

前 言

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题，严重影响农业生产和粮食安全。常规土壤侵蚀研究方法，如径流小区法、测针法、模型模拟法及遥感测量法等很难用于研究土壤侵蚀内部的机理，土壤颗粒的分离、搬运、沉积过程，侵蚀泥沙来源等难点。随着对土壤侵蚀认知的逐步提升及国家生态文明建设的大力发展，解决土壤侵蚀中的难点问题具有重要意义。

稀土元素示踪法是根据试验需要将稀土元素示踪剂与土壤均匀混合后布设在试验区域的不同地形部位，通过天然降水或人工模拟降雨、放水冲刷等使之随泥沙同步运移，然后测定沉积泥沙样品中稀土元素的种类和含量，进而判定泥沙来源及不同地形部位的侵蚀程度。稀土元素示踪法采用化学吸附方法，在土壤上标记示踪元素，可真实地描述土壤侵蚀和沉积过程，因此近年来在国内外得到了大量应用。本书基于前沿研究成果和技术进展，详细介绍了稀土元素的基本性质、空间分布特征、稀土元素示踪法的可行性、稀土元素示踪法的详细操作方法及其在土壤侵蚀研究中的应用，包含多个实际研究案例，展示了稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域的不同应用效果，旨在推广该技术，提升研究结果的精确性和可靠性，为从事相关研究的科研人员提供实用指导，使政策制定者更好地理解土壤侵蚀的动态过程，从而制定有效的治理措施来保护土壤资源和生态环境。

全书共 7 章，详细阐述了稀土元素示踪法在土壤侵蚀中应用的研究进展、可行性、操作方法、具体应用、精度分析、不足与展望。各章撰写分工如下：第 1 章、第 7 章由刘刚撰写，第 2~4 章由刘亚撰写，第 5 章、第 6 章由刘刚、刘亚共同撰写，全书由刘刚负责统稿。本书部分内容源于作者研究团队肖海、王磊、师宏强、白茹茹的研究成果，在此一并表示感谢。

感谢水土保持与荒漠化整治全国重点实验室对本书出版的支持。感谢国家重点研发计划项目(2024YFD1501104)、国家自然科学基金项目(42277344、U22A20613)、中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA28010201)、陕西省杰出青年科学基金项目(2024JC-JCQN-39)、陕西省重点研发计划项目(2025GH-YBXM-062)对本书相关研究的资助。

本书内容虽经反复讨论和多次修改，但限于作者水平，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 稀土元素概述及其分布特征	1
1.1.1 稀土元素概述	1
1.1.2 我国稀土元素土壤背景浓度分布特征	2
1.2 稀土元素示踪法在土壤侵蚀研究中的必要性	3
参考文献	4
第 2 章 稀土元素示踪法在土壤侵蚀中应用的研究进展	6
2.1 研究方法	6
2.2 文献可视化	7
2.2.1 发文量	7
2.2.2 发文区域分布	8
2.2.3 发文作者	9
2.2.4 发文机构	9
2.3 研究热点	10
2.3.1 关键词共现	10
2.3.2 关键词聚类	11
2.3.3 关键词突现	16
2.4 稀土元素示踪法的发展历程	19
参考文献	20
第 3 章 稀土元素示踪法的可行性	21
3.1 稀土元素加入量	21
3.2 稀土元素的迁移特征	21
3.2.1 稀土元素的垂直迁移特征	22
3.2.2 稀土元素的水平迁移特征	23
3.3 稀土元素示踪的环境安全性	26
3.3.1 试验设计	26
3.3.2 试验结果	26
参考文献	28

第4章 稀土元素示踪法的操作方法	29
4.1 稀土元素示踪剂的选择原则	29
4.2 稀土元素示踪剂的配置	30
4.2.1 稀土元素示踪剂施放量	30
4.2.2 稀土元素与目标土壤混合方法	32
4.3 稀土元素示踪剂的布设方法	33
4.3.1 水平布设法	33
4.3.2 分层布设法	34
4.4 稀土元素浓度检测方法	36
4.4.1 X射线荧光光谱法	36
4.4.2 中子活化分析法	38
4.4.3 电感耦合等离子体质谱法	39
4.5 稀土元素浓度-侵蚀沉积速率转换模型	40
参考文献	42
第5章 稀土元素示踪法及其应用	43
5.1 示踪土壤团聚体周转	43
5.1.1 土壤样品采集	43
5.1.2 稀土元素标记团聚体	44
5.1.3 团聚体周转路径计算公式	45
5.1.4 监测期间降雨、土壤含水量及 CO ₂ 通量特征	48
5.1.5 监测期间团聚体粒径分布	49
5.1.6 监测期间团聚体周转过程	49
5.2 量化坡面侵蚀过程	51
5.2.1 供试土壤和稀土氧化物粉末	52
5.2.2 模拟降雨试验装置及操作流程	53
5.2.3 示踪区侵蚀计算	56
5.2.4 坡面产沙特征	57
5.2.5 不同侵蚀贡献率	58
5.2.6 侵蚀沟形态特征	60
5.2.7 坡面水力学参数变化	60
5.2.8 侵蚀泥沙粒径分布	63
5.3 辨识流域泥沙来源	65
5.3.1 小流域模型中的应用	66
5.3.2 野外小流域中的应用	76

5.4 量化坡面侵蚀速率/沉积速率时空分布	85
5.4.1 研究区概况	86
5.4.2 稀土元素示踪剂的选择及布设	87
5.4.3 季节性样品采集	88
5.4.4 基于稀土元素浓度的土壤侵蚀-沉积计算	90
5.4.5 季节性侵蚀导致的坡面侵蚀-沉积空间分布特征	91
5.4.6 季节性侵蚀导致的坡面泥沙迁移的空间格局	92
5.5 量化不同垄作方式对泥沙迁移的影响	94
5.5.1 研究样地概况	94
5.5.2 径流场及稀土元素示踪剂的布设	96
5.5.3 土壤样品的采集与分析	98
5.5.4 基于稀土元素浓度的土壤侵蚀量/沉积量计算	100
5.5.5 土壤侵蚀量/沉积量对耕作方式的响应	100
5.5.6 土壤迁移对垄作方式的响应	104
5.6 评估坡耕地横垄抗蚀稳定性	109
5.6.1 研究区概况	110
5.6.2 径流小区布设	110
5.6.3 稀土元素示踪剂的选择、布设及测定	110
5.6.4 示踪区侵蚀计算	111
5.6.5 自然降雨特征	112
5.6.6 横垄系统的稳定性	113
5.6.7 横垄侵蚀不同阶段泥沙来源及贡献率	114
5.7 验证和修正土壤侵蚀预测模型	118
5.7.1 验证 WEPP 模型泥沙互馈关系	118
5.7.2 修正模型参数	127
5.8 示踪土壤风蚀颗粒来源及路径	135
5.8.1 稀土元素示踪剂的选择与施放	136
5.8.2 风蚀颗粒的收集	136
5.8.3 风蚀颗粒的来源及移动路径	137
5.9 示踪土壤地下渗漏过程	142
5.9.1 研究区概况	142
5.9.2 稀土元素示踪剂的选择及布设	143
5.9.3 土壤样品的采集与分析	145
5.9.4 土层蠕动特征	146
5.9.5 土壤内稀土元素浓度的变化特征	146

5.9.6 岩土界面对土壤渗漏的影响	148
参考文献	149
第 6 章 稀土元素示踪法的精度	155
6.1 布设方法引起的误差	155
6.2 不均匀吸附引起的误差	156
6.3 粒径修正公式	161
6.3.1 基于侵蚀泥沙全粒级分选特征的粒径修正公式	161
6.3.2 基于侵蚀泥沙细颗粒富集比的粒径修正公式	164
参考文献	172
第 7 章 稀土元素示踪法的不足与展望	174
7.1 稀土元素示踪法的不足	174
7.2 稀土元素示踪法的展望	174

第 1 章 绪 论

1.1 稀土元素概述及其分布特征

1.1.1 稀土元素概述

1787 年，在瑞典的一采石场中发现了一种独特的黑色矿物，其中含有一系列未知的元素。因此种矿物当时较为稀少，且 18 世纪化学界将不溶于水、性质稳定的金属氧化物统称为土，故从中提取的元素被命名为稀土元素(rare earth element, REE)。到目前为止，共发现 17 种 REE，包括镧系的 15 种元素及地球化学行为与镧系元素相似的钪(Sc)和钇(Y)元素。根据稀土硫酸盐溶解度的差异，REE 可分为轻稀土和重稀土(Edahbi et al., 2019)，其中轻稀土包括镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)及铕(Eu)；重稀土包括钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)、钇(Y)及钪(Sc)。通常，轻稀土比重稀土在地壳中的含量多。

REE 是典型的金属元素，由于其 4f 亚层的轨道电子被外层的 5s 和 5p 层电子有效屏蔽，不能参与成键，因此具有两个突出特点：一是化学性质非常相似，使得稀土元素彼此分离非常困难；二是物理性质差异明显，这给稀土元素的开发应用提供了多方面机遇(表 1-1)。

表 1-1 稀土元素理化性质

分组	中文	英文	原子序号	元素符号	熔点/℃	沸点/℃	密度/(g/cm ³)
轻稀土	镧	lanthanum	57	La	920	3464	6.16
	铈	cerium	58	Ce	795	3443	6.77
	镨	praseodymium	59	Pr	931	3520	6.77
	钕	neodymium	60	Nd	1024	3074	7
	钷	promethium	61	Pm	1042	3000	7.26
	钐	samarium	62	Sm	1072	1791	7.54
	铕	europium	63	Eu	822	1597	5.24
重稀土	钆	gadolinium	64	Gd	1313	3273	7.9
	铽	terbium	65	Tb	1356	3230	8.23
	镝	dysprosium	66	Dy	1412	2562	8.55

续表									
元素	样点数	最小值/ (mg/kg)	中位值/ (mg/kg)	最大值/ (mg/kg)	算术平均值/ (mg/kg)	算术标准差 /(mg/kg)	几何平均值 /(mg/kg)	几何标准差 /(mg/kg)	95%范围值 /(mg/kg)
铈	818	0.005	0.59	3.1	0.63	0.26	0.58	1.523	0.25~1.33
镧	831	0.07	4.03	14.4	4.13	1.309	3.93	1.374	2.08~7.43
钬	828	0.04	0.84	3.04	0.87	0.279	0.83	1.374	0.44~1.56
铒	830	0.013	2.47	9.37	2.54	0.813	2.42	1.371	1.29~4.55
铥	830	0.04	0.36	1.4	0.37	0.115	0.35	1.367	0.19~0.62
镱	836	0.02	2.35	7.68	2.44	0.786	2.32	1.363	1.25~4.32
镱	820	0.002	0.35	1.9	0.36	0.108	0.35	1.337	0.19~0.62
TR	840	18	181.1	582.7	187.6	58.6	179.1	1.36	97.1~330.2
Σc _q	823	15.4	142.8	492.6	143.2	41.46	136.9	1.36	74.0~253.3
Σc _z	816	2.6	37.9	185	37.2	10.41	35.6	1.36	19.8~65.8

注：TR 为稀土元素总浓度，mg/kg； Σc_q 为轻稀土元素总浓度($\Sigma c_q=c_{La}+c_{Ce}+\cdots+c_{Eu}$)，mg/kg； Σc_z 为重稀土元素总浓度($\Sigma c_z=c_{Gd}+\cdots+c_{Lu}+c_Y$)，mg/kg。

1.2 稀土元素示踪法在土壤侵蚀研究中的必要性

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题，不仅造成土壤资源的损失，降低土地生产力，而且影响农业生产和粮食安全。此外，侵蚀泥沙的输移、沉积还会造成水库、塘库淤积及面源污染，给人类生产生活带来严重影响。据估算，全球水土流失面积约 1643 万 km²，占地表总面积的 10.95%，每年随土壤物质侵蚀和地表径流损失的植物营养元素价值约 50 亿美元(Eswaran et al., 2019; Borrelli et al., 2017)。我国是世界上遭受土壤侵蚀较为严重的国家之一，《中国水土保持公报(2022 年)》显示，全国水土流失面积 265.34 万 km²(未统计香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区的相关数据)，约占国土面积的 27.64%(中华人民共和国水利部, 2023)。因此，开展土壤侵蚀机理、过程、发生发展规律研究，对水土流失综合治理和生态环境建设宏观决策具有重要意义。

常规土壤侵蚀的研究方法主要包括径流小区法、模型模拟法及遥感测量法等(郭兴月等, 2023; 何发坤等, 2021; 左长清和郭乾坤, 2016)。径流小区法是研究土壤侵蚀最常用的手段，一般包括边埂围成的坡面、集流槽、径流和泥沙集蓄设备、保护带及排水系统，主要用于研究某一影响因子(如坡度、坡长、植被覆盖度、土壤类型等)对径流、泥沙的影响(左长清等, 2016)。模型模拟法主要包括经验模型(通用土壤流失方程(USLE)、中国土壤流失方程(CSLE)等)，以及基于物理过程

的模型(水蚀预报项目(WEPP)模型、欧洲土壤侵蚀模型(EUROSEM)等),通过输入特定参数可估算次降雨或多年平均径流量及土壤侵蚀量(郭兴月等, 2023)。遥感测量法主要用于较大区域土壤侵蚀监测,通过对地表植被、地形、土地利用等信息进行提取分析,结合当地气象数据,进而判定区域土壤侵蚀现状(何发坤等, 2021)。以上方法对研究土壤侵蚀现状及影响因子方面具有重要意义,但难以研究土壤侵蚀的机理,土壤颗粒的分离、搬运、沉积过程,以及侵蚀泥沙来源等难点问题。深入开展这些方面的研究,对于深入理解土壤侵蚀机理,开发土壤侵蚀预报模型具有重要的科学价值,对于我国进行生态环境高质量发展与开展生态文明建设具有重要的现实意义。

为解决以上难点问题,近几十年发展出了以核素示踪、磁性示踪及 REE 示踪等为代表的土壤侵蚀示踪法(丁晋利等, 2013; 汤振权等, 2011; 鲍玉海等, 2007)。核素示踪法的原理如下:随降雨或尘埃沉降到地面的放射性核素被土壤和有机质强烈吸附,在土壤表层聚集,并且难以被水淋溶。测定研究区土壤核素浓度和空间分布,比较核素浓度与环境核素的输入量,即背景浓度的差异来表征该区的侵蚀或沉积。测量点的核素浓度超过背景浓度,表明该点存在沉积过程;测量点的核素浓度低于背景浓度,表明该点发生侵蚀过程(Greenwood et al., 2014)。磁性示踪法是指将和土壤具有相似密度和粒径级配的磁性示踪剂与土壤按照一定的质量比均匀混合,磁性示踪剂在土壤侵蚀过程中随泥沙颗粒一起同步运动,再利用磁化率仪等分别测定土壤侵蚀发生前后的土壤磁性参数。土壤发生侵蚀或沉积的区域可以由磁性参数的变化来确定(于悦等, 2022)。REE 示踪法是根据试验需要将 REE 示踪剂(常用稀土氧化物、稀土硝酸盐等稀土元素标记的矿物颗粒)与土壤均匀混合后布设在试验区域的不同地形部位,通过天然降水或人工模拟降雨、放水冲刷等使之随泥沙同步运移,然后测定泥沙样品中 REE 的种类和含量,进而判定泥沙来源及不同地形部位侵蚀速率。由于 REE 示踪法采用的是化学吸附的方法,在土壤上标记示踪元素,因此客观上并不改变泥沙的粒径和密度,可真实地描述土壤侵蚀和沉积过程(汤振权等, 2011)。REE 示踪法是 20 世纪 80 年代中后期发展起来的一门技术,美国学者 Knaus 和 van Gent(1989)最初于 1986 年用 REE 示踪法成功测定了沼泽地的演变,中国科学院水利部水土保持研究所田均良等(1992)首次将 REE 示踪法用于研究黄土高原土壤侵蚀,并确定了示踪元素的施放方法及施放浓度的计算方法。随着 REE 浓度测定技术及施放方法的不断创新,利用 REE 示踪法开展土壤侵蚀规律的研究在国内外逐渐盛行。

参 考 文 献

鲍玉海, 贾松伟, 贺秀斌, 2007. 土壤侵蚀磁性示踪技术. 水土保持研究, 14(6): 5-9.

- 丁晋利, 巴明廷, 郑晓梅, 2013. 多核素联合示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用进展. 中国水土保持, (5): 39-42.
- 郭兴月, 王添, 程圣东, 等, 2023. 近 30 年土壤侵蚀模型研究进展. 泥沙研究, 48(1): 65-72.
- 何发坤, 蒲生彦, 肖胡萱, 等, 2021. 遥感技术在土壤退化中的应用研究进展. 农业资源与环境学报, 38(1): 10-19.
- 汤振权, 刘刚, 许文年, 2011. 稀土元素示踪技术及其在土壤侵蚀研究中的应用. 中国稀土学报, 29(5): 515-522.
- 田均良, 周佩华, 刘普灵, 等, 1992. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. 水土保持学报, (4): 23-27.
- 魏复盛, 刘廷良, 滕恩江, 等, 1991. 我国土壤中稀土元素背景值特征. 环境科学, (5): 78-82, 97.
- 叶前林, 曾庆根, 金蕴秋, 等, 2025. 中美稀土发展形势与贸易竞争研究. 中国矿业, 34(2): 256-264.
- 于悦, 张科利, 刘亮, 等, 2022. 磁化率技术在土壤侵蚀领域的研究进展. 中国水土保持科学(中英文), 20(3): 135-141.
- 中华人民共和国水利部, 2023. 中国水土保持公报(2022 年). (2023-08-25)[2024-01-18]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/>.
- 左长清, 郭乾坤, 2016. 关于径流小区若干技术问题的研究. 中国水土保持, (6): 43-47, 77.
- Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. , 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. Nature Communication, 8: 2013.
- Edahbi M, Plante B, Benzaazoua M, 2019. Environmental challenges and identification of the knowledge gaps associated with REE mine wastes management. Journal of Cleaner Production, 212: 1232-1241.
- Eswaran H, Lal R, Reich P F, 2019. Land degradation: An overview. Response to Land Degradation. Boca Raton: CRC Press.
- Greenwood P, Walling D E, Quine T A, 2014. Using cesium-134 and cobalt-60 as tracers to assess the remobilization of recently-deposited overbank-derived sediment on river floodplains during subsequent inundation events. Earth Surface Process and Landform, 39: 228-244.
- Knaus R M, van Gent D L, 1989. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland. III. A new soil horizon marker method for measuring recent accretion. Estuaries, 12(4): 269-283.

第 2 章 稀土元素示踪法在土壤侵蚀中应用的研究进展

土壤侵蚀是土地退化、生态环境恶化的主要原因之一，其过程复杂且受多种因素影响(Liu et al., 2019)。传统的土壤侵蚀研究方法，如径流小区法、侵蚀针法等存在一定局限性，难以精确揭示侵蚀过程的空间异质性和动态变化(汤振权等, 2011)。稀土元素示踪法作为一种新兴方法，通过在土壤中添加稀土元素氧化物作为示踪剂，利用其在侵蚀过程中的迁移规律来定量分析土壤侵蚀量和泥沙来源，为土壤侵蚀研究提供了新的视角。

随着科学研究的深入发展，知识量呈指数级增长，如何高效地梳理和把握研究领域的脉络与趋势成为关键问题。CiteSpace 5.8. R3 是一款基于 Java 语言开发的科学文献分析软件，能够通过对文献数据的可视化分析，揭示某一研究领域的发展历程、研究热点和前沿趋势(陈悦等, 2015)。本章运用 CiteSpace 5.8. R3 软件对稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域的相关文献进行分析，旨在梳理该领域的研究现状，明确研究热点与前沿，为进一步深入研究提供参考。

2.1 研究方法

本章采用文献计量分析与可视化结合的研究方法，以 CiteSpace 5.8. R3 软件(一款聚焦科学知识结构与演化规律的可视化工具)为核心分析平台，系统梳理稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域的研究进展。首先，以 Web of Science 数据库的核心合集和中国知网(CNKI)数据库为数据源，通过检索中文关键词“稀土元素”“稀土氧化物”“土壤侵蚀”“产沙”“泥沙来源”，及其对应的英文关键词“rare earth element”(稀土元素)、“rare earth oxide”(稀土氧化物)、“soil erosion”(土壤侵蚀)、“sediment yield”(产沙)、“sediment source”(泥沙来源)来获取相关论文。在前期文献查阅过程中，已明确首篇论文出现在 1992 年，因此时间范围设定为 1992 年 1 月~2025 年 8 月。检索过程中限定文献类型为“学术论文”，排除会议摘要、书评等非研究性文献。基于获取的相关论文，根据标题与摘要快速排除无关文献，如仅讨论稀土元素的矿产开发、植物吸收，或单纯研究土壤侵蚀而未涉及稀土元素示踪技术的文献。此外，删除获取的 Web of Science 与中国知网

(CNKI)中因中英文互译导致的重复文献。最终纳入分析的有效文献共 190 篇,其中中文文献 125 篇,英文文献 65 篇。用兼容 CiteSpace 5.8. R3 数据处理的纯文本形式导出入选的文献记录,信息涵盖作者、机构、地区、标题、出版源、关键词、发表年份及摘要等数据。之后在 CiteSpace 5.8. R3 软件中进行文献可视化分析、关键词共现分析及关键词突现分析,以揭示稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域的研究热点和演变趋势。

2.2 文献可视化

2.2.1 发文量

统计了 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域中英文文献的发表数量,清晰呈现该领域研究的时间分布特征,如图 2-1 所示。从图中可以看出,首篇相关中文文献出现在 1992 年,首篇相关英文文献出现在 1999 年,这表明对于稀土元素示踪法在土壤侵蚀方面的研究而言,国内起步更早。

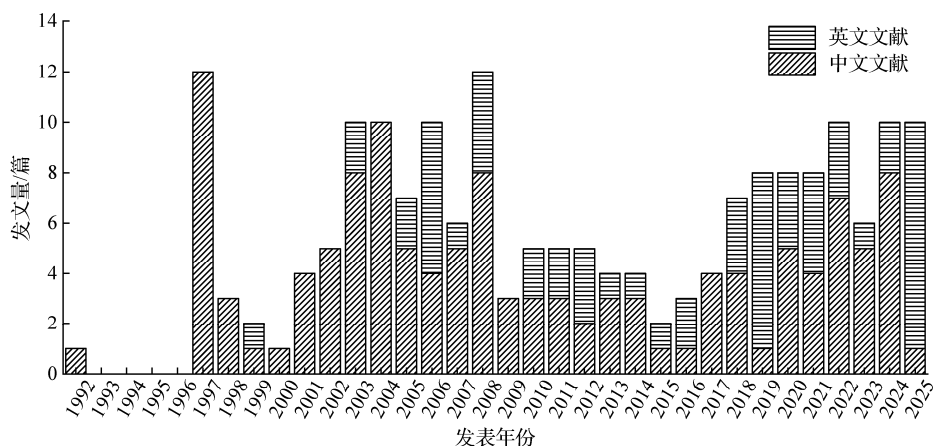


图 2-1 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域研究相关文献发文量

20 世纪 90 年代,研究起步阶段的发文量极少,1992 年仅 1 篇中文文献,1993~1995 年无成果发表,反映出此时期该研究方向未受广泛关注。1997 年,发文量出现明显突破,中文文献达 12 篇,随后的 1998 年出现回落,显示了早期探索存在波动。21 世纪初(2000~2005 年),领域发展加速,中文文献占主导地位。2003~2004 年每年均有 10 篇左右文献发表,英文文献占比虽然低但逐年增加,说明国内研究率先发力,国际关注度缓慢提升。2006~2010 年,发文量略有起伏。此阶段发文仍以中文文献主导,但英文文献较之前明显增加,两者共同支撑起研

究热度，反映该阶段国内外研究互动增强。2011~2015 年，该研究领域整体陷入低谷，中英文发文量均在 5 篇以内。2016 年后，发文量呈现增长趋势，英文文献占比持续扩大。2018~2025 年，英文文献多次与中文文献持平甚至反超，表明国际研究力量深度参与，该领域逐渐迈向全球化、多元化发展阶段，研究热度与影响力显著提升，展现出稀土元素示踪法在当代土壤科学、水土保持等领域越来越重要的地位。

2.2.2 发文区域分布

表 2-1 统计了 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域中英文文献的区域分布特征，直观呈现出不同国家与地区在该领域的研究参与度差异。从表 2-1 可见，中国以 54.51%的发文量占比，成为该领域研究的绝对主导力量。中国发表文献数量远超其他国家，反映出中国稀土元素示踪法在土壤侵蚀研究中投入的科研力量、资源及取得的成果具有显著优势，这与中国面临的土壤侵蚀防治需求、丰富的稀土资源及科研团队的持续关注密切相关。美国以 28.83%的发文量占比位居第二，显示其在该领域具备较强研究实力，可能依托其成熟的土壤科学研究体系和先进的分析技术。英国、西班牙、巴西等国家发文量占比较小(均低于 3%)，其他国家合计占 11.26%，说明这些国家或因科研资源侧重、土壤侵蚀问题关注程度不同，在该领域研究相对薄弱。

表 2-1 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域的文献区域分布特征

国家	发文量/篇	占比/%
中国	121	54.51
美国	64	28.83
英国	6	2.70
西班牙	3	1.35
巴西	3	1.35
其他国家	25	11.26

从空间分布看，文献产出集中于少数国家，形成以中国、美国为核心，其他国家参与度低的格局。这种分布特征，既受不同国家土壤侵蚀类型(如中国水蚀、风蚀等多元侵蚀，美国不同区域的土壤退化问题)、生态保护需求驱动，也与各国科研投入、稀土分析技术发展水平相关。未来，随着全球土壤生态保护协同需求增加，有望推动更多国家参与稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域的研究，促进成果交流与全球土壤侵蚀防治实践的融合。

2.2.3 发文作者

表 2-2 为 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域发文量排名前 10 的中英文文献作者。由表 2-2 可以看出,在 1992 年 1 月~2025 年 8 月,稀土元素示踪法在土壤侵蚀研究领域发文量较多的中文文献作者有刘普灵、琚彤军、杨明义、李占斌及田均良等,英文文献作者有 Liugang、Xiaohai、Shihongqiang、Chenzhibiao 及 Liupuling 等。

表 2-2 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域发文量排名前 10 的中英文文献作者

中文文献作者	发文量/篇	英文文献作者	发文量/篇
刘普灵	30	Liugang	8
琚彤军	13	Xiaohai	4
杨明义	14	Shihongqiang	3
李占斌	12	Chenzhibiao	3
田均良	11	Chenzhiqiang	3
李雅琪	9	Liupuling	3
宋炜	8	Zhengfenli	3
肖海	7	Zhangqiong	3
王焯	7	Guozhen	3
周佩华	6	Zhangjiaqiong	3

对于中文文献作者,以刘普灵为主的研究团队具有突出的影响力,该团队主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,在国内首先运用了稀土元素示踪法开展了土壤侵蚀相关的一系列研究,并介绍了稀土施放量、施放方法的具体操作。对于英文文献作者,以 Liugang 为主的研究团队具有突出的影响力,该团队主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,应用稀土元素示踪法主要开展土壤侵蚀过程、流域产沙机制与泥沙来源、土壤侵蚀模型修正等研究。

2.2.4 发文机构

表 2-3 为 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域发文量排名前 10 的中英文文献发文机构。其中,中文发文量较多的机构为中国科学院、西北农林科技大学、西安理工大学、沈阳农业大学、福建师范大学及华中农业大学;英文发文量较多的机构为中国科学院(Chinese Academy of Sciences)、美国农业部农业研究服务局(USDA-ARS)、西北农林科技大学(Northwest A&F University)及中华人民共和国水利部(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China)。

表 2-3 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域发文量排名前 10 的中英文文献发文机构

中文发文机构	发文量/篇	英文发文机构	发文量/篇
中国科学院	50	中国科学院(Chinese Academy of Sciences)	19
西北农林科技大学	20	美国农业部农业研究服务局(USDA-ARS)	15
西安理工大学	16	西北农林科技大学(Northwest A&F University)	13
沈阳农业大学	11	中华人民共和国水利部(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China)	8
福建师范大学	7	圣保罗大学(University of São Paulo)	3
华中农业大学	7	福建师范大学(Fujian Normal University)	3
三峡大学	7	兰卡斯特大学(University of Lancaster)	3
浙江大学	5	四川华标检测技术有限公司(Sichuan Huabiaoce Testing Technology Co. Ltd.)	3
北京林业大学	5	中国农业大学(China Agricultural University)	3
中国农业大学	3	北京林业大学(Beijing Forestry University)	2

2.3 研究热点

2.3.1 关键词共现

表 2-4 为 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域中英文文献中排名前 10 的关键词。其中，中文关键词出现频率较多的为土壤侵蚀、稀土元素、细沟侵蚀、坡面、泥沙来源、示踪法、坡面侵蚀、植物篱、侵蚀过程等；英文关键词出现频率较多的为 soil erosion(土壤侵蚀)、rare earth element(稀土元素)、oxide(氧化物)、tracer(示踪剂)、rill erosion(细沟侵蚀)、transport(搬运)、redistribution(再分布)、erosion(侵蚀)、sediment source(泥沙来源)及 interrill erosion(细沟间侵蚀)。中英文关键词间略有差异，中文关键词倾向于坡面土壤侵蚀过程、泥沙来源及防控措施，而英文关键词倾向于土壤侵蚀的内部机理，如土壤颗粒的分离、搬运及再分布过程。

表 2-4 1992 年 1 月~2025 年 8 月稀土元素示踪法在土壤侵蚀领域中英文文献中排名前 10 的关键词

中文关键词	频率	英文关键词	频率
土壤侵蚀	44	soil erosion (土壤侵蚀)	31