

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.022.

张加琼, 尚月婷, 白茹茹, 等. 稀土元素示踪法在土壤侵蚀与泥沙来源研究中的应用[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 55-61.

ZHANG Jiaqiong, SHANG Yueting, BAI Ruru, et al. Application of Rare Earth Element Tracer in the Research of Soil Erosion and Sediment Source[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 55-61.

稀土元素示踪法在土壤侵蚀与泥沙来源研究中的应用

张加琼^{1,2}, 尚月婷¹, 白茹茹¹, 殷敏峰¹, 党真^{2,3}, 杨明义^{1,2}, 肖海^{4,5}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 5.三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的]掌握稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀和泥沙来源的方法,明确其不确定性来源,对正确运用该方法获得可靠的侵蚀速率和泥沙源地贡献结果具有重要意义。[方法]基于前人运用REE示踪土壤侵蚀速率和泥沙来源的研究成果,总结了REE示踪土壤侵蚀的基本技术路线及其在水蚀、风蚀和泥沙来源研究中的应用,探讨了REE示踪土壤侵蚀和泥沙来源研究中的不足。[结果]分析认为REE虽是理想的示踪剂,但REE示踪法仍存在影响示踪土壤侵蚀和泥沙来源准确性的关键方面需要改进,包括REE与土壤结合方式与机理、长期监测或复杂环境下随淋溶、径流的迁移以及植被吸收利用等。在未来研究中应重点关注大量释放REE对土壤、植物、环境健康的影响以及REE示踪法与复合指纹识别法的结合运用等。[结论]研究结果为提高REE示踪土壤侵蚀结果的准确性,运用该方法开展其他侵蚀类型研究,与复合指纹识别法结合辨别大区域的泥沙来源奠定基础。

关键词: 稀土元素示踪; 土壤侵蚀; 泥沙来源; 侵蚀示踪; 粒度效应

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0055-07

Application of Rare Earth Element Tracer in the Research of Soil Erosion and Sediment Source

ZHANG Jiaqiong^{1,2}, SHANG Yueting¹, BAI Ruru¹, YIN Minfeng¹,
DANG Zhen^{2,3}, YANG Mingyi^{1,2}, XIAO Hai^{4,5}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

4.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 5.College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] Understanding the tracing approach of rare earth elements (REE) in soil erosion and sediment source identification, and clarifying their uncertainties are important to obtain robust quantification results of soil erosion and sediment source. [Methods] The soil erosion technical route using REE and its application progress in water and wind erosion quantification, and sediment source identification were summarized based on previous results, as well as the deficiencies of REE tracing. [Results] REEs are considered as the ideal elements used to trace soil erosion, however, there are still key aspects that affect the accuracy of erosion and sediment source estimation results from REE tracing, including the combination methods and mechanisms of REE to soil particles, REE transport through leaching and runoff and plant absorption and

收稿日期: 2022-01-22

修回日期: 2022-02-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(4207071519; 42277323); 土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地(2021EJD026)

第一作者: 张加琼(1984—), 女, 四川小金人, 副研究员, 博士, 研究方向土壤侵蚀。E-mail: jqzhang@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 肖海(1988—), 男, 湖南郴州人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀机理与边坡生态防护研究。E-mail: oceanshawctgu@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

utilization in long term studies. Therefore, key aspects that researchers should focus on in the future were proposed. It is also urgent to clarify the impact of massively released REE on the health of soils, plants and environments. Additionally, sediment source identification combined with the optimal fingerprinting approach should be further explored. [Conclusion] The results of this study are valuable for improving the accuracy of the REE tracing technique, expanding application of REE tracing technique to other erosion types in addition to water erosion, and using REE tracing technique in combination with the composite fingerprinting approach to identify sediment source in relatively large areas.

Keywords: rare earth element tracing; soil erosion; sediment source; erosion tracing; particle size effect

稀土元素(Rare Earth Element, REE)包括镧系元素和性质与之类似的钪(Sc)和钇(Y)元素。镧系元素可分为轻稀土(铈组稀土)和重稀土(钇组稀土)两组,轻稀土元素包括 La, Ce, Pr, Nd, Sm 和 Eu;重稀土元素包括 Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb 和 Lu。由于 REE 具有难溶于水、不易淋溶、植物吸收利用率低、与土壤吸附性强并对土壤理化性质影响较小、测试分析便利等优势,是理想的示踪元素,在土壤侵蚀速率估算方面应用广泛,也应用于泥沙来源研究^[1-4],常用的包括 La, Ce, Nd, Sm, Eu, Dy, Tb, Yb 等^[5-6]。运用 REE 示踪土壤侵蚀的基本假设是 REE 与土壤紧密吸附,几乎不随水流存在垂直或水平方向迁移,且植物吸收利用率低,而只随土壤颗粒的分离、迁移、沉积发生迁移,因此通过测定土壤或沉积物中的 REE 含量,结合模型即可估算土壤侵蚀量^[7]。

与常用的径流小区法、野外调查法、水文资料法、室内试验和模型模拟等土壤侵蚀研究方法相比,REE 示踪法可以克服传统方法难以破解的区域内不同部位侵蚀方式、过程变化等难以追踪的问题,在准确量化不同部位侵蚀量方面也较大多传统方法更优^[8]。与其他示踪方法(如放射性核素示踪、磁性示踪、颜色示踪等)相比,REE 在明确不同侵蚀方式的侵蚀量及其时空变化特征方面具有明显优势,为准确量化侵蚀速率、精准定位侵蚀部位、追踪侵蚀方式变化、筛选侵蚀物质主要来源地等提供了技术手段^[9],然而,REE 示踪法也存在影响结果不确定性的关键方面需要进一步关注。因此,本文在回顾前人使用 REE 示踪土壤侵蚀和泥沙来源研究成果的基础上,总结该方法运用的进展及其局限性,探讨影响 REE 示踪结果不确定性的因素,提出未来研究中亟需加强的内容,为用好 REE 示踪土壤侵蚀和泥沙来源,服务于水土保持工作提供支撑。

1 REE 示踪土壤侵蚀的方法

运用 REE 示踪土壤侵蚀主要通过 REE 布设、土壤或泥沙样品采集、样品中 REE 含量测定、模型估算

土壤侵蚀或沉积量 4 个步骤实现。虽然自然界土壤中有一定的 REE 含量(土壤的 REE 背景含量),但研究者多采用人为释放 REE 的方式,基于显著高于土壤背景含量的 REE 开展土壤侵蚀研究,因此 REE 与土壤混合的均匀性对土壤侵蚀结果的准确性具有重要影响。目前 REE 常采用拌施法、撒播法和喷洒法释放到土壤中^[10]。拌施法可采用逐步稀释、筛分、撒播等方式以点状、条带、分区域均匀地将 REE 释放到土壤中。其中逐步稀释通过向土壤中逐渐定量添加高浓度的稀土元素以调整 REE 的含量到预设值;筛分是通过过筛将 REE 和试验土壤充分混合;撒播是通过播撒稀土元素氧化物干粉的方式将 REE 与表层土壤均匀混合;喷洒是将 REE 溶解于硝酸等溶液,再通过喷洒的方式均匀释放到土壤中^[5,11-12]。除 REE 与受试土壤混合均匀外,采样方案对获得准确的土壤侵蚀速率同样重要。由于研究者认为 REE 在侵蚀过程中仅随土壤颗粒迁移而迁移,因而在野外采用点状法释放布设 REE 时,采样中可能发生人为稀释,如侵蚀区域未释放 REE 的侵蚀土壤被搬运并沉积于布设 REE 区域,覆盖与释放 REE 土壤的表面或严重沉积部位取样深度不足,从而造成高估或低估侵蚀速率的问题。因此,在试验布设时需统筹考虑 REE 释放深度、侵蚀造成的表层土壤剥离或沉积厚度和采样深度等,以获得较准确的结果。

REE 样品常用中子活化分析(Instrument Neutron Activation Analysis, INAA)、电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)、电感耦合等离子体发射光谱(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrum, ICP-OES)测定土壤或泥沙中的 REE 含量^[2,5,12],而后通过质量守恒模型将土壤或泥沙中的 REE 含量估算土壤侵蚀或沉积量。目前常用的质量守恒模型的算法如下:

田均良模型^[13]:

$$w_i = \frac{(C_{\text{sed},i} - C_{\text{bac},i})W}{C_{\text{soil},i}} \quad (1)$$

刘刚修正模型^[14]:

$$w_i = \frac{(C_{sed,i} K_i - C_{bac,i}) W}{C_{soil,i}} \quad (2)$$

其中,

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{M_{sed,j}}{M_{soil,j}} S_{ji}}{\sum_{j=1}^n S_{ji}} \quad (3)$$

Zhang 修正模型^[15]:

$$w'_{ji} = \frac{(C_{sed,ji} - C_{soil,i}) W_j}{\eta C_{bac,i}} \quad (4)$$

式中: w_i 为稀土元素 i 标记土壤或区域的土壤侵蚀量 (kg); w'_{ji} 为稀土元素 i 标记土壤或区域 j 时段内的土壤侵蚀量 (kg); $C_{sed,i}$ 为泥沙中测得的稀土元素 i 含量 (mg/kg); $C_{soil,i}$ 为土壤中稀土元素 i 的释放浓度 (mg/kg); $C_{bac,i}$ 为土壤中稀土元素 i 的背景含量 (mg/kg); $C_{sed,ji}$ 为泥沙中测得的稀土元素 i 在 j 时段内的含量 (mg/kg); W 为收集到的泥沙量 (kg); W_j 为 j 时段内收集到的泥沙量 (kg); K_i 为稀土元素 i 含量的粒径校正系数; η 为细颗粒富集系数, 其为泥沙与土壤中相同粒径范围细颗粒含量的比值; $M_{sed,i}$ 和 $M_{soil,i}$ 分别为泥沙和土壤中粒径范围 j 内稀土元素 i 的质量 (kg); S_{ji} 为粒径范围 j 内添加的稀土元素 i 的质量 (kg)。

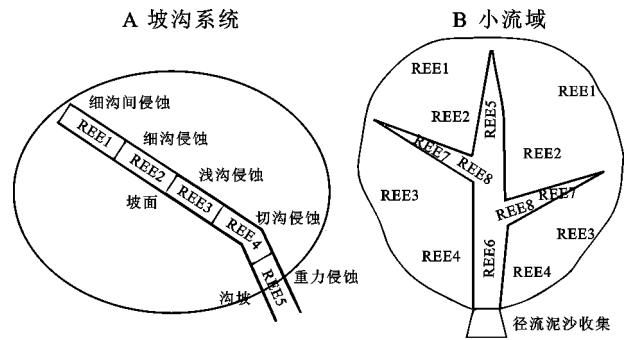
其中, 田均良模型^[13]最早, 在估算颗粒组成较均一黄土的侵蚀速率时精度较高。然而, 由于模型未考虑 REE 在不同土壤颗粒之间的吸附差异和侵蚀过程中的泥沙分选, 模型在估算粗骨粒土壤 (如紫色土、黑土等) 侵蚀速率中的误差较大。刘刚修正模型^[14]针对田均良模型的缺陷, 引进了粒径校正系数修正了稀土元素在不同粒径土壤颗粒的选择性吸附和泥沙分选的影响, 提高了 REE 示踪粗骨粒土壤侵蚀的精度。Zhang 修正模型^[15]利用富集率修正泥沙分选作用, 提高了 REE 示踪土壤侵蚀精度的同时简化了颗粒校正系数的算法。

2 REE 示踪法在土壤侵蚀与泥沙来源研究中的应用

2.1 REE 示踪法在土壤水蚀研究中的应用

在土壤水蚀研究中, 为明确坡面、坡沟系统、小流域等的侵蚀特征, 前人往往采用多种 REE 配合使用的方式开展研究。基于多个 REE 的含量变化追踪侵蚀过程变化、量化不同侵蚀方式的侵蚀比例、坡沟系统侵蚀速率的空间差异、分析地貌部位和土地利用类型等对小流域土壤侵蚀的影响、改进侵蚀估算模型及

其关键参数等 (图 1)^[16-17]。因此, 在坡面尺度 REE 用于示踪侵蚀过程中的分离、输移和沉积过程; 区分细沟与细沟间侵蚀的发展变化; 追踪细沟形态的演化, 辨别降雨径流搬运和雨滴打击搬运对侵蚀的作用, 在多营力复合侵蚀区域分别量化融雪径流、降雨、风力侵蚀的速率与对总侵蚀的贡献, 评估植被恢复对土壤侵蚀的防控效果等^[18-22]。在小流域尺度, REE 可示踪坡沟系统、小流域模型等的产沙过程, 依据不同地貌部位、土地利用类型等的侵蚀速率估算小流域泥沙来源^[2,23-24]。



注: 根据张光辉^[25]、肖海等^[2]、魏霞等^[23]修改。

图 1 REE 示踪坡面、坡沟系统和小流域土壤侵蚀的元素布设案例

2.2 REE 示踪法在风蚀研究中的应用

目前, 运用 REE 示踪土壤风蚀的报道较少。前人多运用 REE 研究沙漠风沙、大气粉尘、河湖海洋粉尘等的来源、输移路径等^[26-28]。使用 REE 示踪土壤风蚀的研究案例显示, 使用硝酸溶解后的 REE 与土壤颗粒附着良好, 为风蚀物的来源、输移路径和沉积区域、风蚀物运移的时空变化追踪提供了可靠方法^[12,29]。此外, 也有研究尝试通过拌施释放 REE 开展风蚀研究, 验证了该方法在辨别复杂侵蚀条件下的风蚀速率及其空间分布的可行性^[30]。可见, 目前基于 REE 的土壤风蚀研究还十分薄弱。此外, REE 在其他侵蚀类型研究中目前仍未见报道。

2.3 REE 示踪泥沙来源

REE 示踪泥沙来源可以通过两种途径实现。一是, 基于 REE 示踪的土壤侵蚀速率, 估算小区、模拟小流域等研究区域不同源地的泥沙贡献比例。这是目前基于 REE 示踪法估算泥沙来源的常用方法之一, 可区分细沟和细沟间侵蚀的产沙比例, 估算模拟小流域坡面和沟道的泥沙贡献, 辨别侵蚀的源与汇等^[2,24,31]。二是, REE 作为指纹因子, 采用复合指纹法识别泥沙来源。其方法与采用土壤颜色、磁性、地球化学元素等指纹因子定量泥沙来源的方法相同。基于不同源地土壤中 REE 的含量、类别等的差异, 通过指纹因子组筛选和源地贡献估算两个步骤实现。

指纹因子组筛选主要通过 Kruskal-Wallis H 检验、主成分分析、判别分析等方法实现,而后基于筛选出的一个或多个指纹因子组,结合多元混合模型、蒙特卡洛模型、贝叶斯模型、广义似然不确定估计等估算泥沙来源^[32]。

3 REE 示踪土壤侵蚀和泥沙来源中存在的问题

3.1 REE 示踪土壤侵蚀中存在问题

然而,REE 在土壤侵蚀研究中也存在局限性,其中最突出的是大尺度应用问题。REE 通常以数倍到上百倍土壤背景值含量的浓度释放到土壤中以提高 REE 的识别能力^[12,14],同时产生高昂的费用和人力投入,直接导致 REE 难以在较大尺度内使用。其次,REE 的释放方法对土壤性质有一定的影响,如撒播、溶液喷洒均可能堵塞土壤空隙,形成结皮等,从而影响土壤可蚀性;拌施影响土壤团聚体大小与稳定性、土壤空隙、水分入渗等,进而对土壤侵蚀过程造成明

显影响,因而在非耕作土壤难以适用;硝酸对土壤造成严重污染^[33];REE 在土壤中的大量释放,也会对当地土壤、植物、环境、人体健康等造成影响^[34-37]。再次,尽管运用 REE 示踪土壤侵蚀时,假设 REE 与土壤颗粒紧密粘结,而目前关于 REE 与土壤颗粒结合紧密程度及其结合机理尚不明确。这是揭示 REE 在侵蚀过程中随土壤颗粒的迁移特征、优化土壤侵蚀估算模型、明确 REE 示踪土壤侵蚀不确定性的瓶颈问题。此外,应用 REE 研究土壤侵蚀时忽略 REE 的淋溶迁移和植物利用转移,然而现有研究发现少量 REE 会随入渗水分向下层土壤迁移或者随坡面径流迁移;因淋溶或随径流迁移的 REE 因元素种类、受试土壤类型等的差异而不同。一般地,仅有少量 REE 淋溶损失,但部分元素淋溶损失率也可达到 15%~37% (表 1)^[31,38]。然而,现有研究多为使用蒸馏水在短时期内的淋溶试验结果,长时间内不同淋溶溶液(如 pH 值不同的降雨)造成的淋溶损失需进一步量化。此外,长期的植物吸收利用作用也应进一步研究^[39]。

表 1 REE 因淋溶或随径流迁移的特征

REE	土壤类型/研究区域	迁移类型	迁移特征
^a La ^[40]	中值粒径分别为 370, 3.76 μm 的沙粒和黏粒	淋溶迁移	在 0—1 cm 的沙层分别释放 16.8, 8.4, 4.2 mg/g La ₂ O ₃ , 经过 5 d 的蒸馏水淋洗后, 只有 <1% 的 La 淋溶到沙层下 1.0—1.5 cm 的黏层中
^b La, Pr, Nd, Sm, Gd ^[31]	迈阿密粉壤土	淋溶迁移	释放在 0—2.5 cm 的 REEs 经 40 d 的去离子水淋洗后(每 4 d 一次), RREs 仍主要存在于释放层(保留率>99%), 只有极少量 REE 迁移到 2.5—15.0 cm 内的采样层中, 临近释放层监测到少量迁移
^c La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Ho, Yb ^[14]	紫色土(中国湖北)	淋溶迁移	释放在 0—1 cm 的 REEs 经 48 h 的去离子水淋洗后在 0—14 cm 检测到, 各稀土元素均主要存在于释放层, 其中 La, Ce, Nd, Sm, Yb, 释放层保留率>95%, Eu, Ho 释放层保留率>80%, Tb 释放层保留率>60%, 1—2 cm 含量占 1%~19%, 其他各深层土壤中的迁移率均较小。Eu, Ho 和 Tb 在 1—14 cm 的总迁移率为 15%~37%
^c La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y ^[38]	福建省长汀县河田镇竹溪流域	径流迁移	径流中 REE 的平均浓度为 10.9 $\mu\text{g/L}$, 而泥沙中 REE 的平均浓度达到 2.3×10^5 mg/kg
^d La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y ^[41]	南方红壤(中国福建省长汀县)	径流迁移	模拟降雨过程中, 径流和泥沙中的稀土含量平均分别为 10.9 $\mu\text{g/L}$ 和 228.2 mg/kg

注:^a测定的土层深度包括:0—1.0 cm 的沙层和 1.0—1.5 cm 的黏层;^b测定的土层深度包括:0—2.5, 2.5—5.0, 5.0—7.5, 7.5—10.0, 10.0—12.5, 12.5—15.0 cm;^c测定的土层深度包括:0—1, 1—2, 2—3, 3—4, 4—5, 5—9, 9—14 cm;^d测定的土壤源于坡度为 37.5°, 大小为 1×0.5 m 的试验径流小区。

3.2 REE 示踪泥沙来源中存在问题

在泥沙来源研究方面,虽然前人根据 REE 示踪的侵蚀速率估算泥沙来源,然而 REE 在土壤颗粒中的分布与其他地球化学元素类似,受土壤颗粒粒径、有机质含量等的影响,进而影响泥沙来源判别的准确性^[42-43]。前人对不同类型土壤的研究发现,REE 主要富集在细颗粒中,然而却对 REE 主要富集在什么粒径范围的细颗粒中尚无一致的研究结果(表 2)。REE 在细颗粒中富集主要与该粒径范围土壤颗粒中石英、长石等矿物含量较低且黏粒中矿物的吸附作用较强密切相关,

但 REE 在不同粒径颗粒的富集程度及其与各类矿物含量的定量关系有待进一步研究,以明确 REE 的粒径富集规律^[44-45]。此外,泥沙来源研究中,REE 常与其他地球化学元素一起用作指纹因子,通过复合指纹识别技术判别泥沙来源^[46-47]。少有研究将 REE 单独用作指纹因子,进行泥沙来源判别。最后,从 REE 能完全溶解于硝酸的现象可知,在酸性土壤中以及受酸雨影响的区域,REE 与土壤颗粒粘附、迁移等行为可能发生改变,部分 REE 可能脱离土壤颗粒单独迁移、淋溶等,从而影响 REE 示踪土壤侵蚀和泥沙来源的准确性^[48]。

表 2 REEs 在不同粒径范围土壤颗粒的含量变化

REE	土壤类型	研究区域/方法	REE 含量随粒径的变化
^a La,Ce,Nd,Sm,Eu,Tb,Ho,Yb ^[14]	紫色土(中国湖北)	模拟降雨试验	REE 主要吸附在≤0.1 mm,尤其是<0.075 mm 的细颗粒内
^b La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu ^[49]	黄土、古土壤	古尔班通古特沙漠南缘,天山北坡东湾	≤0.02 mm 的颗粒中 REE 含量比粗颗粒中高得多
^c La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu,Sc,Y ^[43]	第四纪沉积物	俄罗斯普罗特瓦盆地(Protva basin)中部	<0.01 mm 的颗粒中 REE 含量较高
^d La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu ^[26]	风沙土、洪积物和湖泊沉积物	柴达木盆地	≤0.075 mm 的颗粒中 REE 含量明显高于粗颗粒中的含量,且 Sb,Bi,Cd,Cr,Li,Cs,Ni 的含量比上陆壳中的含量高
^e La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu ^[50]	黄土沉积物	伊犁盆地的昭苏、可克达拉和朝那	在<0.002 mm 的颗粒内明显富集,不同区域的黄土沉积物在 0.002~0.063 mm 内出现不同的贫化或富集特征
^f La ^[40]	沙质土壤、粉壤土、中值粒径分别为 370,3.76 μm 的沙粒和黏粒	英国(具体地点不详)	La 富集在<0.125 mm 的颗粒中

注：^a测定的颗粒粒径范围包括：<0.005,0.005~0.02,0.02~0.05,0.05~0.075,0.075~0.1,0.1~0.25,0.25~0.5,0.5~1.0,1.0~2.0 mm；^b测定的颗粒粒径范围包括：<0.005,0.005~0.02,0.02~0.075 和>0.075 mm；^c测定的颗粒粒径范围包括：<0.001,0.001~0.01,0.01~0.05,0.05~0.25,0.25~1.00 mm；^d测定的颗粒粒径范围包括：<0.075,0.075~0.5 mm；^e测定的颗粒粒径范围包括：<0.002,0.002~0.016,0.016~0.032,0.032~0.063,>0.063 mm。

4 结论与展望

前人通过大量研究在 REE 的释放方法、检测技术、模型构建等方面取得了重要进展,建立了较成熟的 REE 示踪土壤侵蚀和泥沙来源的技术框架,为运用稀土元素示踪水蚀、风蚀和泥沙来源研究提供了可靠的技术支撑。然而,REE 在示踪土壤侵蚀中存在应用尺度有限,选择性吸附影响示踪结果的准确性,大量释放影响土壤、植物、环境和人体健康等问题。因此,在未来的研究中应重点关注以下问题:(1) 明确 REE 与土壤颗粒的结合方式与机理。若人工释放的 REE 未与土壤颗粒紧密粘结,将对 REE 示踪的土壤侵蚀与泥沙来源结果可靠性造成巨大影响,加之部分 REE 会随径流、淋溶等迁移,设计科学试验弄清 REE 与土壤颗粒的结合方式与机理问题,是正确运用 REE 示踪土壤侵蚀与泥沙来源的基本前提。(2) 加强 REE 在其他土壤侵蚀类型中的应用研究。REE 示踪能够研究不同部位侵蚀状况,为风蚀、复合侵蚀等研究提供又一重要技术手段,如将 REE 应用于风水交错/复合侵蚀研究中对避免风水交错/复合侵蚀研究过程中因采用不同的研究方法造成风蚀和水蚀结果难以比较的问题具有重要意义。(3) 继续改进基于 REE 的土壤侵蚀速率估算模型。虽然目前已有模型校正了土壤颗粒分选的影响,却尚未考虑 REE 随淋溶、径流、植物吸收利用等的损失对土壤侵蚀,尤其是对长期土壤侵蚀观测结果准确性的影响。(4) 由于 REE 在环境迁移行为、测试分析等方面的优势,加之同族元素性质类似,元素间不易发生反应,在泥沙来源研究中,可消除元素性质差异、测定方法

差异等造成的测定误差水平变化等的影响,较其他地球化学元素可获得更准确的泥沙来源结果。因此,充分利用 REE 优势,将其与复合指纹识别法结合,既可以克服在较大尺度上 REE 难以运用的局限,也可以区分不同土壤类型、土地利用类型、地貌类型等的泥沙来源,为准确识别小流域、河流等较大区域的泥沙来源提供技术手段。

参考文献:

[1] 石辉,田均良,刘普灵,等.利用 REE 示踪法研究小流域泥沙来源[J].中国科学,1996,26(5):474-480.

[2] 肖海,刘刚,许文年,等.利用稀土元素示踪三峡库区小流域模型泥沙来源[J].水土保持学报,2014,28(1):47-52.

[3] Liu J G, Xiang R, Chen Z, et al. Sources transport and deposition of surface sediments from the South China Sea[J]. Deep-Sea Research Part I,2013,71:92-102.

[4] 吴倩云. REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J].安徽农业科学,2017,45(32):124-126,155.

[5] 刘普灵,田均良,周佩华,等.土壤侵蚀稀土元素示踪法操作技术研究[J].水土保持研究,1997,4(2):10-16,20.

[6] Polyakov V O, Nearing M A, Shipitalo M J. Tracking sediment redistribution in a small watershed: Implications for agro-landscape evolution [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004,29:1275-1291.

[7] Mahler B J, Bennett P C, Zimmerman M. Lanthanide-labeled clay: a new method for tracing sediment transport in karst[J]. Groundwater, 1998,36:835-843.

[8] 刘娜,王克林,张伟,等.土壤侵蚀及其评价、校验方法研究进展[J].中国农学通报,2011,27(18):1-6.

[9] Zhu M Y, Tan S D, Liu W Z, et al. A review of REE tracer method used in soil erosion studies[J]. Agricultural Sciences in China, 2010,9(8):1167-1174.

- [10] Guzman G, Quinton J N, Nearing M A, et al. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013,13(4): 816-833.
- [11] 据彤军,田均良,刘普灵,等. REE 示踪条带施放法研究坡面土壤侵蚀垂直分布规律[J]. *核农学报*, 1999,13(6):347-352.
- [12] van Pelt R S, Barnes M C W, Strack J E. Using rare earth elements to trace wind-driven dispersion of sediments from a point source[J]. *Aeolian Research*, 2018,32:35-41.
- [13] 石辉,田均良,刘普灵,等.小流域侵蚀产沙空间分布的模拟试验研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2):75-84, 95.
- [14] Liu G, Xiao H, Liu P L, et al. An improved method for tracing soil erosion using rare earth elements[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2016,16(5):1670-1679.
- [15] Zhang X C, Liu G, Zheng F L. A simple enrichment correction factor for improving erosion estimation using rare earth element oxide tracers[J]. *Vadose Zone Journal*, 2017, 16(12). DOI:10.2136/vzj2017.03.0068.
- [16] Tian J L, Zhou P H, Liu P L. REE trace method for studies on soil erosion[J]. *International Journal of Sediment Research*, 1994,9(2):39-46.
- [17] Wang C F, Wang B, Wang Y J, et al. Rare earth elements tracing interrill erosion processes as affected by near-surface hydraulic gradients[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,202:104673.
- [18] 吴文泉,倪世民,王军光.稀土元素示踪法探究坡面侵蚀进展与热点:基于 CiteSpace 计量分析[J]. *亚热带水土保持*, 2021,33(1):1-6.
- [19] 郑良勇,李占斌,李鹏,等.稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2010,26(3):87-91.
- [20] 王磊.多种外营力作用的黑土坡面复合土壤侵蚀过程与机理研究[D]. *陕西杨凌:西北农林科技大学*, 2020.
- [21] Song W, Liu P L, Yang M Y, et al. Using REE tracers to measure sheet erosion changing to rill erosion[J]. *Rare Earth*, 2003,21(5):587-590.
- [22] Zhang X C, Nearing M A, Garbrecht J D. Gaining insights into interrill erosion processes using rare earth element tracers[J]. *Geoderma*, 2017,299:63-72.
- [23] 魏霞,李占斌,尤洋,等.黄土高原坡沟系统侵蚀产沙过程的 REE 示踪研究[J]. *水土保持学报*, 2008,22(4): 11-15.
- [24] Zhang X C, Liu G, Zheng F L. Understanding erosion processes using rare earth element tracers in a pre-formed interrill-rill system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,625:920-927.
- [25] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. *水土保持学报*, 2020,34(4):21-30.
- [26] Du S S, Wu Y Q, Tan L H. Geochemical evidence for the provenance of aeolian deposits in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2018,32:60-70.
- [27] Tang Y, Han G L. Investigation of sources of atmospheric dust in Guiyang City, southwest China using rare earth element patterns[J]. *Journal of Earth System Science*, 2019, 129(1): DOI: 10.1007/s12040-019-1273-8.
- [28] Zhang X N, Zhang H C, Chang F Q, et al. Long-range transport of aeolian deposits during the last 32 kyr inferred from rare earth elements and grain-size analysis of sediments from Lake Lugu, Southwestern China [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2021,567:110248.
- [29] Dukes D, Gonzales H B, Ravi S, et al. Quantifying postfire aeolian sediment transport using rare earth element tracers[C]. *Agu Fall Meeting*, 2016,123(1): 288-299.
- [30] Wang L, Zheng F L, Zhang X C, et al. Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021,9(3):394-404.
- [31] Zhang X C, Nearing M A, Friedrich J M, et al. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001,65(5):1508-1515.
- [32] Collins A L, Blackwell M, Boeckx P, et al. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020,20:4160-4193.
- [33] Deasy C, Quinton J N. Use of rare earth oxides as tracers to identify sediment source areas for agricultural hillslopes[J]. *Solid Earth Discussions*, 2010, 2(2): 195-212.
- [34] Chen Z Y, Zhu X D. Accumulation of rare earth elements in bone and its toxicity and potential hazard to health[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008,24(1):88-91.
- [35] Migaszewski Z M, Galuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2015,45(5):429-471.
- [36] Zhang H, Feng J, Zhu W F, et al. Rare-earth element distribution characteristics of biological chains in rare-earth element-high background regions and their implications[J]. *Biological Trace Element Research*, 2000, 73(1):19-27.
- [37] 陈莺燕,刘文深,袁鸣,等.超富集植物对稀土元素吸收

- 转运解毒与分异的研究进展[J].土壤学报,2019,56(4):785-795.
- [38] Liang M X, Chen Z B, Lin Q, et al. Assessing the transport of rare earth elements in runoff in a small watershed developed on a coarse-grained granite area in southern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020,79(13):339. DOI:10.1007/s12665-020-09094-0.
- [39] 据彤军,刘普灵,石辉.稀土元素在作物体内的吸收及分布特征研究[J].中国稀土学报,2002,20(S):163-167.
- [40] Michaelides K, Ibraim I, Nord G, et al. Tracing sediment redistribution across a break in slope using rare earth elements[J]. *Earth Surface. Processes & Landforms*, 2010,35(5):575-587.
- [41] 张青青,陈志强,陈志彪,等.模拟降雨下离子型稀土矿区坡面产流产沙与稀土迁移规律[J].稀土,2018,39(5):56-69.
- [42] Ou X L, Chen Z B, Chen Z Q, et al. Effects of organic matter on the distribution of rare earth elements in red soil aggregates during ecological restoration[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021,18(11):2915-2928.
- [43] Samonova O A, Aseyeva E N, Chernitsova O V. Data on rare earth elements in different particle size fractions of topsoil for two small erosional landforms in central European Russia[J]. *Data in Brief*, 2020,30:105450.
- [44] 宫传东,戴慧敏,杨作升,等.长江沉积物稀土元素的粒度效应研究[J].地质学刊,2012,36(4):349-354.
- [45] 李洋,李徐生,韩志勇,等.黄土不同粒级稀土元素分布特征及其制约因素[J].土壤学报,2016,53(4):972-984.
- [46] Haddadchi A, Ryder D S, Evrard O, et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013,28(4):560-578.
- [47] Zhao Y, Zhou Q Z, Gao G L, et al. A new methodological framework coupling computational fluid dynamics and fingerprinting for assessment of aeolian sediment transport processes[J]. *Catena*, 2021,204:105372.
- [48] Land M, Ohlander B, Ingri J, et al. Solid speciation and fractionation of rare earth elements in a spodosol profile from northern Sweden as revealed by sequential extraction[J]. *Chemical Geology*, 1999,160(1/2):121-138.
- [49] Li X J, Zan J B, Yang R S, et al. Grain-size-dependent geochemical characteristics of Middle and Upper Pleistocene loess sequences from the Junggar Basin: Implications for the provenance of Chinese eolian deposits [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2019,538:109458.
- [50] Chen X L, Song Y G, Li J C, et al. Size-differentiated REE characteristics and environmental significance of aeolian sediments in the Ili Basin of Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017,143:30-38.

(上接第54页)

- [15] 陈首序,董玉祥.风蚀气候侵蚀力研究进展[J].中国沙漠,2020,40(5):65-73.
- [16] 蒋冲,陈爱芳,喻小勇,等.黄土高原风蚀和风水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力变化[J].干旱区研究,2013,30(3):477-484.
- [17] 雷金银,吴发启,马璠,等.毛乌素沙地土壤风蚀的气候因子分析[J].水土保持研究,2007,14(2):104-105.
- [18] 杨兴华,何清,李红军,等.塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].中国沙漠,2012,32(4):990-995.
- [19] 吴成永,陈克龙,曹广超,等.近30年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J].地理研究,2018,37(4):717-730.
- [20] 邹春霞,申向东,李夏子,等.内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):1172-1178.
- [21] 陈浩.黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [22] 邓鑫欣,张加琼,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀特征[J].水土保持研究,2019,26(3):1-6.
- [23] 熊炜,范文,秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J].灾害学,2014,29(1):228-233.
- [24] 海春兴,史培军,刘宝元,等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J].水土保持学报,2000,16(2):50-56.
- [25] 申雨晨,李双双,延军平,等.极点对称模态分解下陕西气候变化特征及影响因素[J].干旱区地理,2021,44(1):36-46.
- [26] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [27] 董玉祥,康国定.中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].水土保持学报,1994,8(3):1-7.
- [28] 环境保护部,国家发展改革委.生态保护红线划定指南(环办生态[2017]48号)[R].2017-5-27.