- [23] Shen Hongyuan, Jia Yulian, Li Xusheng, *et al.* Environmental change inferred from distribution of Rb and Sr in different grain size fractions from lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1 208-1 217. [申洪源, 贾玉连, 李徐生, 等. 内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物 Rb、Sr 组成与环境变化 [J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1 208-1 217.]
- [24] Xu H, Liu B, Wu F. Spatial and temporal variations of Rb/Sr ratios of the bulk surface sediments in Lake Qinghai [J]. *Geochemical Transactions*, 2010, 11(3), doi: 10.1186/1467-4866-11-3.
- [25] Koinig K A, Shotyk W, Lotter A F, *et al.* 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake—The role of climate, vegetation, and land-use history [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2003, 30(3): 307-320.
- [26] Li Jingying, Zhang Jing. Weathering of watershed basins and global climatic change [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(3): 411-419. [李晶晶, 张经. 流域盆地的风化作用与全球气候变化 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 411-419.]

Advance and Porspective of Rb/Sr Ratios in Lake Sediments as an Index of Paleoclimate/Paleoenvironment

Zeng Yan^{1 2}, Chen Jing'an¹, Zhu Zhengjie¹, 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*)

Abstract: Rb and Sr tend to disperse in different minerals, and they are significantly different in geochemical behavior under the Earth surface conditions, which makes Rb/Sr ratios of natural records used as a proxy of paleoclimate change. Under natural conditions, lake sediments include two material sources. One is the terrigenous debris directly caused by physical erosion, existing in the sediments mainly as the residual (detrital minerals) form. The other is dissolved substance caused by chemical weathering in the catchment, depositing in lake sediments through physical adsorption, chemical precipitation and biological uptaking, existing in the sediments as the non-residual (exchangeable, carbonate, Fe-Mn oxide and organic fraction) form. Rb and Sr of various forms record different environmental processes and information. It would exert effect on the accuracy of the research result to use Rb/Sr ratios of bulk sediment samples to reflect paleoclimate/paleoenvironment change. Especially in the catchment, where the changes of physical weathering and chemical weathering are inverse, it would cause confusion or even misreading of the result to use Rb/Sr ratios of bulk sediment samples to reflect paleoclimate/paleoenvironment change. However, it can effectively solve these problems and provide comprehensive information on the physical removal and chemical weathering in the catchment to carry out the study of Rb/Sr ratios of different forms of lake sediments: Non-residual Rb/Sr ratios reflect the chemical weathering in the basin, for relatively coarse resolution (10a international) research; and residual Rb/Sr ratios reflect watershed physical removal, for annual or even higher resolution.

Key words: Lake sediments; Rb/Sr ratios; Paleoclimate/paleoenvironment; Chemical weathering; Physical weathering.