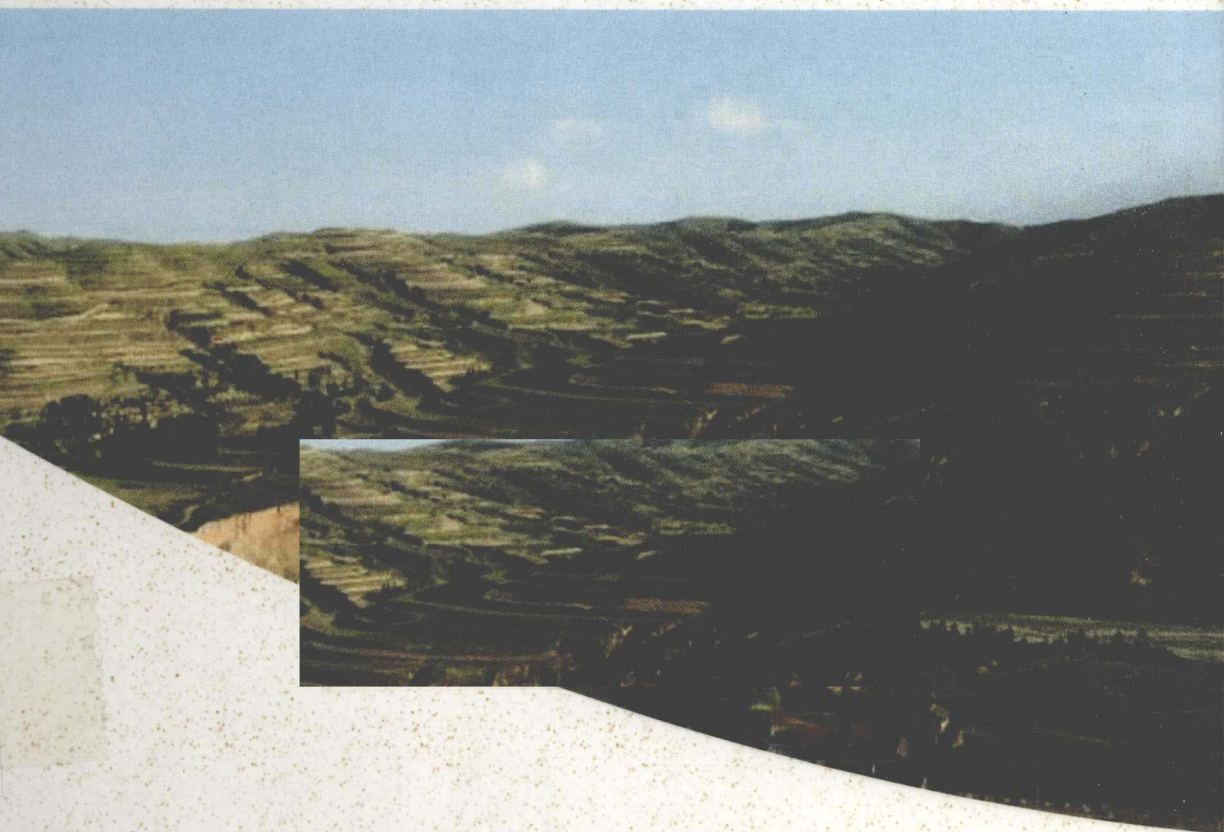


● “十一五”国家重点图书出版规划项目 ●

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

坡面水蚀输沙动力过程 试验研究

王 琯 李占斌/著



科学出版社
www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

坡面水蚀输沙动力 过程试验研究

王 瑄 李占斌 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书采用天然降雨坡面试验、变坡土槽放水冲刷试验,结合稀土元素(REE)复合示踪技术,系统地分析了坡面侵蚀动力与侵蚀产沙的时空变化规律。本书初步阐明了径流冲刷条件下坡面侵蚀产沙特征的时空变化规律,主要水蚀动力参数与坡面土壤剥离、输移、沉积过程作用关系;建立了坡面不同空间部位径流含沙量与主要水动力参数的耦合关系,并构建了径流冲刷条件下坡面径流侵蚀产沙的计算模型;揭示了土壤剥蚀率随水蚀动力和水流输沙能力非线性变化的特征,阐明了坡面土壤剥蚀率随水流含沙量变化的特征,建立了计算土壤剥蚀率的经验模型;系统揭示了天然降雨条件下坡面侵蚀产沙的时空变化特征、不同雨型对坡面产汇流侵蚀产沙的变化过程的作用机制,阐明了天然降雨条件下土壤剥蚀率与水流含沙量关系时空变化的非线性特征。

本书适合从事土壤侵蚀研究及其相关领域的工作者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

坡面水蚀输沙动力过程试验研究/王瑄,李占斌著.

—北京:科学出版社,2010

(土壤侵蚀与旱地农业系列专著)

ISBN 978-7-03-026539-5

I. 坡… II. ①王… ②李… III. 土壤侵蚀:水蚀-输沙-动力试验-研究 IV. S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第015165号

责任编辑:张震/责任校对:邹慧卿

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

封面照片提供:田均良

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张:13

印数:1—1 200

字数:258 000

定价:52.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

总 序

资源合理利用与生态环境保护已成为 21 世纪中国西部开发的战略核心。实施这一战略，对粮食和环境安全有着举足轻重的作用。开展土壤侵蚀和旱地农业研究是实施上述战略的关键。土壤侵蚀与旱地农业是黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的两个基本研究方向。该系列专著针对实验室两个研究方向，以黄土高原土壤侵蚀环境调控和提高旱地农业生产力为基础，从土壤侵蚀过程及其调控、土壤侵蚀模型及预测、水土流失、土壤水分养分循环机制及其调控、土壤侵蚀与旱地农业研究的新方法和新技术等领域出发，系统反映实验室基于大量重要研究项目资助获得的研究成果。

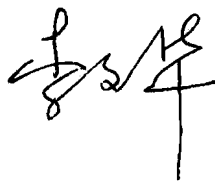
《土壤侵蚀与旱地农业系列专著》具有以下特点：一是长期和集体研究工作的结晶。作者以他们自己的研究工作累积为基础，并综合国内外有关专家、学者的研究成果，较充分反映了我国土壤侵蚀与旱地农业研究取得的成就。二是具有坚实的科学立论基础，作者以严肃、认真的科学态度，从黄土高原实际出发，理论联系实际，观点明确，论据充分，是具有较高权威性的系列专著。三是有很强的应用性，主要基于土壤侵蚀与旱地农业的相关理论，对如何控制水土流失和提升旱地农业生产力提出关键技术措施。

该系列专著各分册相对独立，但又相互补充，体系完整，资料系统，涉及地学和农业科学的诸多领域，是一套在理论上具有一定深度、实践上具有一定广度的丛书。该丛书的出版发行对推动水土保持、优化旱地农业水肥资源管理和提高农业生产力将会产生积极作用。系列专著资料丰富，数据可靠，内容翔实，图文并茂，是理论联系实践的著作。它不仅可以作为地学、生态学、气象学、土壤学、植物营养学、农学等相关专业科技工作者的参考书，而且可作为高等院校相关专业

教学的重要参考书。

我相信这套专著的出版，一定会受到学术界的欢迎，将为推动土壤侵蚀和旱地农业学科建设发挥其应有的作用。

中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to be the name 'Li Hua' (李华) in a stylized cursive script.

2009. 10. 24

前 言

土壤侵蚀是世界头号环境问题，我国是土壤侵蚀最严重的国家之一，全国的土壤侵蚀面积高达 492 万 km^2 ，占国土面积的 51.2%。水蚀面积为 179.6 万 km^2 ，因水蚀全国每年丧失表土 50 亿 t，其中耕地表土流失量约 33 亿 t，占流失总量的约 66%。因水蚀导致的土地生物或经济产量明显下降的土地约 37.8 万 km^2 ，占水蚀面积的 21.05%，造成了明显的土地退化。

最新的耕地普查结果表明：在我国 13 251.95 万 hm^2 耕地总面积中，坡耕地面积为 4652.20 万 hm^2 ，占耕地总面积的 35.11%，其中 $8^\circ \sim 25^\circ$ 的缓坡耕地为 3927.45 万 hm^2 ，大于 25° 的陡坡耕地为 724.75 万 hm^2 ，分别占耕地总面积的 29.64% 和 5.47%。根据全国第二次土壤普查，全国耕地的水土流失面积共有 4540.56 万 hm^2 ，占耕地面积的 34.26%，且主要分布在大于 8° 的坡耕地上。坡耕地是我国重要的农业资源，同时也是水土流失多发部位。因此，根据我国实际情况，开展坡面土壤侵蚀分散、输移和沉积过程及其相互关系的研究，对于揭示土壤侵蚀动力过程机理，建立具有中国特色的土壤侵蚀预报模型，进而指导水土保持生产实际具有十分重要的理论和实用前景。

本书作者从事土壤侵蚀产沙动力过程方面的研究十几年，积累了一定试验研究经验，在坡面水蚀动力过程机理方面取得了一些认识。本书是这些年来研究工作的总结。

本书第 1 章为绪论；第 2 章主要介绍室内坡面水蚀产沙过程模拟试验材料及方法，包括 REE 示踪方法；第 3 章到第 6 章是根据室内土槽径流冲刷试验结合 REE 示踪方法的试验结果撰写的，反映坡面水流动力特性与坡面土壤剥离、输移、沉积过程；第 7 章到第 10 章是根据天然降雨径流小区试验结合 REE 示踪方法的试验结果，主要介绍坡面侵蚀产沙时空演变过程、土壤剥蚀、沉积变化与水蚀动力因子和水流含沙量的耦合作用。本书内容主要由王瑄和李占斌共同撰写完成，铁岭市环境保护科学研究院尚佰晓参与了第 7 章和第 10 章的撰写。

本书的完成融入了很多人的心血。田均良研究员、邵明安研究员、沈冰教授、雷廷武研究员、刘普灵研究员、杨明义研究员等在本研究中给予了热心的指导，李鹏、鲁克新、郑良勇、李雯、刘峰、喻石、尚佰晓等参与了部分试验工作。作者在书稿形成过程中还得到了很多同行专家的帮助，在此一并表示感谢！

本书试验阶段得到了国家自然科学基金项目“坡沟系统侵蚀产沙过程与调控机理试验研究”（40771124）和辽宁省自然科学基金项目“坡面水蚀动力过程试验研究”（20062110）的资助，在此表示感谢。

由于土壤侵蚀是一个非常复杂的过程，水土流失治理工作任重道远，再加上我们的认识水平有限，书中难免有不足甚至谬误之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2009. 09. 30

目 录

总序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 立题目的和意义	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 土壤侵蚀研究方法	2
1.2.2 水流强度指标	6
1.2.3 水流分离土壤及泥沙输移的控制参数	12
1.3 主要研究内容与拟解决的关键问题	14
1.3.1 主要研究内容	14
1.3.2 拟解决的关键问题	15
1.4 主要研究方法与技术路线	15
1.4.1 研究方法	15
1.4.2 技术路线	15
第 2 章 径流冲刷试验材料及方法	17
2.1 试验材料	17
2.1.1 试验用土	17
2.1.2 稀土元素	17
2.2 试验装置	18
2.2.1 放水试验系统	18
2.2.2 试验土槽	18
2.3 试验设计	18
2.4 侵蚀过程的示踪方法——REE 方法	22
第 3 章 坡面冲刷过程中侵蚀产沙时空分布规律	24
3.1 分析方法	24
3.1.1 样品采集及检测	24
3.1.2 分析质量控制与精度检验	24

3.2 产沙量与精度分析	25
3.2.1 三坡段试验产沙量及精度分析	25
3.2.2 两坡段试验产沙量及精度分析	26
3.3 坡面侵蚀时空变化规律	27
3.3.1 三坡段试验坡面侵蚀时空变化过程	27
3.3.2 两坡段试验坡面侵蚀时空变化过程	35
3.4 小结	41
第4章 坡面产沙量与水蚀因子动态响应过程	43
4.1 薄层水流的流速	43
4.1.1 薄层水流流速的测定	43
4.1.2 薄层水流的雷诺数和弗劳德数	43
4.1.3 各坡段流速随时间变化规律	46
4.2 水流剪切力	48
4.2.1 各坡段水流剪切力随时间的变化规律	48
4.2.2 各坡段水流剪切力随坡度、流量的变化规律	50
4.3 水流功率	54
4.3.1 各坡段水流功率随时间的变化规律	54
4.3.2 水流功率随坡度、流量的变化规律	57
4.4 单位水流功率	61
4.4.1 各坡段单位水流功率随时间的变化规律	61
4.4.2 各坡段单位水流功率随坡度、流量的变化规律	63
4.5 各坡段产沙量与其影响因子关系分析	68
4.5.1 各坡段产沙量与其影响因子灰色关联分析	68
4.5.2 产沙量与其影响因子相关分析	72
4.6 小结	75
第5章 水流含沙量与土壤剥蚀率、水流挟沙力关系	76
5.1 含沙量与其影响因子的动态响应过程	76
5.1.1 含沙量的计算	76
5.1.2 各坡段水流含沙量与时间的关系	76
5.1.3 含沙量经验公式	79
5.2 土壤剥蚀率随时间变化规律	81

5.3 土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	82
5.3.1 第一坡段土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	82
5.3.2 第二坡段土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	85
5.4 水流挟沙力的计算	86
5.4.1 概述	86
5.4.2 挟沙力随时间变化规律	88
5.5 土壤剥蚀率与水流含沙量、挟沙力关系	89
5.5.1 土壤临界抗剪切力	90
5.5.2 土壤剥蚀率与水流含沙量、挟沙力的拟合公式及对比	90
5.6 小结	93
第6章 坡面土壤剥蚀率与水蚀动力参数的关系	94
6.1 试验材料与方法	94
6.1.1 试验材料	94
6.1.2 试验方法	94
6.2 土壤剥蚀率与水蚀动力参数的灰色关联分析	95
6.2.1 土壤剥蚀率和水蚀动力参数	95
6.2.2 在流量相同条件下土壤剥蚀率与水蚀动力参数的灰色关联分析	97
6.2.3 相同坡度下土壤剥蚀率与水动力因子的灰色关联分析	98
6.2.4 不同坡度和流量条件下土壤剥蚀率与水蚀动力参数灰色关联分析	100
6.3 土壤剥蚀率和单个水蚀因子的关系	105
6.3.1 流量相同情况下土壤剥蚀率公式	105
6.3.2 坡度相同时土壤剥蚀率公式	106
6.3.3 不同坡度和流量情况下土壤剥蚀率公式	108
6.4 土壤剥蚀率与水蚀因子逐步回归分析	110
6.5 小结	112
第7章 天然降雨雨滴特征	113
7.1 试验区概况	113
7.2 天然降雨雨滴测定	113
7.3 降雨类型及强度	114
7.4 天然降雨雨滴特征	115
7.4.1 雨滴大小的测定及质量的计算	115

7.4.2	雨滴的大小及其分布	116
7.4.3	雨滴的中数直径	123
7.4.4	雨滴的终点速度	125
7.4.5	降雨动能及其计算方法	126
7.5	降雨动能与产沙量关系	130
7.6	小结	130
第8章	天然降雨条件下不同雨型坡面产流、产沙变化特征	131
8.1	径流小区设计	132
8.2	不同雨型下坡面产流、产沙的变化特征	133
8.2.1	短历时阵雨对坡面产流、产沙的影响	133
8.2.2	中、小雨雨型下坡面产流、产沙的变化特征	136
8.2.3	暴雨过程中坡面产流、产沙的变化特征	139
8.3	不同雨型下坡面产流、产沙关系	142
8.3.1	大雨、阵雨及暴雨条件下产流与产沙的关系	142
8.3.2	中、小雨雨型产流与产沙的关系	145
8.4	小结	145
第9章	次降雨条件下坡面侵蚀产沙时空演变过程	146
9.1	REE 的施放方法	146
9.1.1	示踪元素的选择	146
9.1.2	示踪元素的布设	146
9.1.3	示踪元素的施放量估算	147
9.1.4	示踪土样的配制	149
9.1.5	示踪土样的施放	150
9.1.6	试验处理	151
9.2	计算方法	151
9.2.1	各示踪区产沙量计算	151
9.2.2	各示踪区产沙率计算	152
9.2.3	各示踪区相对产沙量计算	152
9.3	次降雨条件下坡面侵蚀产沙时空演变过程	152
9.3.1	次降雨条件下坡面产沙率随时间动态变化特征	152
9.3.2	次降雨条件下坡面累计产沙量的变化特征	158

9.3.3 次降雨条件下坡面各坡段相对产沙量随时间变化特征	160
9.4 次暴雨条件下坡面侵蚀产沙时空演变过程	164
9.4.1 坡面产沙率随时间演变过程	164
9.4.2 各示踪区产沙贡献率随时间变化特征	167
9.4.3 各示踪区累计产沙量随时间变化特征	169
9.4.4 坡面不同坡段相对产沙量随时间变化特征	171
9.5 小结	173
第10章 天然降雨条件下土壤剥蚀率与水流含沙量的关系研究	174
10.1 坡面水流含沙量的动态变化规律	174
10.2 坡面各坡段土壤剥蚀率的动态变化规律	176
10.3 土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	178
10.3.1 5°坡面各段土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	178
10.3.2 10°坡面各段土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	179
10.3.3 15°坡面各段土壤剥蚀率与水流含沙量的关系	180
10.4 小结	181
第11章 结论与展望	182
11.1 结论	182
11.2 展望	184
参考文献	185

第 1 章 绪 论

1.1 立题目的和意义

土壤侵蚀是指在各种自然因素和人为因素的影响下,地球表面的土壤及其母质受水力、风力、冻融、重力等外力的作用,发生的各种破坏、分离(分散)、搬运(移动)和沉积的现象。其本质是土壤肥力下降,理化性质变劣,土壤利用率降低,生态环境恶化。

坡面水蚀过程包括降雨击溅和径流冲刷引起的土壤分散、剥离、输移和沉积 4 个过程,坡面径流侵蚀过程主要包括后 3 个过程。剥离是指径流作用于土壤的力大于土壤阻力时,土壤颗粒离开土壤母质的过程。已被剥离的土壤颗粒被径流挟带,离开原始位置,随径流移动的过程为输移过程。径流输沙能力受多种因素影响,当输沙率大于径流挟沙力时,部分泥沙颗粒重新返回土壤表面,这一过程即为泥沙的沉积过程(Nearing et al., 1990)。这 3 个过程互相影响、相互制约,一般认为土壤剥蚀率与输沙率成反比,随着径流输沙率的增大,用于输沙的能量增加,相应地用于剥离土壤的能量减小(Moore and Burch, 1986),特定断面处土壤剥蚀率是径流挟沙力和实际输沙率的函数(Hirschi and Barfield, 1988; Ewing and Mitchell, 1986),其关系可用 Foster 和 Meyer (1972a) 提出的关系式表示

$$\frac{D_r}{D_c} + \frac{Q_s}{T_c} = 1 \quad (1-1)$$

式中, D_r 为土壤剥蚀率; D_c 为径流剥离能力; Q_s 为径流输沙率; T_c 为径流挟沙力。式(1-1)表明细沟土壤剥蚀率受径流输沙率的限制,随着输沙率的增大,土壤剥蚀率下降,当输沙率达到挟沙力时,土壤剥蚀率为 0。与此相反,当输沙率小于挟沙力时,径流剥离土壤;当输沙率为 0 时,土壤剥蚀率为径流剥离能力。Nearing 等(1990)对式(1-1)进行了简单的分析,结果表明在水流剥离土壤、泥沙输移过程中确实存在上述两个特殊情况,但其具体变化过程尚无试验证明,式(1-1)是将其进行线性化处理的简单结果。作为许多侵蚀模型控制方程的式(1-1),并不是所有研究者都认可。Borah (1989) 和 Rose 等(1983)认为

只有土壤剥离过程受式 (1-1) 所示规律的控制, 而分散土壤颗粒进入径流的过程不受其控制。Kemper 等 (1985) 发现径流剥离过程与土壤质地紧密相关, 对黏性土壤而言, 输沙率增大会引起土壤剥蚀率的增大。而 Moore 和 Burch (1986) 认为输沙率仅对与侵蚀力相关的部分过程起限制作用, 原因是部分侵蚀力被用于泥沙输移。因此, 控制方程 (1-1) 是否是线性的还需要进行深入的研究。

我国是一个多丘陵坡地的国家, 坡地特别是坡度大于 20° 的陡坡地在我国坡地总面积中占有相当大的比例。陡坡地的开垦已经造成了严重的水土流失 (如黄土高原地区), 这与国外的情况有明显差异。在土壤侵蚀过程和水土流失预报模型研究等方面, 我国已经明显落后于发达国家。因此, 本书从揭示坡面径流剥蚀、沉积和输移过程机理出发, 采用天然降雨试验、变坡土槽冲刷试验和稀土元素 (rare earth elements, REE) 复合示踪法, 研究坡面径流剥离或沉积率与水动力参数、含沙量之间的沿程动态响应关系, 验证坡面径流剥蚀率控制方程是否为线性关系、径流剥蚀率与径流含沙量之间是否为线性关系, 为寻求适当的水动力参数 (切应力、水流功率或单位水流功率) 来描述径流剥蚀方程提供试验依据。本书结果将为揭示坡面水蚀过程机理, 进而为建立具有中国特色的土壤侵蚀预报模型提供理论依据。

1.2 研究进展

1.2.1 土壤侵蚀研究方法

土壤侵蚀作用的间歇性、影响因素的复杂性, 使得人们难以观测侵蚀作用的全过程, 难以深入分析各影响的作用与贡献, 给土壤侵蚀研究带来很大困难。为此, 研究工作者逐渐着眼于利用广泛的数学理论 (如灰色系统理论、分形理论、模糊数学、统计方法), 运用先进的技术手段与方法研究土壤侵蚀规律。下面仅介绍灰色系统理论和 REE 示踪技术。

1.2.1.1 灰色系统理论

灰色系统理论是我国著名学者邓聚龙教授于 1982 年创立的一门新兴的学科, 它以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象, 主要通过对“部分”已知信息的生成和开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行行为的正确认识和有效控制 (罗佑新等, 2001)。

灰色系统理论被引进土壤侵蚀研究领域以来, 在短短几年里取得了一些成

果。倪焱(1986)、陈利华和余新晓(1987)分别对悬移质输沙量和侵蚀模数的影响因子作了关联度分析。朱建林(1988)建立了我国水土流失面积和水土流失治理面积的 $G(1, 1)$ 模型。朱湖根和何松苗(1991)对长江上游输沙量的研究表明, 20世纪60~80年代, 由于人类活动的影响, 长江上游输沙量每年递增1.84%。可见, 灰色系统理论可用于土壤侵蚀及其影响因子之间的关联度分析, 以便确定影响土壤侵蚀的主要因子, 进而为建立土壤侵蚀预报模型提供依据。

1.2.1.2 REE 示踪技术

REE 示踪法通过施放多种作为示踪剂的 REE, 经过一定的侵蚀时间(如一次暴雨)后, 在特定的位置采集侵蚀泥沙, 利用中子活化分析技术测定其中 REE 浓度, 用以测量任何一个给定坡段的侵蚀和沉积量(唐小明和李长安, 1999)。用于土壤侵蚀示踪的元素, 应具有与土壤有较高的亲和力、不溶于水、植物富集有限、淋溶迁移不明显及对环境无放射性危害等特征, 以保证其在土壤侵蚀过程中对泥沙的示踪作用。此外, 从方法的精度及试验成本和推广应用前景等方面综合考虑, 示踪元素还应具有土壤背景值低、试验时施加量少、容易识别和探测等特征。

镧系的稀土元素, 包括 15 种元素, 化学性质极其相似, 大都具有基本相同的表生地球化学行为, 在黄土高原土壤中含量甚低($\text{mg/kg} \sim \mu\text{g/kg}$)(田均良, 1992)。仪器中子活化分析(instrument neutron activation analysis, INAA)对大多数 REE 分析灵敏度高, 且分析方法方便。在土壤侵蚀研究中常选用 La(镧)、Ce(铈)、Nd(钕)、Sm(钐)、Eu(铕)、Dy(镝)、Yb(镱)等示踪剂。本方法主要应用于室内模拟及小范围野外研究, 所采用的计算公式为

$$R_j = \frac{N_j}{N_{0j}} \quad (1-2)$$

式中, R_j 为第 j 个类型区的相对侵蚀率; N_j 为侵蚀泥沙中第 j 种 REE 的浓度; N_{0j} 为该种 REE 的施放浓度。该方法用于研究特定地形部位(如同一坡段不同坡度)的土壤侵蚀尤其有效, 因为可以通过在不同部位施放不同的 REE, 而避免彼此的干扰。

美国的 Knaus 和 Van Gent(1989)利用稳定性 REE 示踪法和 INAA 技术成功地在野外测定了沼泽地的演变, 他们认为 REE 示踪法研究土壤侵蚀时, 特别是对于研究次侵蚀过程中泥沙运移和分布规律, 显示了其特有的强大功能。Ma 和 Liu(2001)在微粒碎屑沉积土壤中使用 REE 来描述侵蚀泥沙的组成特性, 提出了该方法存在的缺陷: 一是, 是否有大量的 REE 和其他示踪元素可能存储在各大风化的轮廓中; 二是, 哪一种示踪元素的浓度比率在基岩—风化轮廓—泥沙

的迁移过程中变化最小。Matisoff 等 (2001) 在美国衣阿华州西南部的天然大草原和农田上, 采用稀土元素 Eu、Tb、Ho 示踪暴雨径流对土壤颗粒输移的影响。试验采用电子耦合等离子质谱法 (ICP-MS) 检测分析土样中 REE 浓度, 并用离散模型和指数模型对试验数据进行检验。试验结果表明, 离散模型能很好地表述浓度和距离试验数据之间的关系, 但是指数模型不能模拟示踪源附近 REE 浓度急剧降低的情况。Zhang 等 (2001) 采用 5 种稀土氧化物粉末与迈阿密地区的细砂质壤土均匀混合, 通过检测 REE 与土壤的结合能力来评价 REE 示踪法研究土壤侵蚀的可行性。试验过程用离子水进行过滤来评估 REE 的移动性, 采用简单灵敏酸性沥炼法从所有的土壤样品中提取 REE, 用电子耦合等离子质谱 (ICP-MS) 技术检测分析提取物。试验表明稀土氧化物不能改变土壤颗粒及团聚体的物理化学性质, 能均匀地与不同粒径 ($>53\text{ }\mu\text{m}$) 的土壤团粒体合并, 并同粉质粒径土粒结合, 因此直接使用稀土氧化物示踪是可行的, 比其他示踪剂具有更大的优越性。Zhang 等 (2003) 又采用分段布设 REE 示踪法, 在小区尺度上验证直接采用稀土氧化物与土壤混合示踪土壤侵蚀的可行性, 并深入探索了使用该技术研究土壤侵蚀动力学的潜力。在试验过程中, 用灵敏酸性沥炼法在采集的泥沙样品中提取稀土氧化物, 提取后的物质采用 ICP-MS 法检测分析, 测定 REE 示踪泥沙起源的平均误差为 14.5%。试验结果还证明 REE 示踪法能够给出侵蚀量的时间与空间分布。Polyakov 和 Nearing (2004) 在人工模拟降雨条件下, 采用稀土氧化物示踪技术获取泥沙运动的时空分布信息。试验采用激光扫描仪获取坡面的数字高程模型, 作为对比参照数据, 土壤和径流样中的 REE 浓度用 ICP-MS 法检测, 取得了令人满意的效果。Zhang 等 (2005) 采用 REE 中子活化技术获取空间分布式沟蚀数据来检验 WEPP 预测的泥沙输移规律, 根据 REE 示踪法获得的试验数据, 验证了 WEPP 模型中假定的泥沙输移规律是合理的。Kimoto 等 (2006) 采用 5 种稀土氧化物与石质砂壤土混合进行试验, 以检验稀土氧化物作为粗质土壤示踪剂的适用性, 试验结果表明稀土氧化物作为粗质砂壤土示踪剂, 显示出很多的局限性。因此, 利用 REE 示踪技术精确地计算粗质土壤流失, 还需要在技术方法上进行调整。

中国科学院水利部水土保持研究所田均良等 (1992) 对 REE 示踪法做了改进。他们以 REE 标记示踪泥沙样品, 并将之布设于所要研究的部位, 通过检测侵蚀泥沙中元素的含量, 利用元素平衡法研究侵蚀泥沙的分布、沉积规律及扩散运移过程。石辉等 (1997a, 1997b, 2000) 在此基础上研究了坡面侵蚀的分布规律, 发现坡面侵蚀分布符合 Weibull 分布。结合 REE 示踪法和中子活化技术, 认为中子活化分析及 REE 示踪法不仅可以准确地测定坡面不同地形部位的相对侵蚀量, 还可以客观地描述降雨侵蚀过程中各地形部位相对侵蚀量的变化趋势, 并

可揭示不同地形部位侵蚀强度分布的变化趋势。该方法的最大优点在于它可以定量反映出侵蚀对象不同地貌部位的侵蚀量。为此,周佩华等(1997)、刘普灵等(1997, 2001a)、李雅琦等(1997a, 1997b, 1997c)、田均良(1992, 1997)、吴普特等(1997a, 1997b, 1997c)在研究时,发展了3种REE示踪元素布样方法:①段面法,虽然其结果可靠,准确度与精确度高,但工作量大,野外操作困难;②条带法,野外布设工作量较小,精度高,可行性强,但能否用于小流域泥沙来源研究尚不确定;③点穴法。李雅琦等(1997b)利用可活化稳定核素示踪法研究土壤侵蚀时发现,侵蚀泥沙的沉积主要沿径流方向,发生在邻近径流区内,随着距离的增加,沉积量急剧减少。武春龙等(1997)利用REE示踪法发现,随坡面次暴雨径流深的变化,土壤侵蚀垂直分布表现出明显的复杂性。土壤侵蚀强度随坡长的变化存在增长型、增长后递减型和波动型3种模式。田均良(1997)的小区试验结果表明,坡面侵蚀泥沙在低降雨强度、长历时降雨侵蚀过程中,沉积明显,输沙率比较低,且在坡面不同部位泥沙的沉积状况差异明显。眭国平等(2000)利用Eu定位土芯研究红壤坡地时,发现在复合坡面土壤侵蚀随坡的陡、缓、凹表现为强、弱和沉积;在陡坡地,坡顶侵蚀量大于坡底部;在坡度均匀坡地,从坡顶到坡底,侵蚀模数逐渐减小。杨武德等(1998a, 1998b)的Eu定位土芯示踪基于点穴布样的方法,侵蚀监测的原理已经与田均良等的REE示踪法有所不同,其方法有更大的灵活性,工作量也大为减小,但是该方法的准确性与可靠性有待验证,布样过程中合适位点的选择方法等问题也有待解决。据彤军等(1999)通过室内模拟和野外小区试验,采用中子活化分析手段,对运用REE示踪条带施放法研究坡面土壤侵蚀垂直分布的可行性进行了分析。结果表明,利用REE示踪条带施放法,可定量分析黄土坡面不同坡段的相对土壤侵蚀量,并具有较好的精度。刘普灵等(2001b)将复合REE示踪法用于黄土坡面土壤侵蚀垂直分布规律的研究,验证了野外全坡长侵蚀小区的产沙强度随坡长的变化。李勉等(2002)利用REE示踪技术探讨了黄土坡面细沟侵蚀的发育过程,指出在细沟发育过程中各坡段细沟侵蚀量呈动态变化趋势。赵晓光和石辉(2003)用REE示踪方法研究裸露坡面沿程侵蚀与沉积。丁文峰等(2003)利用REE示踪法,结合不同坡度、不同流量的室内放水冲刷模拟试验,对坡面侵蚀产沙垂直分布特征进行了研究,结果表明:在坡度较小的情况下,坡面各不同部位的相对侵蚀量沿下坡方向呈现出先减小后增大的趋势;在坡度较大而流量较小的情况下,坡面各坡段的相对侵蚀量与坡度较小的情况相似,当流量较大时,坡面各不同坡段的相对侵蚀量呈现出随坡长的增大而减小的趋势,但坡面最下端坡段的相对侵蚀量总是随着冲刷历时的延长而呈现出下降趋势,而其余各坡段的相对侵蚀量则呈现出缓慢的波动式上升。宋炜等(2003, 2004)利用REE示踪法,