

• 专题 18: 地表过程与化学风化 •

长江口锂同位素研究: 从现代过程到钻孔记录

杨承帆¹, Nathalie Vigier², 连尔刚¹, Marie Revel³, 毕磊⁴, 赖正¹, 杨守业^{1*}

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

2. Oceanography Laboratory of Villefranche (LOV), Sorbonne University, 06230 Villefranche-sur-Mer, France;

3. Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur, 250 rue Albert Einstein, 06905 Sophia Antipolis, France;

4. 中国极地研究中心, 上海 200136;

化学风化是地球各圈层相互作用的纽带, 在地表物质循环以及全球气候变化过程中发挥着重要的作用, 大陆风化如何驱动地球系统气候变化以及该过程中的负反馈机制一直是地学研究的前沿热点。近年来, 锂同位素被用来示踪地质历史时期大陆风化过程, 以及研究不同时间尺度上风化与气候间的相互关系, 相关研究借助边缘海或深海沉积记录广泛开展。但是, 在由陆向海运输的过程中, 特别是在河口地区, 溶解态或颗粒态物质所携带的陆源风化信号是否被改变, 以及边缘海沉积记录中化学风化能够及时响应古气候变化都没有得到较好地回答。因此, 本研究选择在长江口地区开展锂同位素研究, 首先对现代过程水体混合过程中溶解态和颗粒态锂同位素行为进行研究, 然后借助钻孔记录探讨边缘海沉积记录能否真实可靠地反演地质历史时期大陆风化过程。

现代过程研究结果显示长江口溶解态锂含量随盐度的增加线性增加, 锂同位素组成也表现出两端元混合的趋势, 表明在河水与海水混合过程中溶解态锂及其同位素行为保守, 及时风化信号 (Li 和 $\delta^7\text{Li}$) 能够没有改变的传递到海洋; 河口地区悬浮物锂同位素地球化学行为除了受到水动力分选效应的影响外, 还

受到颗粒絮凝和再悬浮过程的影响, 随着悬浮物向外海运输, 粘土矿物含量下降, 而细颗粒原生矿物含量升高, 悬浮物锂同位素组成逐渐均一化, 接近上地壳锂同位素平均值, 在边缘海地区利用沉积物全岩锂同位素组成示踪地质历史时期大陆风化过程需要慎重, 相对于水动力分选过程, 絮凝以及再悬浮导致的锂同位素变化难以校正。

长江口 CM97 钻孔沉积物粘土粒级 Nd 同位素研究显示 (2-14) ka 间物源相对稳定, 并未受到原地沉积环境的影响而两千年以来中游流域细粒级沉积物贡献增多; 粘土粒级 Li 同位素组成的变化主要指示长江流域的风化强度变化, 并且几乎不受矿物学分选, 岩性和早期成岩作用的影响。通过对粘土粒级 Li-Nd 同位素及气候指标的对比发现 (图 1), 新仙女木时期, 温度变冷导致中下游流域硅酸盐风化强度变弱, 粘土矿物形成减少, 粘土粒级锂同位素值偏正 ($\sim 1.4\%$); 在 (11-2) ka, 气候波动较为平缓, 较弱的风化强度变化导致了 Li 同位素组成的微弱变化; 在过去的两千年内, 同位素的波动可能更适合用沉积物源的变化来解释, 这可能是由于下中流域人类活动的加剧引起的。总之, 这项研究支持了大型流域的硅酸盐风化对千年时间尺度上水文气候变化的快速响应。

基金项目: 国家自然科学基金和 ANR INTOCC project 批准号: (41991324, 41730531, ANR-15-CE31-0013)

第一作者简介: 杨承帆 (1991-), 博士后, 研究方向: 表生地球化学和源汇沉积过程研究. E-mail: cfyang@tongji.edu.cn

通信作者简介: 杨守业 (1971-), 教授, 研究方向: 东亚大陆边缘物质的源汇体系与环境响应. E-mail: syyang@tongji.edu.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

镁同位素示踪地球表生过程

黄康俊¹, 滕方振², 沈冰³, 马龙¹

1. 大陆动力学国家重点实验室, 陕西省早期生命与环境重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西西安 710069;

2. 华盛顿大学地球与空间科学系, 美国西雅图 98195;

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

地球是太阳系唯一确认有生命的行星。理解地球宜居性的形成与演化, 是探讨人类可持续发展、预测和保护地球未来的关键。地球宜居性研究涉及地球各个层圈相互作用, 迫切需要技术创新。随着多接收等离子体质谱仪测试分析技术的革新, 以 Mg 同位素为代表的金属稳定同位素地球化学已成为国际上地球科学领域最具活力的研究方向。作为主要造岩元素及流体活动性元素, Mg 广泛参与地球表层圈层所涉及的物理、化学和生物作用。通过大陆风化作用、

风尘循环、碳酸盐岩沉积、洋壳蚀变作用, 以及板块俯冲等重要地质过程 Mg 在地球各圈层之间发生迁移循环, 同时影响着全球碳循环并最终控制全球气候变化。因此, Mg 同位素在表生地质过程的独特行为使其成为揭示地球宜居性形成与演化的重要示踪剂。本研究将从全球镁循环与镁同位素体系, 地球主要储库同位素组成, 表生地质过程镁同位素行为, 及镁同位素示踪表生地质过程等几个方面系统介绍, 从全球镁循环这一新的视角理解地球宜居性的形成与演化。

• 专题 18: 地表过程与化学风化 •

Implication of temperature-independent summer monsoon intensity proxy to variations of EASM in NE China over the past 800 kyr

Hai-Zhen Wei^{1*}, Fang Lei²

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, PR China;

2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, PR China

The variations and driving mechanism of the East Asian summer monsoon (EASM) climate have attracted broad scientific attention and numerous paleo-monsoon records from archives (e.g., loess, stalagmites, and marine and lake sediments) have been explored to reveal the variability of the EASM on orbital timescales and its linkage with changes in solar insolation and boundary conditions (e.g., An et al., 1991; Sun et al., 2019).

As boron isotope fractionation during precipitation is dominated by the Rayleigh process, the variation of boron isotope in precipitation ($\delta^{11}\text{B}$) can be interpreted as a consequence of the level resulting from the rainout of air masses after multi-step fractionation processes along the moisture transport path. As a result, $\delta^{11}\text{B}$ of paleo-rainfall ($\delta^{11}\text{B}_{\text{pr}}$) has been proposed to be a robust

proxy of the intensity of the EASM, which takes advantages of being directly correlated with the process of precipitation and is independent of temperature. On the basis of the study of boron isotope geochemistry of the loess-paleosol sequence of the Niuyangzigou section (NYZG) in Northeast (NE) China, a mathematical inversion calculation is used to quantify the proportion of boron accumulation from three distinct sources, and to capture the original $\delta^{11}\text{B}_{\text{pr}}$ signatures. A monsoon record based on $\delta^{11}\text{B}_{\text{pr}}$ shows a significant shift at ca. 430 ka, implying an abrupt weakening of the EASM after the Mid-Brunhes Event (MBE), which provides evidence of regional disparities in monsoon evolution in response to the MBE. Northern Hemisphere ice volume may have been responsible for changes in the EASM in NE China over the past 800 kyr.

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

Mo 同位素在闪长岩风化过程中分馏程度和机制

王志兵^{1*}, 李杰¹, 曾提², 何宏平³, 梁晓亮³, 黄健³,
马金龙¹, 张乐¹, 韦刚健¹

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, 中国 广州 510640;
2. 中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国 广州 510640;
3. 中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 中国 广州 510640

限定陆源输入到海洋 Mo 同位素组成和通量是运用 Mo 同位素反演地质历史时期全球海洋和大气缺氧事件重要的前提。厘清 Mo 同位素在不同类型岩石风化过程中的分馏程度和机制是限定河流输入到海洋中 Mo 同位素通量的主要途径。前人研究表明 Mo 同位素在基性岩风化过程中分馏微弱, 说明了基性岩化学风化有可能不是造成全球河流 Mo 同位素偏重的主要岩石类型。零星工作显示 Mo 同位素在中酸性和酸性岩石中分馏显著, 这暗示着这些岩石类型的风化过程对于推高河流 Mo 同位素特征具有重要的意义。因此, 研究中酸性和酸性岩石风化过程 Mo 同位素分馏程度和机制研究对于陆源输入到海洋 Mo 同位素组成具有重要的意义, 然而, 目前关于这方面的研究工作非常有限。

为此, 我们调查了中国华南地区闪长岩风化剖面(深约 90 米左右)全岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 组成特征, 以探讨 Mo 同位素在中型岩石风化过程中的分馏程度和机制。结果显示, 中国华南地区闪长岩剖面 $\delta^{98}\text{Mo}$ 组成变化很大(0.10‰ ~ -2.25‰), 从基岩到顶部土壤呈现锯齿状波动, 说明了闪长岩风化剖面风化过程中 Mo 同位素发生了明显的分馏。经过初步估算, 相对于基岩($\delta^{98}\text{Mo}$ 值稳定在 -0.40‰ 左右), Mo 同位素分馏程度高达 1.85‰, 这种分馏程度超过了前人对其它岩石类型的报道结果。通过对比铁锰氧化物、矿物组成、以及氧化还原等地球化学参数, 初步得出岩石部分溶解、吸附和解吸附、地下水位变化等过程可能控制闪长岩风化剖面 Mo 同位素的分馏。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

长江上游河流近 60 年溶质输出动态变化和影响机制

李思亮*, 徐森, 钟君, 刘丛强

天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

构造抬升运动形成大量山地系统改变了全球气候和碳循环, 新生代以青藏高原为主的构造活动深刻改变欧亚大陆地表形貌和全球气候格局, 以青藏高原和季风气候为特征的地表过程和流域风化作用成为当今国际大陆风化和气候环境演变研究的热点和前沿。青藏高原对全球气候变化的响应极为敏感, 其发育的众多河流流经我国和东南亚周边许多国家。然而, 许多研究都集中流域风化的空间格局和影响机制, 较长时间序列的青藏高原河流溶质动态变化和流域生物地球化学循环机制却研究较少。

本研究分析了长江源头河流金沙江河口近 60 年来的河流水化学监测数据, 并将其与流域长期的水文气象数据相结合。结果显示金沙江流域内人为活动对河流主要溶解质的贡献可以忽略不计, 尤其是石鼓水文站以上的上游流域, 其在过去 40 年内流域建设用地面积变化较小 (<0.1%)。石鼓和攀枝花水文站之间河段修筑的梯级水库是近十年来金沙江泥沙负

荷急剧下降的主导因素, 但筑坝对金沙江水和溶质的年通量目前来看没有显著的影响。过去十几年来金沙江流域周边地区降水离子浓度较低且呈下降趋势, 因此大气输入也可排除为导致金沙江溶质输出增加的因素。因此, 自 2005 年以来金沙江溶质浓度和通量的大幅增加应当主要是由气候变化所驱动的青藏高原化学风化作用增强导致来自上游的溶质供给增加所致, 另外瞬时溶质浓度增加变化可能也受人为工程等影响。

青藏高原近年来变暖和降水增加的趋势导致了地表物理侵蚀加剧, 促进了风化物质的供给, 水岩反应热力学和动力学过程也发生相应变化, 这些因素有利于增加流域的风化通量。另一方面由于高原湖泊和河流之间的水文连通性增强, 会增加蒸发盐的快速溶解, 同时矿物质含量较高的咸水湖湖水向河流会增加流入量。本研究结果表明与青藏高原人为因素影响相比, 气候变化与下游河流水质变化更加密切, 并将最终影响流域环境和生物地球化学循环。

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0707); 天津市杰出青年科学基金 (18JCJJC46200); 国家杰出青年科学基金 (41925002)

第一作者/通信作者简介: 李思亮 (1978-), 教授, 研究方向: 流域生物地球化学循环与生态环境效应研究. E-mail: siliang.li@tju.edu.cn

• 专题 18: 地表过程与化学风化 •

Bidirectional growth of the Altyn Tagh Fault since the Early Oligocene

颜茂都¹, 栗兵帅²

1. 中国科学院青藏高原研究所;
2. 东华理工大学地球科学学院

The Cenozoic evolution of the Altyn Tagh Fault (ATF) is still under debate. Here, we present new paleomagnetic rotation evidence on curvatures south of the ATF in the northeastern Tibetan Plateau to shed new light on this issue. A total of 498 core samples representing 53 sites and 6 time intervals (a-f) were collected from the postOligocene sequence at the Heishiqiu locality that in the junction of the northwestern and middle of the reverse Stype northern Qaidam marginal thrust belt. Rock magnetic analysis indicated that the main magnetic carriers were hematite and magnetite. After detailed thermal demagnetization analyses, the characteristic remanent magnetizations of 48 sites (387 samples), which exhibited dual polarities and passed a regional fold

test, are most likely the primary magnetizations. Two periods of remarkable rotations are identified at Heishiqiu: a clockwise rotation of $\sim 16.0 \pm 10.3^\circ$ during $\sim 27\sim 17$ Ma and a subsequent counterclockwise rotation of $\sim 24.3 \pm 14.5^\circ$ during $\sim 17\sim 10$ Ma. The rotations were attributed to two periods of strike-slip faulting along the ATF during the Early Oligocene to Late Miocene, yielding at least (290~380) km of offset at Heishiqiu. The integrated lines of paleomagnetic and geological evidence suggest that the deformation along the ATF has propagated both southwestward and northeastward from Heishiqiu in the middle ATF since the Early Oligocene. We propose a bidirectional growth model for the ATF that might be applicable to the evolution of the Tibetan Plateau.

• 专题 18: 地表过程与化学风化 •

青藏高原隆升、大陆风化与全球变化： 来自高原东北部的启示

杨一博^{*}，方小敏

中国科学院青藏高原研究所，北京 100101

新生代青藏高原隆升产生了巨大的环境效应，不仅影响了亚洲季风-干旱气候格局形成和演化，还通过大陆风化过程影响了全球气候变化。青藏高原东北部保存有最完整的隆升-剥蚀-风化-环境记录，年代可以连续追溯到五千多万年前，为系统揭示高原隆升、剥蚀风化与全球变化的关系提供了绝佳机会。本研究

以青藏高原东北部盆地多条精确年代控制的新生代沉积序列为基础，系统开展“风化剥蚀-季风和干旱化-全球变化”的关联性研究，建立了高原东北部五千多万年以来大陆化学风化强度历史并揭示其驱动机理；揭示了青藏高原隆升驱动亚洲季风-干旱环境的耦合演化及其与新生代全球变化的新联系。

基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0707）

第一作者简介：杨一博（1985-），副研究员，研究方向：青藏高原隆升的环境效应。E-mail: yangyibo@itpcas.ac.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

柴北缘超高压变质带高放射性 Sr 同位素热液系统的发现及其对物源示踪和海洋 Sr 同位素演化的意义

刘玉东¹, 杨一博¹, 宋博文², Albert Galy³, 张飞⁴,
金章东⁴, 张贵宾⁵, 叶程程¹, 方小敏¹

1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101;

2. 中国地质大学地质调查研究院, 武汉 430074;

3. Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques CNRS, Nancy 54500;

4. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075;

5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

热液系统作为造山带演化的普遍特征, 通过热泉和地下水的直接输入以及热液成因方解石的化学风化深刻影响了河流水体的 Sr 通量和 Sr 同位素组成。受印度-欧亚板块碰撞驱动的变质作用的影响, 喜马拉雅地区的热泉和热液方解石具有与变质作用相关的高放射性 Sr 特征。这些变质作用为河流和地下水提供了大量的放射性 Sr, 影响了新生代全球海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的演化。青藏高原及周边地区水体 Sr 同位素汇总结果显示, 祁连-柴北缘地区高于周边地区, 是整个青藏高原仅次于喜马拉雅地区的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 区域。祁连-柴北缘地区热泉和围岩稀醋酸淋滤液的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.757~0.734)以及其他同位素示踪结果

表明, 祁连-柴北缘地区存在与喜马拉雅地区相似的热液系统。物质平衡计算表明, 变质作用驱动的热液系统在向河流和湖泊输送放射性 Sr 方面发挥了关键作用, 造成了祁连山地区地表水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高于周边地区。由于该变质热液系统的存在, 祁连地区作为重要的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 物源区, 使得存储在过去沉积序列中的放射性成因溶解 Sr 信号可以作为一个有效指标来揭示祁连山剥露物质的源汇过程。同时, 早古生代祁连造山带的重新活化显著影响了区域水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 表明大陆俯冲/碰撞形成的经历强变质作用的古老造山带的重新活化对过去的海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 演化具有重要的调节作用。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

中国西北沙尘期间 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征及来源解析

马艳^{1,2}, 肖红伟^{1,3*}, 肖扬宁^{1,3}, 李智滔^{1,3}

1. 东华理工大学 江西省大气污染成因与控制重点实验室, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013;

3. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013

2021 年 3 月, 我国北方遭遇近十年最强沙尘天气, 其影响范围也是近十年最广。沙尘天气多发于干旱半干旱地区, 强沙尘会导致沙尘源区表层土壤和生产力的损失, 并损害人类健康以及农业发展。特别是细颗粒物 PM_{2.5}, 由于其粒径较小, 能持续在大气环境中停留数周, 并通过大气环流进一步运输, 相对而言对环境及人类健康影响更大。目前, 我国对西北以煤炭开发为主的干旱半干旱城市 PM_{2.5} 颗粒的化学成分分析研究及输送路径解析较少。故为更好的了解沙尘天气对人类生活及环境的影响, 需要确定 PM_{2.5} 中主要组分及来源解析。

为探讨中国西北沙尘期间 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征及来源, 测定了 2021 年沙尘期(3 月)宁夏中卫市 PM_{2.5} 水溶性离子浓度(WSIs)。结果显示: 采样期间

总 WSIs 浓度为 (35.4±18.9) μg/m³, 其中 SO₄²⁻、Ca²⁺、Na⁺、NH₄⁺ 是中卫市三月 PM_{2.5} 中主要的四种离子, 占到总水溶性离子的 79.7%。而对比沙尘期和非沙尘期 WSIs 浓度有显著差异, 总离子浓度分别为 (45.8±18.1) μg/m³ 和 (29.7±12.8) μg/m³, 四种主要离子占比分别为 81.8% 和 77.9%。通过相关性分析得出, 中卫市 3 月 PM_{2.5} 中水溶性离子主要以一次来源为主。三向聚类分析表明, 人为源离子[NH₄⁺+SO₄²⁻+NO₃⁻]的比例整体趋势为非沙尘期(0.38~0.64)略高于沙尘期(0.28~0.51), 而自然源离子[Na⁺+Mg²⁺+Ca²⁺]的比例整体趋势则为沙尘期(0.34~0.60)略高于非沙尘期(0.23~0.52)。后向轨迹分析表明, 中卫市离子来源主要受蒙古国、内蒙古高原、新疆北部、河西走廊、青海省北部及其周边城市的强烈影响。

基金项目: 国家自然科学基金 (No.42063001, 41663003)

第一作者简介: 马艳 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 大气地球化学研究. E-mail: 1916521788@qq.com

通信作者简介: 肖红伟, E-mail: xiaohw@ccit.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

柴达木盆地早新生代化学风化强度持续降低： 来自粘土矿物地球化学指标的证据

叶程程^{1*}, 杨一博¹, 方小敏^{1,2}, 张伟林¹, 郭增光^{1,2}, 刘玉东^{1,2}

1. 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升实验室, 北京, 100101;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049

硅酸盐化学风化是涉及岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的重要过程, 是构造尺度上调节大气 CO₂ 含量维持碳循环平衡的主要过程。对硅酸盐化学风化的深入了解不仅有助于全球气候演变的研究, 同时也可以极大地推动地球大陆动力学和表生地球化学的发展。由于硅酸盐化学风化包含了易溶盐离子(如 Ca²⁺、Na⁺)的淋失和次级风化物(如粘土矿物)的形成, 因而粘土矿物和元素地球化学特征被认为是研究化学风化的最有效指标。此外, 粘土矿物和元素地球化学指标的综合集成结果可有效地将气候驱动的风化作用从众多干扰因素中识别出来, 是深入了解区域风化过程的重要方法。然而, 在青藏高原东北部的一些新生代沉积盆地, 长尺度的沉积序列往往具有粒径粗和相变频繁的特点, 从而限制了基于全岩的地球化学指标的应用。考虑到粘土矿物是母岩风化的直接产物, 且受粒径和沉积相的变化影响较小, 因而其化学组成是从地球化学角度重建区域化学风化历史的理想选择。

在本研究中, 我们对柴达木盆地红柳沟剖面早新生代地层(路乐河组、下干柴沟组和上干柴沟组)中的粘土矿物进行了详细的元素地球化学研究, 在评估了物源、成岩作用及沉积再循环等因素的影响后, 利用元素风化指标重建了区域的(54-26) Ma 期间的化学风化历史。结果表明柴达木盆地早始新世气候最适宜期的化学风化最强; 在随后的约 50~34 Ma 区域化学风化经历了持续的减弱过程, 并在约 34~26 Ma 降至最低。上述基于元素风化指标重建的区域化学风化历史与粘土矿物组合及伊利石化学指数相一致, 从而证明了结果的可靠性。全球变冷被认为是柴达木盆地(54~26) Ma 期间化学风化的主控因素: 全球变冷一方面通过降低温度减缓化学风化速率; 另一方面全球变冷也通过调控水汽源区蒸发量和西风强度使得区域降水量减少, 由此进一步导致风化强度降低。相较而言, 特提斯海退则在一定程度上调控了短尺度区域化学风化的波动。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

雅鲁藏布江流域锂同位素组成控制因素：来源与过程

张俊文^{1,2}, 赵志琦^{1*}, 闫雅妮¹, 刘丛强²

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054;

2. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

探讨河流体系中 Li 的通量及其同位素组成对海水 Li 同位素组成演化和大陆风化过程研究有重要意义。本研究对青藏高原雅鲁藏布江(雅江)流域进行了全面系统的河水样品采集,包括雨季前后全流域样品、干流定点时间序列样品和部分热泉样品,分析了其 Li 含量及其同位素组成。结果表明,河水中溶解态 Li 的浓度整体较高(平均值 59.4 $\mu\text{g/L}$, $n=102$),其 $\delta^7\text{Li}$ 值整体较低(平均值+6.4%, $n=101$);雨季前,干流 $\delta^7\text{Li}$ 值自上游到下游无显著变化,而雨季后,干流 $\delta^7\text{Li}$ 值沿流向略有升高趋势;全年时间序列样

品结果为,7月和8月的 $\delta^7\text{Li}$ 值明显升高,而其它月份的值相对较低且比较稳定。分析表明,雅江流域上游广泛分布的地热系统和热泉富集 Li 是河水 Li 浓度异常高的主要原因;由于热泉具有较低的 $\delta^7\text{Li}$ 值,导致河水中的 $\delta^7\text{Li}$ 值整体偏低;而 Li 进入河水后在固液两相再次分配过程会促进河水 $\delta^7\text{Li}$ 值升高,其中不同季节河水中悬浮物的含量是其主要控制因素。本研究表明雅江流域中的 Li 同位素组成主要受到 Li 来源和运移过程的影响,而硅酸盐风化过程对其影响较小。

基金项目: 多同位素示踪雅鲁藏布江(布拉马普特拉河)流域水质变化及其受控机理(41661144042)

第一作者简介: 张俊文(1989-), 讲师, 研究方向: 非传统稳定同位素地球化学研究. E-mail: zhangjunwen@chd.edu.cn

通信作者简介: 赵志琦(1971-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学研究. E-mail: zhaozhiqi@chd.edu.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

黄土-古土壤序列铜同位素组成、分馏机制 及其对平均上陆壳成分的制约研究

明国栋, 黄方*

中国科学技术大学地球和空间科学学院金属稳定同位素地球化学实验室, 合肥 230026

黄土-古土壤序列是重建全球变化的重要载体之一(刘东生, 2009)。黄土沉积后的后生风化过程会潜在地改变黄土的初始矿物组成和地球化学信号, 给黄土一些地球化学代用指标的解释带来不确定性。非传统稳定同位素在元素地球化学循环中发生显著的分馏, 因此可以用来示踪物质循环过程。目前针对黄土非传统稳定同位素的研究正方兴未艾, 仍有大量工作有待开展(韦刚健等, 2021; He M.Y.等, 2021)。前人研究表明铜(Cu)在土壤形成过程中会产生较大分馏, 是一个灵敏的地球化学示踪剂(王泽洲等, 2015), 而黄土后生风化过程中 Cu 同位素的分馏行为尚缺少系统地研究。此外, 黄土也是制约上陆壳平均物质组成的重要手段(Teng F.Z.等, 2004)。Li W.Q.等(2009)基于少数样本对延安和宜川地区黄土的 Cu 同位素组成进行过测量, 但 Li W.Q.等(2009)未考虑黄土后生作用对黄土物质组成的影响, 且较少的样本量可能低估了黄土 Cu 同位素组成的变化范围(Bigalke M.等, 2010b), 因此有必要补充有更广泛代表性的样本量对黄土的平均 Cu 同位素组成进行更精细地约束。

本研究基于 4 个位于中国西北的典型黄土-古土

壤序列进行 Cu 同位素组成和分馏机理研究(1.渭南剖面; 2.驿马关剖面; 3.塬堡剖面; 4.新疆阿羌剖面), 目的是:(1)更加精细地制约上陆壳平均物质的 Cu 同位素组成; 同时, 选择后生风化过程较为强烈的渭南剖面, 设计土壤分相提取实验, 获得不同形态 Cu 及其同位素组成变化, 以:(2)示踪黄土的后生风化成壤过程, 探究弱/中等风化条件下黄土 Cu 同位素的分馏机理。

本研究结果表明, 考虑 0.05 % 的外部误差, 黄土全岩 Cu 同位素组成显示出较为显著的分馏, 特别是渭南剖面在 L2 黄土层和 S1 古土壤层分馏可达 0.27 %, 且同磁化率指标表现出较强的相关关系。针对土壤样品的分相提取实验进一步表明, 黄土后生风化过程中的碳酸盐淋溶与再沉积效应对全岩 Cu 同位素组成起到主导影响, 因此全岩同位素组成不宜用来制约上陆壳平均组成。本项目在土壤分相提取实验的基础上, 发现黄土-古土壤序列酸不溶物的组成均一, $\delta^{65}\text{Cu}$ 平均值约 $(0.05 \pm 0.04) \%$ (NIST976), 可有效校正黄土后生风化过程的影响, 更精细地制约上陆壳平均物质 Cu 同位素组成。

表 1 渭南黄土-古土壤序列典型样品磁化率、碳酸盐含量和全岩 Cu 同位素初步测量结果

样品编号	深度/m	地层	磁化率 / $(10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$	碳酸盐 含量/%	$\delta^{65}\text{Cu}$ (%, NIST976)	2SD
WN19-0	0	S0	145.51	5.76	0.01	0.02
WN19-200	2	L1-1	90.20	15.01	0.06	0.01
WN19-600	6	L1-2	172.68	11.17	0.04	0.02
WN19-1000	10	L1-3	85.42	23.22	-0.02	0.03
WN19-1300	13	S1	191.39	0.55	0.22	0.03
WN19-1400	14	L2	60.56	2.49	-0.05	0.04

基金项目: 国家自然科学基金委青年科学基金项目 华南典型砖红壤风化剖面 Si 和 U 同位素组成及其分馏机制研究(42103051)

第一作者简介: 明国栋(1994-), 博士后, 研究方向: 非传统稳定同位素地球化学, 第四纪地质学. E-mail: minggd@ustc.edu.cn

通信作者简介: 黄方(1978-), 教授, 研究方向: 非传统稳定同位素地球化学. E-mail: fhuang@ustc.edu.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

Ca²⁺对西南喀斯特区石灰土有机质迁移与变化的影响

肖佩文^{1,2}, 肖保华^{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, 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

土壤是全球碳循环中重要的源和汇, 土壤碳库的变化直接影响生态系统的碳储量和释放。了解土壤碳库演变的一个基本问题是生态环境变化下土壤有机碳(SOC)的稳定性, 但目前影响喀斯特地区石灰土土壤固碳能力的因素尚不清楚, 需要进一步研究。其中, 溶解性有机质(DOM)作为土壤活性碳库中的重要组成部分, 是土壤和水环境中营养物质、有机污染物和重金属的来源和载体, 因此正确理解土壤中 DOM 的迁移演化过程对农业发展和污染防治都具有重要意义。然而喀斯特地区高钙环境下石灰土中溶解性有机质(DOM)迁移转化的研究鲜有报道, 缺乏定量数据。以往的研究表明, Ca²⁺在控制石灰土壤中有机质的形成和保持方面起着重要的作用, 但 Ca²⁺浓度对土壤-水系统中 DOM 迁移转化的影响还尚不明确。

本研究以我国西南喀斯特地区内的 2 个石灰岩土壤剖面为研究对象, 对剖面上的 2 个表层土壤(H1, S2)和 2 个下层土壤(H2, S2)进行了土柱淋洗实验, 研究了四种石灰土在四种 Ca²⁺浓度水平(0, 0.05 mmol/L, 0.5 mmol/L 和 2.5 mmol/L)下 DOM 淋溶的动态过程, 并结合不同的测试手段, 分析了淋出液中的 DOC 和和光谱学数据, 得到了土壤的 DOM 淋出的动态变化数据。

结果表明, DOM 的动态浸出过程可分为两个阶段: 1) 初期 DOM 快速淋出阶段, 此阶段伴随着大量的 DOM 释放。2) 当淋洗到水土比约为 2:1 时, DOM 的释放变稳定。淋洗初期, H1 有最大的瞬时

DOC 洗出值, 为(875.2~1047.4) mg/L; H2 及 S1 次之, 分别为(311.4~386.3) mg/L 与(436.5~536.6) mg/L; S2 最低, 为(97.4~125.8) mg/L。淋洗后期石灰土的有机质洗出量趋于平缓, 保持在(20~45) mg/L 左右。DOM 的动态浸出过程可以用 Elovich 方程较好的描述, R² 值为 0.95~0.99。淋出液的 SUVA₂₅₄ 和 S_R 值的变化表明, 淋出有机质的芳化度和分子量都在逐渐上升。

当淋洗液的 Ca²⁺浓度从 0 增加到 2.5 mmol/L, H1, H2, S1 和 S2 的土壤溶解性有机碳(DOC)损失率分别从 66.3%; 76.2%; 73.0%; 52.5% 下降到 58.8%; 72.4%; 68.8%; 46.6%, 并且淋出液的 SUVA₂₅₄ 值和 S_R 值都会下降, 这表明高 Ca²⁺环境下洗出的 DOM 的分子量会更大, 并且有较低的芳香性。三维荧光光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC)的结果表明, 当淋洗液的 Ca²⁺浓度升高时, 淋出液中腐殖酸类荧光组分的占比会下降, 而氨基酸类荧光组分的占比会上升。这表明 Ca²⁺有控制土壤 DOM 释放的能力, 并且这种控制效果会随着淋洗液中 Ca²⁺浓度的上升而加强, 这应该跟 Ca²⁺在水-土壤环境中的桥键作用有关。结果说明高 Ca²⁺径流可在淋溶过程中使石灰土富集高芳香性、高分子量的土壤有机质(SOM), 这会影响到土壤中的微生物活性, 进而影响到土壤中有机碳的矿化速率, 值得进一步的探讨。该研究有助于理解石灰土壤中 SOM 的迁移和演化, 为增加岩溶地区的土壤碳汇提供理论支持。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1612441, U1701241, 41773147)

第一作者简介: 肖佩文(1995-), 博士研究生, 研究方向: 从事土壤环境科学研究. E-mail: xiaopeiwen@mail.gyig.ac.cn

通信作者简介: 肖保华(1970-), 研究员, 从事环境科学研究. E-mail: xiaobaohua@vip.skleg.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

青藏高原北部新生代中期野火历史及其驱动因素初探

苗运法¹, 常宏²

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000;
2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

广袤分布的植被、干燥的季节性气候、富氧的空气以及高频的闪电和常见的火山活动是地球表面野火(火灾)发生的重要因素,其最早出现可以追溯到 400 Ma 之前。反过来,持续不断的野火又对上述诸多因子产生了持久反馈,有效促进了地球系统的演化并为最终人类进化和发展提供了非常有利的条件。因此,研究不同时间尺度的野火历史并探讨驱动机制对认识地球表面各要素之间关系具有十分重要的参考价值。由于地球系统复杂,选取不同空间位置上的沉积记录进行解剖分析是常用的方法之一。例如,在青藏高原北部柴达木盆地西部 KC-1 孔沉积记录揭示出 18 Ma 以来亚洲内陆地区野火的逐步增强,并与该地区荒漠植被的持续增多揭示的降水持续减少直接相关。本研究仍以柴达木盆地为

研究对象,利用西部地区 HTG 剖面更早期的沉积序列重建该地区的野火历史。结果表明,渐新世至中新世早期(~30~20) Ma 野火较多,之后野火开始明显减少直至~12 Ma,并在~13 Ma 出现短暂波动。这一记录与该地区 KC-1 孔的记录高度耦合,并能够很好的利用全球温度变化引起降水多寡来进行理解,即较高的温度能够驱动海洋表面更多的水汽进入大气环流系统,然后进入亚洲内陆并形成降水的概率增加;反之则相反。此外,青藏高原不同位置的隆升引起地形变化可能影响了降水的区域分配,进而影响野火演化。综上,利用沉积序列开展野火研究,能够为认识古气候和古生态变化及其驱动机制提供非常重要的证据,特别是在孢粉等直观的代用指标资料缺乏时尤显宝贵。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

岷江河水锂同位素季节性变化及其控制因素

刘陆柏洋^{1,2}, 金章东^{1*}

1. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪国家重点实验室, 西安 710061;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

硅酸盐岩风化能够通过消耗 CO_2 而影响长时间尺度气候变化, 而“构造抬升驱动气候变化”假说提出新生代以来的大陆构造抬升加强了硅酸盐岩风化速率和 CO_2 消耗速率, 从而引起全球气候变冷。然而, 如何示踪、量化硅酸盐岩风化及其对气候造成的影响是一个备受关注的、悬而未决的科学问题。锂同位素因其化学活泼、 ^6Li 和 ^7Li 之间较大的质量差、以及单一化合价与不受生物作用影响等性质, 成为硅酸盐岩地表风化过程的良好示踪剂。关于锂同位素示踪大陆风化的研究已在多方面展开, 如流域溶解态和颗粒态锂同位素变化特征、风化及沉积再旋回、及沉积岩芯古气候重建等, 但其分馏机制及示踪应用等方面的研究仍存在争论, 乃至相反的观点。本研究选取青藏高原东缘的岷江上游作为研究区域, 该流域河水承载了构造活跃区风化剥蚀搬运的物质, 其水化学和锂同位素良好记录了高原构造活跃区的风化过程, 旨

在通过观察河水溶解锂同位素组成的季节性变化, 以探究其背后的影响因素和分馏机制。

结果发现, 河水溶解锂同位素对印度和东亚季风造成的季节性气候变化有着非常敏感的反应。首先, 河水 $\delta^7\text{Li}$ 在雨季前、雨季和雨季后有着明显差异: (1) 雨季前和雨季后 $\delta^7\text{Li}$ 值较雨季中稳定, 即雨季后 $\delta^7\text{Li}$ 整体高于雨季前, 且变化剧烈; (2) 雨季中 $\delta^7\text{Li}$ 范围跨度大, 波动大, 明显受到水文条件的制约和影响。其中, 水文条件对锂同位素的影响表现为 (1) 强降雨引起的径流增加使河水溶解锂通量增加、 $\delta^7\text{Li}$ 降低; (2) 非强降雨时期的径流增加能够使河水溶解锂通量减少、 $\delta^7\text{Li}$ 增高。我们由此提出, 水-岩接触时长及反应程度、不同季节不同端元组分的贡献占比变化, 以及二次矿物沉淀与溶解行为, 皆可能是造成上述变化的控制因素, 但仍需进一步验证。

基金项目: 2019QZKK0707 (41991322)

第一作者简介: 刘陆柏洋 (1994-), 硕士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. E-mail: liuyang@ieecas.cn

通信作者简介: 金章东 (1971-), 研究员, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者 (2012 年), 2014 年入选科技部中青年科技创新领军人才, 2016 年入选国家“万人计划”领军人才。现任黄土与第四纪地质国家重点实验室主任, 兼任西安交通大学及全球环境变化研究院教授、《International Journal of Geosciences》和《湖泊科学》编委。研究方向为陆地表生地球化学过程, 特别是高原周边盆地沉积物记录的流域化学风化过程及其对青藏高原隆升和季风气候的响应机制、不同气候区高分辨率受气候制约的化学风化序列、流域物质输移及碳循环等

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

基岩风化速率对关键带近地表结构变化的敏感性研究

文航^{1*}, Pamela L. Sullivan², Sharon A. Billings³, Hoori Ajami⁴, Alejandro Cueva⁵,
Flores Alejandro⁶, Daniel Hirmas⁴, Aaron N. Koop⁷,
Katie Murenbeeld⁶, Xi Zhang², Li Li⁸

1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300000;

2. College of Earth, Ocean, and Atmospheric Science, Oregon State University, OR, USA;

3. Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of Kansas, Lawrence, KS, USA;

4. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, CA, USA;

5. School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, AZ, USA;

6. Department of Geosciences, Boise State University, Boise, ID, USA;

7. Department of Geography and Atmospheric Science, University of Kansas, Lawrence, KS, USA;

8. Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, State College, PA, USA

我们通常认为基岩构造直接控制风化层结构及其水力、生物地球化学特性。近期越来越多研究表明,人类活动对地球系统中的水、碳和养分循环都有着不可忽视的影响。然而,随着人类活动的不断加剧,关键带近地表结构变化(如植被根系分布变化所引起的土壤孔隙网络改变)在多大程度上影响基岩风化速率仍然不清楚。本研究通过结合美国堪萨斯州两个流域的野外观测数据和基于过程的多尺度反应传输模型来探究这个问题。所选取的流域包括受灌木入侵的 Konza 草原和由具有较强收缩膨胀能力土壤所覆盖的 Fitch 森林。基于 Konza 站点的研究发现,相较于

草地,灌木入侵会增加矿物风化速率 2 倍以上,且在 300 年内可将风化层的孔隙度和渗透率提高一个数量级。在 Fitch 站点,土壤结构和水文数据显示该地区近地表层渗透率以及降雨渗透深度对气候变化较为敏感。模型结果则表明,山坡尺度上的近地表层渗透率变化虽然会改变地下水侧向流动路径,但对矿物风化速率的影响可忽略不计。对比以上两个站点的研究,虽然结果似乎是矛盾的,但这也说明风化速率对近地表结构变化的敏感性会随区域和尺度变化而发生改变。本研究推测,地下系统中生物过程的垂向变化可能是造成这种差异的主要原因之一。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

玉龙雪山 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成特征

肖扬宁^{1,2}, 肖红伟^{1,2}, 马艳³, 李智滔^{1,2}, 冷泉⁴, 金学武⁴

1. 东华理工大学 江西省大气污染成因与控制重点实验室, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 水资源与环境 工程学院, 南昌 330013;

3. 东华理工大学 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013;

4. 玉龙雪山省级自然保护区管护局, 云南丽江 674199

大气气溶胶对空气质量、降雨、能见度的关键过程造成影响, 且可能导致气候变化。大气气溶胶主要来源是化石燃料, 机动车排放, 生物质燃烧以及自然来源等。大气气溶胶中的 PM_{2.5} 能进入人体血液和肺泡, 对人体造成严重威胁。总碳 (TC) 是 PM_{2.5} 的重要组成部分, 其成分复杂, 主要包括有机碳, 元素碳等物质。TC 浓度存在季节性变化, 一般是冬季较高, 夏季较低, 在南昌地区, 冬季由于温度较低, 供暖所需燃煤能源增加, 导致污染物增加。而在夏季时, 由于降水较多, 雨水会对污染物存在明显的冲刷作用。

本研究于 2020 年 4 月至 2020 年 8 月期间在玉龙雪山云杉坪处 (100°14'25.77"E, 27°8'10.85"N) 共采集 44 个 PM_{2.5} 样品, 分析了 PM_{2.5} 样品中总碳 (TC) 浓度及其稳定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$)。结果表明, 采样期间 TC 的平均浓度为 4.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。TC 浓度的季节分别明显, 春季、夏季 TC 的平均浓度分别为 7.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、

2.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 呈现春季高、夏季低的变化趋势。可能原因是玉龙雪山的春季为旱季, 日照充足, 降水较少, 主要受到西风环流南支和青藏高原季风影响。且春季是东南亚地区森林大火的高发期, 根据后向轨迹分析, 由森林大火引起的生物质燃烧通过气团传输可能导致了玉龙雪山的 TC 浓度增高。夏季, 主要受到西南和东南季风影响, 降水充沛。雨水一方面抑制了森林大火, 另一方面冲刷了大气中的污染物, 导致夏季 TC 浓度显著降低。 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 $-24.9\text{‰}\pm 1.0\text{‰}$, 春季、夏季的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别为 $-24.0\text{‰}\pm 1.2\text{‰}$ 、 $-25.3\text{‰}\pm 0.6\text{‰}$, 春季较夏季偏正, 说明春季和夏季存在不同的来源的共同影响。利用贝叶斯模型计算玉龙雪山春季 PM_{2.5} 中 TC 来源于 C₃ 植物、煤燃烧、机动车排放和 C₄ 植物, 贡献分别为 53.9%、23.5%、15.9% 和 6.7%; 夏季来源于 C₃ 植物、机动车排放、煤燃烧和 C₄ 植物, 贡献比分别为: 60.8%、24.7%、12.1% 和 2.4%。

第一作者简介: 肖扬宁 (1997-), 硕士研究生, 研究方向: 大气地球化学研究. E-mail: ynshawn@126.com.

*通信作者简介: 肖红伟 (1984-), 特聘教授, 研究方向: 大气与海洋同位素地球化学. E-mail: xiaohw@ecit.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

Sr-Nd 同位素联合制约热带火山岛与土壤的沙尘沉降

郭继业^{1,2*}, PEREYRA Yvette², MA Lin^{2*}, GAILLARDET Jerome³,
SAK Peter⁴, GILL Tom²

1. 中国科学技术大学 壳幔物质与环境国家重点实验室, 合肥, 230026;

2. Department of Geological Sciences, University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968, USA;

3. Institut de Physique du Globe de Paris, France;

4. Department of Earth Sciences, Dickinson College, Carlisle, PA 17013, USA

土壤中的元素迁移和土壤的形成演化密切相关,也和地质,环境条件,动植物以及人类活动紧密相连。热带火山岛屿因为其强降水,强化学风化的特性,土壤中内源性 Ca, K, Mg, P 等营养元素大量流失。因此,外源性沙尘沉降输送的营养元素对于类似环境的生物圈演化和农业生产关键的作用。尽管撒哈拉沙漠沙尘对于大西洋,小安德烈斯群岛以及南北美洲东岸的输送过程已经被充分讨论,但沙尘具体对于土壤剖面的贡献尚有待研究。对于风化火山质基岩和外源性沙尘两个端元, Sr-Nd 同位素均具有显著不同的同位素比值。因此, Sr-Nd 同位素联合制约瓜德罗普岛上三个不同年降水量条件下的土壤剖面的沙尘贡献,并研究沙尘沉降模式与元素在土壤间的迁移机制成为可能。

我们的工作发现,对于三个剖面, Sr-Nd 同位素在土壤的不同深度均具有显著变化。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值随深度提高逐渐降低 (0.7168~0.7046), ϵ_{Nd} 比值整体随深度提高逐渐提高 (-9.27 到+4.35), 均符合大气沉降-基岩风化混合的预期。尽管三个剖面指示强烈沙尘沉积的最高/低同位素比值不同,体现沙尘最大贡

献差异和湿沉降相对于沉降更重要的作用,但其极值均在约 4 m 深度出现,体现出沙尘影响的广泛性以及 Sr-Nd 元素在强烈风化条件下的向下迁移。Sr 同位素的分步淋取实验表明可交换态、酸溶态的 Sr 仅仅在表层较多 (达 50%) 并具有类似海水 0.709 的特征,体现降水的影响。残留态的 Sr 占比随深度逐渐提高且分别体现沙尘,基岩的同位素特征。基于 Sr-Nd 同位素的混合模型,我们计算出沙尘对于 Nd 同位素的贡献可达 0% (深部)~约 85% (地表),且在把元素向下迁移情况纳入考量下越接近表层沙尘贡献越多。基于 Nd 元素的沙尘贡献,我们也可得出重要营养元素如 P 的沙尘来源贡献占据热带火山岛屿表层土壤的绝大部分。

综上所述,我们的主要结论是:(1)湿沉降是瓜德罗普岛主要的沙尘对土壤沉降模式。(2)土壤中的 Sr-Nd 同位素主要受到外源性沙尘和基岩风化的影响,且在考虑 Sr 流失的情况下,符合二端元混合模型。(3)沙尘对于表层土壤的 Nd 以及 P 等营养元素贡献占据主导地位。

第一作者简介:郭继业,博士后,研究方向:表生同位素地球化学. E-mail: guojiye@ustc.edu.cn.

*通信作者简介:Ma Lin, Assistant Professor, E-mail: lma@utep.edu.

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

贵州高原晚新生代隆升历史——喀斯特洞穴和阶地沉积物 宇生核素年代学制约

刘彧^{1,2}, 王世杰^{1,2}, 徐胜³, 张信宝⁴, 罗维均^{1,2*}

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, 贵阳 550081;

2. 中国科学院 普定喀斯特生态系统研究站, 普定 562100;

3. 天津大学 地表系统科学研究院, 天津 300071;

4. 中国科学院 山地灾害与环境研究所, 成都 610041

贵州高原地处青藏高原东南缘, 是中国大陆“西高东低”地理格局的重要过渡区段, 也是中国乃至世界碳酸盐岩集中分布区。由于新生代沉积分布零星、不连续, 至今对贵州高原新生代地质、地貌演化历史研究十分薄弱。贵州喀斯特地区的河谷发育有多层洞穴, 记录了河流下切历史, 是研究高原抬升的宝贵资料。本研究对黔西北六冲河和黔南荔波层状洞穴中碎屑沉积物进行了宇生核素 $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ 埋藏测年, 以揭示河流的下切历史和估算地体抬升速率。黔西北六冲河层状洞穴和阶地埋藏年龄范围为 $(0.41 \pm 0.12) \text{Ma}$

至 $(2.85 \pm 0.21) \text{Ma}$, 河流下切速率为 $(57 \pm 3) \text{m/Ma}$ 。黔南荔波洞穴沉积物埋藏年龄范围为 $(0.56 \pm 0.16) \text{Ma}$ 至 $3.54 (+0.25/-0.22) \text{Ma}$, 河流下切速率略低于黔西北 $(47 \pm 5) \text{m/Ma}$ 。黔西北与黔南洞穴高程和年龄有较好对应关系 (表 1), 反映四期成洞期分别为 2.8-3.5 Ma、1.25 Ma、0.75~1.06 Ma 和 0.4~0.6 Ma。两地相近的地体抬升速率表明, 晚新生代以来, 贵州两个重要地貌过渡区的地表抬升只有几百米、在区域尺度上大体一致, 并且贵州西高东低的高原地貌于晚上新世前已经形成。

表 1 贵州高原西北部和南部地区河流下切历史

黔西北 (六冲河流域)				黔南 (荔波)				
层序	拔河高度/m	阶地	洞穴	$^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ 年龄/Ma	层序	拔河高度/m	洞穴	$^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ 年龄/Ma
A	350		硝洞		A'	455	干哑洞	
B	220		神仙洞	1.46 (+1.32/-0.80)	B'	360	别多洞	
C	145		大岩洞	2.85±0.21 (砾石) 2.44 (+0.23/-0.21) (砂)	C'	162 150	衙门洞 九洞天洞	3.54 (+0.25/-0.22)
D	81		杉树洞	1.25 (+0.17/-0.14)	D'	85	DGC	1.23±0.44
E	50		大石洞	0.75±0.10 (砾石) 0.69±0.10 (砂)	E'	43	BC	1.06±0.23
	58		岩头沟洞	0.49±0.13				
F	15	T2		0.41±0.12	F'	10	DMC	0.56±0.16
G	5	T1		0.01				

基金项目: 中国科学院战略先导研究计划 (XDB40020300), 国家自然科学基金 (41473055, 41401009)

第一作者简介: 刘彧 (1985-), 副研究员, 研究方向: 第四纪地质与地貌, 宇生核素地质年代学. E-mail: liuyu@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 罗维均 (1978-), 研究员, 研究方向: 环境地球化学. E-mail: luoweijun@mail.gyig.ac.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

化学风化强度对陆架沉积物钾-镁同位素组成的影响

穆军, 李伟强*

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

硅酸盐风化速率和风化程度受到气候的控制, 在不同的气候条件下可以形成不同的风化产物 (Eberl, 1983; Hu et al., 2014)。风化剖面被广泛应用于大陆风化过程中元素或同位素特征的研究, 如 K、Mg、Li 等。目前, 关于空间上不同气候条件下的大陆风化作用对 K-Mg 同位素分馏的影响尚未得到系统研究。

浅海陆架沉积物以其接收广泛来源的河流输入的陆源碎屑沉积物为特征, 且未受到成岩作用的影响, 可以用来反映某一区域内的平均化学风化强度。本研究选取中低纬沿海区域浅海沉积物为研究对象, 研究区横跨渤海湾, 黄海, 东海以及海南岛南部区域 (18°N~40°N), 物源跨越温带、亚热带和热带三个季风气候区。地球化学证据表明沉积物原岩主要为陆源中酸性长英质岩石, 且没有明显热液作用或者自生黏土矿物的混入。全岩 K 同位素结果显示, 海南岛南部沉积物 $\delta^{41}\text{K}_{\text{NIST 3141a}}$ 值变化范围为 $-0.28\% \pm 0.07\%$ 到 $-0.67\% \pm 0.02\%$, 平均值为 $-0.51\% \pm 0.22\%$ 与硅酸

盐全地球值 (BSE) 在误差范围内一致。 $\delta^{26}\text{Mg}_{\text{DSM3}}$ 值为 $-0.31\% \pm 0.08\% \sim 0.08\% \pm 0.03\%$; 中纬度地区 (渤海、黄海和东海) 钾同位素值分馏不明显 ($-0.40\% \pm 0.01\%$ 到 $-0.57\% \pm 0.04\%$), 平均值为 $-0.50\% \pm 0.09\%$ 。 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值变化范围为 $-0.29\% \pm 0.01\% \sim 0.05\% \pm 0.01\%$, 高于地幔 Mg 同位素组成。值得注意的是, 沉积物 $\delta^{41}\text{K}$ 和 $\delta^{26}\text{Mg}$ 之间存在明显的负相关关系, 且低纬度地区 (海南岛) $\delta^{41}\text{K}$ 和 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值的变化范围相较于中纬度地区更大。

K-Mg 同位素数据表明, 中纬度地区 K-Mg 同位素变化与纬度变化相关性不高, 这可能与我国沿海区域冬夏季沿岸洋流造成的各沉积区沉积物相互混合的作用有关。来自海南岛南部沉积物样品 K-Mg 同位素组成变化范围较大, 且与 K/Ti、CIA、Al/K 呈现良好的线性关系, 表明其 K-Mg 同位素组成主要受控于化学风化强度, 这可能与海南岛湿热气候造成的化学风化作用较强有关。

基金项目: 主要地质储库钾同位素不均一性研究与基准值标定 (41873004)

第一作者简介: 穆军 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. E-mail: DZ1929006@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 李伟强, 教授. E-mail: liweiqiang@nju.edu.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

大陆风化过程的 Be、K 同位素响应

李石磊¹, 陈骏¹, RAYMO Maureen E.², 李伟强³, 陈旻¹,
GOLDSTEIN Steven L.², BEARD Brian L.⁴

1. 表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京大学 关键地球物质循环前沿科学中心;
2. *Lamont-doherty Earth Observatory, Columbia University*;
3. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院;
4. *Department of Geosciences, University of Wisconsin-Madison*

地球是目前已知唯一宜居的行星。早期研究认为长英质大陆风化消耗 CO₂ 的速率受气候控制, 因此是调节地球气候和宜居性的恒温器, 这似乎与新生代海水 Be 同位素记录相吻合, 然而现代观测和其他风化指标的研究并不支持该观点。该矛盾即风化-碳循环领域著名的“Be 同位素风化悖论”问题。此悖论问题产生的一个重要原因在于目前对表生 Be 循环的认识, 尤其是 Be 元素在滨海区的行为的认识不准确, 另一个原因则是已有风化指标均不能直接指示大陆硅酸盐风化过程, 缺乏可靠的硅酸盐风化指标。

为解决“Be 同位素风化悖论”问题, 并尝试探索新的硅酸盐风化指标, 本文从两方面出发, 一方面, 建立更为准确的表生 Be 循环的地球化学数值模型, 该模型对于现代海水 ¹⁰Be/⁹Be 的重现性优于前人模

型, 其结果显示海水 ¹⁰Be/⁹Be 比值对大陆风化过程的变化不敏感, 看似稳定的海水 ¹⁰Be/⁹Be 比值其实与大陆剥蚀风化速率的大幅度波动相吻合, 这为解决“Be 同位素风化悖论”问题提供了一种思路。另一方面, 本文系统性地研究中国大河流域和典型花岗岩流域样品的 K 同位素组成, 发现河流溶解质的 K 同位素组成与大陆风化强度负相关, 可以用于指示大陆风化强度, 因此填补了大陆风化领域的一个重要空白。在此基础上, 结合现代大陆平均风化强度和 K 同位素-风化强度转化函数, 本文估计大陆河流的平均的 K 同位素组成为 -0.22‰±0.04‰。这进一步为现代 K 循环通量的估计提供了重要的信息, 通过蒙特卡洛计算, 本研究显著降低了现代地质 K 循环通量估计中的不确定性。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

纹层与页理的辩证关系

蔡毅

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

“纹层”是页岩最典型的沉积特征, 尽管剖面上相当不显眼甚至是不可见的, 但是, 页岩中小规模的纹层沉积特征(尺寸上从 1 厘米到数毫米不等)却包含着页岩沉积过程的丰富信息。纹层构造代表着在安静环境下, 由底流塑造的沉积界面及独立形成的微生物垫 (Schieber et al., 1998)。从厚度和形态上可分为平坦的、不连续的、透镜状的和波状的等 (Lazar et al., 2015)。“页理”, 又称页(叶)状裂理, 指岩石易平行层面裂开成薄板状或薄片状的习性, 厚度在 1cm 以下, 只在地表露头出现, 深埋在地下的粉砂岩和泥质岩是没有页理的。页理的野外特征表现为厚度在 1 cm 以下的水平层理, 集合形态类似书页。页理是受风化作用影响形成力学薄弱面, 反映着易裂性质。页理可描述在风化作用中薄纹层裂成薄片状的过程 (Potter et al., 2005)。对大多数沉积学家来说, 泥岩变化不大; 因此, 无论是在野外还是在岩心中遇到泥岩, 通常都给予简单的描述, 如“灰色壳质泥岩”、

“油页岩”、“未分化泥岩”、“黑色富有机质泥岩”、或“中灰色泥岩”。与砂岩和碳酸盐岩的相描述相比, 这些描述的粗糙性更加明显。此外, 许多常用来描述泥岩的术语是基于它们的风化或压实特征(如“页理”或“片状”), 在指示沉积或早期成岩过程方面并不是特别有用 (Macquaker, 1993)。

辩证而言, “纹层”偏沉积范畴, 是在沉积过程形成的可被识别的最薄地层单元, 在颜色、组分、或粒径上区别于其他层; 这样的沉积层厚度薄于 1cm (通常 0.05~1mm 厚)。“页理”偏成岩范畴, 即一些岩石具有的易沿着紧密分布、粗略平坦, 大致平行的界面裂成薄层的特点的泛称, 例如, 页岩里的层理面, 或片岩中的劈理面。“纹层”强调同生沉积过程, “页理”强调成岩风化作用过程。相对来看, 纹层是形成页理的基础, 而页理是纹层的成岩风化作用形成的力学薄弱面。辨析纹层与页理的内涵意义有利于泥岩的精细岩相描述。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

黄山花岗岩关键带稀土元素海拔分异与影响因素

倪文倩¹, 汪晓云¹, 郭敏¹, 王韬¹, 江用彬^{1,2*}

1. 安徽工业大学 环境科学与工程系, 安徽马鞍山 243002;

2. 生物膜法水质净化及利用技术教育部工程研究中心, 安徽马鞍山 243002

黄山景区是以花岗岩景观为主的世界地质公园, 地貌陡峭, 高山局地微气候显著。近年来景区酸雨频发, 对景区矿质养分循环存在着潜在的影响。前期流域水化学研究表明, 黄山景观流域径流中稀土元素来源受花岗岩影响显著。对花岗岩风化剖面中稀土元素的海拔分异和影响因素的研究未见报道。本研究对黄山不同海拔梯度下 5 个风化剖面中稀土元素的分布、富集亏损以及迁移率进行了分析。结果表明, 黄山不同海拔梯度下各风化剖面中 Ce 含量相对较高, 其次为 Y、La、Nd。Pr、Sm、Eu 以及重稀土元素在剖面上的分布差异性小。球粒陨石标准化分析表明, 黄山不同海拔梯度剖面中轻稀土较重稀土富集, 相对于土

壤母质而言二者均表现为亏损状态, 可能与频繁降雨导致的强淋溶作用有关, 重稀土元素较轻稀土元素更易形成重碳酸盐和有机络合物, 优先被溶解迁移, 而轻稀土元素更易与黏土结合。尽管如此, 酸雨淋溶和酸壤条件可能会促进轻重稀土元素均存在强烈的淋失。各梯度剖面均表现出 Eu 负异常和 Ce 正异常, 前者在低海拔处异常度弱于中高海拔, 后者则相差不大。Eu 和 Ce 异常表明其对花岗岩母质岩体的继承性, 此外, 不同海拔梯度酸壤的氧化还原条件不同也可能是 Eu、Ce 异常的影响因素之一。上述结果表明, 黄山风景区土壤剖面成土作用与花岗岩母岩化学风化具有继承性且受到酸性环境条件的强烈淋溶作用影响。

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1608085MD82), 国家自然科学基金 (41203055)

第一作者简介: 倪文倩 (1996-), 硕士研究生, 研究方向: 生物地球化学. E-mail: 1136551865@qq.com.

*通信作者简介: 江用彬 (1978-), 副教授, 研究方向: 生物地球化学. E-mail: yongbin_jiang@163.com.

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

碱（土）金属同位素示踪化学风化

苟龙飞^{1,2*}, 金章东^{2*}

1. 长安大学, 地理学系, 西安 710054;

2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

大陆风化过程中, 地表物质从陆地向海洋/湖泊的迁移, 调节全球营养盐循环和生命演替, 并通过消耗大气 CO₂ 调控地质时间尺度的碳循环和气候变化, 从而深刻影响着地球的宜居性 (如 Tang et al., 2021)。其中, 硅酸盐岩风化通过消耗大气 CO₂ 的负反馈机制维持地质尺度上地表的宜居温度 (Walker et al., 1981; Berner et al., 1983; Hilton and West, 2020)。因此, 如何有效示踪硅酸盐岩风化是地球表生过程研究的重要科学问题之一 (Gaillardet et al., 1999; 陈骏等, 2001; West et al., 2005)。由于化学风化主要是岩石中阳离子丢失的过程 (Walker et al., 1981; Berner et al., 1983; Gaillardet et al., 1999), 而碱 (土) 金属 (如 Li、Na、K、Mg、Sr、Ca、Ba 等) 是最容易丢失且活性最强的一类阳离子, 因而在流体中具有一定的保守性, 也是示踪长尺度硅酸盐岩风化的潜在指标。几十年来, 基于碱 (土) 金属含量的比值、组合等多项指标 (例如: Rb/Sr、Li/Ba、Ca/Mg、CIA 等) 被用以示踪化学风化, 使化学风化的研究进入了新时代, 但也慢慢进入了瓶颈期。近十多年来, 基于多接收等离子体质谱的快速发展, 多种碱 (土) 金属同位素体系被用于重建地史硅酸盐岩风化通量与强度, 其带来的高维信息有望定量地史风化强度和通量, 例如: Os、Sr、Li、Mg 等。然而, 在用于探究硅酸盐岩化学风化通量和强度的这些同位素指标中, 各个同

位素体系均有各自的优势和缺陷, 更多反映化学风化的某一侧面。因此, 利用碱 (土) 金属同位素各自的优势, 同时避免其劣势, 多种示踪手段相互补充、佐证, 扬长避短, 有望更全面的获取硅酸盐岩风化中各个过程的真实信息。这是更客观地认识硅酸盐岩风化的必由之路。

黄河中游流经黄土高原, 为黄土所覆盖。黄土具有较为均一的、可以代表上地壳的元素组成 (Taylor et al., 1983) 和同位素组成 (例如: Teng et al., 2004; Gong et al., 2017; Nan et al., 2018)。同时, 得益于东亚季风, 黄土高原地区具有显著的季节气候反差, 使其成为利用碱 (土) 金属同位素示踪陆壳尺度上化学风化及其对气候的响应的绝佳之地。为此, 自 2013 年开始我们在黄河中游收集了每周一次的高分辨率河水和悬浮物等样品, 并实时监测温度、流量等基础数据, 使用 Sr 同位素示踪风化物质来源; 使用 Li 同位素示踪黄土风化过程中的温度效应; 使用 Mg 同位素示踪碳酸盐岩沉淀和粘土形成; 使用 Ba 同位素示踪固态物质吸附强度; 使用 K 同位素示踪黄土溶解过程。这些工作让我们较全面地认识了大陆尺度硅酸盐岩风化的各个过程。从而更深刻的理解化学风化与宜居地球之间的关系, 为目前大陆风化过程中的“高原隆升说”和“地质空调说”两大理论相矛盾的局面提供直接观测事实。

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 42103055、41991322)

第一作者简介: 苟龙飞 (1987-), 男, 副教授, 研究方向: 化学风化、金属稳定同位素. E-mail: lfgou@chd.edu.cn

*通信作者简介: 金章东 (1971-), 男, 研究员, 研究方向: 地表过程、化学风化、碳循环. E-mail: zhdjin@ieccas.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

青藏高原岷江上游河水镁同位素季节性变化 及其对水文事件的响应

徐阳¹, 金章东^{1,2,*}, 苟龙飞³, 张飞¹, 李臣子^{1,4}, 刘陆柏洋¹, 邓丽¹

1. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061;

2. 中国科学院第四纪与全球变化卓越研究中心 西安 710061;

3. 长安大学, 土地工程学院, 西安 710054;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

化学风化通过消耗大气 CO₂ 来调节全球碳循环平衡, 维持了地球长期宜居性, 在地球系统中发挥着重要的作用, 因此需要较好的约束和研究。在全球变暖背景下, 极端天气与水文事件频发, 化学风化如何响应这些极端事件变化还不清楚, 目前尚缺乏可靠、稳健的示踪手段。镁 (Mg) 同位素对原生矿物溶解较为敏感, 对示踪流域侵蚀和化学风化极具潜力和优势。本研究选择青藏高原岷江上游镇江关水文站开展河水 Mg 同位素 ($\delta^{26}\text{Mg}$) 的时间高分辨率研究 (每周一次采样), 可以最大限度地减少空间和岩性变化造成的不确定性, 从而可以更直接地评估化学风化对极端侵蚀和气候因子 (如温度、降雨量) 的响应过程。结果显示, 镇江关站季节性河水 $\delta^{26}\text{Mg}$ 发生了系统性变化 (幅度为 0.2‰), 从非季风期的 -1.20‰ 变化到季风期间的

-1.00‰。值得注意的是, 河水 $\delta^{26}\text{Mg}$ 在季风期间的 6 次极端强降雨事件中均有快速升高。进一步研究发现, 河水 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值与悬浮沉积物浓度 (SSC) 和物理侵蚀速率 (PER) 均有较好的正相关关系 ($r^2 = 0.56$ 和 0.64), 表明河水中轻的 Mg 同位素可能优先进入到了固体中, 从而导致河水 Mg 同位素变重。在排除了次生粘土与碳酸盐矿物形成后, 本研究通过模型计算与矿物学分析, 认为是阳离子交换作用吸附了 ²⁴Mg 造成的结果, 特别是季风期间极端水文事件引起的高悬浮沉积物通量, 形成的离子交换池在短时间内显著提高了河流 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值。本研究表明岷江上游河水 Mg 同位素季节性变化由季风期间水文变化调控, 特别是对水文事件敏感响应, 为探讨化学风化对极端事件的响应和全球 Mg 循环提供了实地观测证据。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

东海沉积物镁同位素组成及示踪大陆风化的潜力

胡忠亚, 杨守业*, 杨承帆, 郭玉龙

同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

镁元素在大陆地壳和海洋中均具有较高的自然丰度, 含镁粘土矿物是硅酸岩化学风化过程中的重要产物之一, 其形成过程中往往记录了丰富的气候和环境变化信息。用海洋粘土沉积物镁同位素示踪关键地质历史时期大陆风化过程的深时演化成为当前剖析全球气候变化的一个新思路, 并引起广泛关注。河口与浅海陆架区是海陆物质循环的关键区域, 水动力、水体 pH/Eh 和盐度等环境因素变化较大, 界面过程和物质循环可以显著改变入海风化物质的组成, 制约流域风化信号向大洋的传输, 进而影响边缘海风化沉积记录的解读。目前对河口-陆架关键断面上陆源粘土矿物镁同位素地球化学行为特征的研究不足, 制约了该新指标的广泛运用。本文依托 2019-2020 东海综合科考航次, 以东海河口-陆架沉积区表层和重力柱沉积物为研究对象, 开展粘土矿物提取及高精度的元素和镁同位素地球化学分析,

结果显示粗粒沉积物具有与未风化上地壳相同的元素和镁同位素组成, 表明其来源于岩石的物理风化, 而粘土粒级沉积物与粗粒沉积物之间的镁同位素差异 $\Delta^{26}\text{Mg}_{\text{细粒-粗粒}} \approx 0.3\text{‰}$, 基本与上地壳风化过程中沉积物与母岩之间的镁同位素分馏程度一致, 表明粘土粒级沉积物镁同位素确实记录了大陆风化信号。空间对比研究结果显示, 表层粘土粒级沉积物自河口向海方向上没有显著的镁同位素变化, 垂向上, 重力柱中也没有观察到显著的沉积物镁同位素变化和早期成岩作用响应趋势。粘土粒级沉积物 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值与 Al 含量呈现正相关关系。这些结果综合表明, 河口及陆架沉积区陆源粘土粒级沉积物 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值与沉积物所经历的大陆风化强度有关, 而沉积分选和早期成岩作用不会显著影响粘土粒级沉积物镁同位素组成特征, 陆源粘土粒级沉积物可以示踪大陆风化作用。

基金项目: 用岛礁白云岩 Mg 同位素制约新近纪以来海洋镁-钙循环 (42103004)

第一作者简介: 胡忠亚, 副研究员, 研究方向: 镁同位素及表生镁循环. E-mail: zhongyahu@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 杨守业, 教授, 研究方向: 大陆边缘沉积学及地球化学. E-mail: syyang@tongji.edu.cn

• 专题 18: 地表过程与化学风化 •

Reverse weathering may amplify post-Snowball atmospheric carbon dioxide levels

Fangbing Li^{1,2,3}, Donald Penman^{3,4}, Noah Planavsky³, Andrew Knudsen⁵,
Mingyu Zhao³, Xiangli Wang⁶, Terry Isson⁷, Kangjun Huang⁸, Guangyi Wei⁹,
Shuang Zhang¹⁰, Jun Shen¹¹, Xiangkun Zhu¹, Bing Shen^{2*}

1. MNR Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics, MNR Key Laboratory of Isotope Geology, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
3. Department of Geology and Geophysics, Yale University, New Haven, CT 06520, USA;
4. Department of Geosciences, Utah State University, Logan, UT 84322, USA;
5. Department of Geosciences, Lawrence University, Appleton, WI 54911, USA;
6. University of South Alabama, Mobile, AL 36688, USA;
7. University of Waikato (Tauranga), Tauranga 3110, New Zealand;
8. State Key Laboratory of Continental Dynamics and Shannxi Key Laboratory of Early Life and Environment, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710127, China;
9. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;
10. Department of Oceanography, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA;
11. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

Snowball Earth glaciations are the most extreme climate perturbations recorded in Earth's history. It has been argued that the termination of these events was characterized by a single rapid transition from near-global ice coverage to an ice-free greenhouse climate state. Notably, this deviates with more extended transition periods of ice sheet waxing and waning typical of Phanerozoic glaciations. Using a coupled mineralogical and Mg and Li isotopic approach, we explore the role that authigenic clay formation within the seafloor may have played on Earth's climate during deglaciation of the

Marinoan Snowball Earth event. Marine authigenic clay formation—a process referred to as reverse weathering—recycles carbon within the ocean-atmosphere system and acts to elevate atmospheric CO₂ levels. The results indicate a shift towards more extensive reverse weathering within the uppermost portion of the glaciogenic Nantuo Formation in South China. Carbon cycle modeling indicates that widespread reverse weathering could have driven a protracted (millions of years) carbon dioxide drawdown following high carbon dioxide levels expected during deglaciation.

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

南海北部冰期陆架硅酸盐岩风化记录受东亚夏季风和海平面动态耦合沉积过程的控制

张驰¹, 杨守业^{1*}, 黄湘通^{1**}, 窦衍光², 郝强¹, 许心宁¹

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海, 200092;

2. 自然资源部青岛海洋地质研究所海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛, 266071

厘清第四纪冰期-间冰期旋回中大气 CO₂ 浓度的演变规律和驱动机制是重建过去环境变化的关键所在。一些低纬陆源碎屑风化记录的研究揭示冰期陆架松散沉积物的暴露风化是大气 CO₂ 消耗的潜在途径, 但对陆架风化的产生过程及其与气候响应之间的关系仍存在争议。本研究通过南海北部陆坡钻孔 (MD12-3429) 陆源碎屑组分的元素地球化学和 Sr-Nd 同位素分析, 开展了过去 244kyr 以来硅酸盐岩风化记录和海平面以及气温、降雨等环境因子的对比研究, 深入探讨了陆坡风化记录能否同步响应气候变化。硅酸盐综合风化指数 (SCWI) 和南海北部 Mg/Ca 比重建的海水表面温度 (SST) 在长期趋势上展现出同步变化的特征, 暗示温度是影响轨道尺度上风化强度的一级因素。通过古环境记录的解释, 我们认为沉积过程对于陆坡沉积物风化记录的

形成至关重要, 提出了低纬度冰期硅酸盐岩风化增强的两种不同环境响应机制。在 MIS6.5 阶段, 风化强度升高与南海浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 显著负偏相对应, 风化记录同步响应东亚夏季风变化。此时, 低纬适宜的温度促进了暴露陆架上松散-弱固结沉积物的再次蚀变, 导致了冰期沉积物风化增强, 同时, 较丰富降水也对风化过程的进一步加强起到“加速器”的效应。随着海平面的持续下降, 地势平坦的大陆架起到类似“河漫滩”缓冲区的作用, 来自台湾快速剥蚀区的低风化程度陆源碎屑在陆架上进一步风化, 随着 MIS6 后期海平面的快速上升重新搬运和分配, 使风化记录对气候的响应产生滞后性。我们的研究表明气候-海平面动态耦合对风化记录的影响, 在解释海区陆源碎屑记录时必须综合考虑复杂的动态沉积过程。

第一作者简介: 张驰 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 海洋地质、沉积学. E-mail: zhangchi_tj@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 杨守业 (1971-), 教授, 研究方向: 海洋地质、沉积地球化学. E-mail: syyang@tongji.edu.cn

**通信作者简介: 黄湘通 (1977-), 副教授, 研究方向: 海洋地质、沉积地球化学. E-mail: xiangtong@tongji.edu.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

花岗岩风化过程的 Li 同位素分馏: 对 pH 的响应

朱冠虹, 马金龙*, 韦刚健, 张乐, 王志兵, 张卓盈, 曾提

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

硅酸岩风化作为全球碳循环主要的汇和表生地球化学循环的核心过程, 不仅控制着全球气候的演变, 还会影响地表物质的循环和地形地貌的演化。由于 Li 同位素 (${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$) 之间的相对质量差相差较大 (~16%), 使得 Li 同位素在地质过程中存在着显著的分馏; 而且 Li 元素主要赋存于硅酸岩中, 其同位素组成几乎不受生物作用和氧化还原作用的影响, 因此 Li 同位素在示踪硅酸岩风化方面具有重要的应用潜力。目前, 前人对玄武岩上发育的土壤或风化剖面的 Li 同位素分馏行为进行了较为系统的研究, 但花岗岩风化过程中的 Li 同位素分馏行为研究相对较少且分馏机制尚不明确。

因此, 本研究选取广东佛冈一个完整的花岗岩风化剖面 (包含母岩、弱风化区、中风化区和强风化区) 对其全岩及组成矿物的 Li 同位素组成进行了研究。研究表明, 外源输入的 Li 对该风化剖面样品的 Li 同位素组成影响很小。风化产物样品的 Li 元素相对新

鲜母岩更亏损, 其 τ_{LiTiO_2} 值在 -6.0% 到 -73.8% 之间变化; 其 $\delta^7\text{Li}$ 值的变化范围为 -11.4 ‰ 至 +2.4 ‰。不同种类的单矿物样品其 Li 浓度和 $\delta^7\text{Li}$ 值差别很大, 黑云母和绿泥石的 Li 浓度远高于其他组成矿物, 伊利石和高岭石的 Li 浓度次之, 斜长石和钾长石的 Li 浓度最低; 石英的 $\delta^7\text{Li}$ 值最高, 粘土矿物的 $\delta^7\text{Li}$ 值最低。从风化剖面底部到顶部, 风化产物的 pH 值逐渐降低, 风化产物的 Li 浓度也逐渐降低, 而风化产物的 $\delta^7\text{Li}$ 值呈现先降低后升高的趋势。其次, 不同风化阶段组成矿物的 Li 同位素研究结果显示, 原生矿物溶解和次生矿物形成过程中都发生了显著的 Li 同位素分馏。全岩和单矿物样品在不同的 pH 环境下风化, 表现出两种不同的 Li 同位素分馏行为, 在碱性到弱酸性环境中重的 Li 同位素 (${}^7\text{Li}$) 会被优先释放进入溶解态中, 而在酸性环境中轻的 Li 同位素 (${}^6\text{Li}$) 倾向于被淋滤进入溶液相中。这一发现有助于解释岩石溶解模拟实验与野外观测之间不一致的 Li 同位素分馏特征。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41991325)

第一作者简介: 朱冠虹, 工程师, 研究方向: 同位素地球化学; E-mail: zhuguanhong@gig.ac.cn

*通信作者简介: 马金龙, 正高级工程师, 研究方向: 关键带的元素同位素地球化学; E-mail: jlma@gig.ac.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

水稻土风化过程中的金属同位素分馏

程文瀚^{1,2*}, 戚玉菡^{2,3}, 王睿睿², 黄淋清^{2,4}, 殷皓铭², 赵俊哲¹,
于慧敏², 黄方^{2*}

1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036;

2. 中国科学技术大学中科院壳幔物质和环境重点实验室, 合肥 230026;

3. Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2E3, Canada;

4. University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, CA 92037, USA

水稻土的成土过程中, 季节性淹水-落干循环控制着水稻土的氧化还原状态, 从而显著影响水稻土中矿物的溶解与沉淀, 形成耕作层、犁底层、淀积层等特征层位。研究这一成土过程中各元素的地球化学行为, 对于理解土壤中元素迁移转化机制至关重要。近年来多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 测定金属同位素的测试精度显著提高, 金属同位素指标已开始应用于土壤中的地球化学研究。我们研究了水稻土剖面中 Fe、Cu、Cd、Zn 等元素的稳定同位素分布, 发现氧化还原状态变化控制了变价元素 Fe 和 Cu 的同位素地球化学行为, 而 Cd 和 Zn 的同位素分布主要受外源污染影响, 在剖面内的分馏较小。具体来说, 水稻土表层 Eh 电位在淹水期显著下降, 三价 Fe 被还原成富集轻同位素的二价 Fe 并随孔隙水向下

迁移, 在地下 Eh 电位较高的不饱和层 (110-160cm) 沉降, 形成 Fe 同位素偏轻 ($\delta^{56}\text{Fe}=-0.12\pm 0.03\%$) 的铁富集层 ($\text{Fe}_{\text{wt}}=10\%$)。整个剖面的 Fe 同位素值和 Fe 含量呈显著负相关关系。水稻土中控制 Cu 同位素分馏的机制与 Fe 相似, 也是表层土中 Cu 被还原成富集轻 Cu 同位素的 Cu(I), 并随孔隙水向下迁移, 但受黏土矿物吸附作用影响, 其同位素值与含量没有显著相关关系。在受污染水稻土中, 表层 Cd 同位素明显偏轻, $\delta^{114/110}\text{Cd}$ 最低可达 $-0.496\pm 0.010\%$, 主要受外源输入的工业粉尘控制, 40cm 以下部分 Cd 含量变化不大, 但 Cd 同位素波动明显 ($-0.357\pm 0.076\sim +0.468\pm 0.076\%$), 可能受地下水影响。而 Zn 同位素在水稻土剖面中未见明显分馏 ($\delta^{66}\text{Zn}=+0.143\pm 0.022\%\sim +0.270\pm 0.032\%$)。

基金项目: 国家自然科学基金 (41803005) 安徽农业大学高层次人才引进项目 (rc522113)

第一作者简介: 程文瀚 (1985-), 教授, 研究方向: 环境地球化学. E-mail: chengwh@ahau.edu.cn

*通信作者简介: 黄方 (1978-), 教授, 研究方向: 非传统稳定同位素. E-mail: fhuang@ustc.edu.cn

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

提取流域沉积物风化程度信号

郭玉龙, 杨守业

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

大陆硅酸盐风化是维持地球长期碳循环平衡和地球宜居环境的关键机制。作为地表风化的直接产物, 河流碎屑沉积物的地球化学组成蕴含了源区流域风化信息。但受搬运过程中动力分选和沉积再旋回等过程影响, 风化信息难以准确提取。因此, 如何通过碎屑沉积物化学组成提取并解译流域风化强度信号, 是利用陆源碎屑沉积可靠重建大陆风化历史的前提和瓶颈问题。

前人学界提出多种研究方案提取沉积物地化组成中风化程度信号, 但仍缺少适用于钻孔沉积物研究、实验分析简便的定量研究指标。Garzanti et al., (2013) 提出用 CIA/WIP 评价沉积旋回性影响程度。

然而, CIA/WIP 对沉积物风化强度也很敏感, 因此无法可靠指示 SiO₂ 稀释作用。利用前期研究中基于 CIA-WIP 图解提出的“河流现代风化产物趋势线”, 本研究提出 $\Delta WIP/WIP$ 新指标。其中, ΔWIP 表示同一 CIA 下现代风化产物与沉积物样品的 WIP 差值。 $\Delta WIP/WIP$ 不受沉积物风化程度影响, 数值上等于 SiO₂ 稀释程度, 因此可用于定量评价沉积物对现代风化产物的代表性。 $\Delta WIP/WIP$ 绝对值越小, 表示沉积物 SiO₂ 稀释程度越低, 其地化组成越接近于现代风化产物。 $\Delta WIP/WIP$ 判别方法可以有效减小水动力分选及沉积旋回性引起的流域沉积物地化组成变率, 由此可靠提取沉积物风化程度信号。

· 专题 18: 地表过程与化学风化 ·

白云岩风化土壤剖面稀土元素地球化学特征

鲁文佳^{1,3}, 宁增平^{1*}, 高庭¹, 宋长顺¹, 刘意章¹, 孙静¹,
肖唐付², 刘承帅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, 贵阳 550081;

2. 广州大学 环境科学与工程学院, 广州 510006;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

稀土元素(REE)化学性质既相似又存在细微差别,常被运用于示踪物源与岩石风化成土过程,以及指示土壤侵蚀过程与土壤环境信息。土壤剖面中稀土元素的迁移、富集记录着关键的地球化学信息。研究稀土元素在岩石风化成土过程中如何富集、迁移以及分馏,有助于深入认识土壤发育演化和稀土元素地球化学循环过程。已有研究多集中在花岗岩、玄武岩和页岩等风化过程,而对于碳酸盐岩风化成土过程的元素地球化学行为的研究鲜有报道。

本研究选取广西某白云岩原生风化剖面为研究对象,共采集土壤样品共 25 个,基岩样品 3 个。样

品经风干、粉碎和研磨后,采用 HNO₃-HF 混合酸消解后,用 ICP-MS 测定稀土元素含量。研究表明:土壤中稀土元素相对于基岩明显富集。从表层到基岩,各稀土元素的空间变化呈现相似的空间变化特征。均一化的稀土元素为右倾型轻稀土富集型,土壤剖面各层分布曲线相似,继承母岩稀土元素分布模式。风化指数(WIG)结果表明土壤剖面 0-18cm 为中等风化程度,18cm 以下处于弱风化程度。将 $\sum\text{REE}$ 、 $\sum\text{LREE}$ 、 $\sum\text{HREE}$ 与 WIG 进行拟合,结果显示具有较好的相关性,表明风化强度在一定程度上影响着稀土元素在土壤剖面中的地球化学过程。

基金项目: 国家自然科学基金(42177182)

第一作者简介: 鲁文佳(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 元素地球化学. E-mail: luwenjia@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 宁增平(1980-), 研究员, 研究方向: 元素地球化学. E-mail: ningzengping@mail.gyig.ac.cn