

文章编号: 1007-6301 (2002) 05-0507-10

地球化学示踪在现代土壤 侵蚀研究中的应用

郑永春^{1,2}, 王世杰¹, 欧阳自远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 100039)

摘要: 土壤侵蚀导致土地退化、农产品产量和品质下降、水环境污染等诸多问题, 引起各方面的广泛关注, 而且这个问题随着持续增长的人口压力和农业生产方式深刻变革的影响而日益严重。由于目前广泛使用的高差法、遥感研究法、RUSLE、野外调查法、水土流失监测点法等土壤侵蚀研究方法存在着一些不足, 因此, 核素地球化学示踪法、稀土元素示踪法、土壤地球化学指标法等地球化学示踪方法应运而生, 在土壤侵蚀研究中发挥其独特作用。在比较了各种传统的土壤侵蚀研究方法的优势和不足的基础上, 作者认为:

^{137}Cs 、 ^{210}Pb 可用于研究 30、40 年左右平均土壤侵蚀速率, ^7Be 可用于示踪季节性土壤侵蚀和一次降雨事件的土粒运移, 并说明这些核素的示踪原理和侵蚀速率的定量依据; 人为施放稀土元素 (REE) 示踪法适合定量一次或多次降雨事件的侵蚀速率, 可用于土壤侵蚀理论的研究, 尤其适合于室内模拟实验的研究; 土壤磁化率法和土壤理化性质指标法研究土壤侵蚀是一种处于起步阶段的侵蚀研究方法, 适用于土壤质量退化研究, 但要用于土壤侵蚀研究特别是侵蚀速率的定量研究还很不成熟。

关 键 词: 放射性核素; 稀土元素; 地球化学指标; 土壤侵蚀

中图分类号: S159 **文献标识码:** A

土壤资源是土地资源的重要组成部分, 土壤侵蚀是土壤质量和土地生产力下降的重要原因, 是农业土壤退化的主要形式^[1]。在热带地区, 由于表土层是主要的土壤营养库, 侵蚀造成的生产力下降就更为明显和迅速。土壤侵蚀引起的沉积物在某些地区甚至可能是水体的主要污染物^[2]。虽然土壤侵蚀也会在一些河流三角洲发育肥沃的土壤, 但与此相伴随的土地退化和水质恶化则更为普遍。由于森林砍伐、沙漠扩张和土地利用不当等原因导致的水土流失成为世界性的严重问题, 也是生态系统退化的主要原因。中国的土壤侵蚀和土地退化十分严重, 引起广泛的关注, 而且这个问题随着人口压力的持续增长和农业生产方式的深刻变革而变得日益严重。在中国南方地区的主要土壤类型——红壤, 由于不合理的土地利用导致该区遭受多种土地退化过程, 40% 的红壤受到严重侵蚀, 约 30 000 km² 土地由此

收稿日期: 2002-05; **修订日期:** 2002-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (49833002)、中国科学院知识创新项目 (KZCX2-105)、中国科学院“西部之光”项目与国家“九五”攻关项目 (96-920-04-02-12) 联合资助

作者简介: 郑永春 (1977-), 男, 浙江省嵊州市人, 博士生。主要研究方向为土壤侵蚀与土地退化及环境地球化学。E-mail: y.ch.zheng@163.net

而成为荒地^[3]。

显而易见,人们对土壤特性和侵蚀过程了解得越多,对土壤的利用和治理也会更好。土壤流失速率在时间和空间上存在可变性,导致不同坡地和小流域具有不同的土壤侵蚀和沉积模式,因此迫切需要关于坡地和小流域内侵蚀物质来源、侵蚀部位、侵蚀速率和沉积物来源、沉积部位、沉积速率的更完整的信息来制定最有效的和最经济的水土保持计划。土壤侵蚀虽然是一个自然过程,但许多人为因素加剧这个过程。土壤保护主义者认为,在不引起明显的土壤退化前提下,土壤有一个可容忍的最大流失速率(maximum tolerable soil loss rates)。只有确定不同位置、不同土地利用方式的侵蚀速率,才可以判断实际土壤侵蚀速率是否超过土壤可容忍的最大流失速率。在明确土壤侵蚀和沉积的空间分布之后,水土保持措施的实施部位将更有针对性,保持效果也更为有效^[4]。

1 传统侵蚀研究方法及存在的缺陷

高差法: (1) 实地测量法。在一定的时间间隔的起止分别精确测量各个观测点的高程值,利用统计学方法求得区域的平均土壤侵蚀厚度,再计算其侵蚀模数。(2) 航空摄影高程测量法。一定时间间隔内进行两次航空摄影,再利用仪器在室内对两套照片进行高程测量,求得侵蚀模数。高差法的缺点是:获得的侵蚀数据精度相对较低,研究周期较长,两次测量的时间间隔内的高度变化必须达到现有测量技术可以分辨的程度。

野外调查法: (1) 侵蚀针(erosion pins)是最为简单易行的土壤侵蚀研究方法,监测由于侵蚀导致地形高度的变化。但是这种方法的缺陷是侵蚀针的插入会引起土壤扰动,邻近针的水流受到影响,使紊流增加而不能反映实际土壤侵蚀状况。其次,侵蚀速率一般每年只有几个毫米,因此需要长期的测量来获得可靠的侵蚀估计,这在实际上是很难做到的,尤其是在监测对象为农耕地的情况下,耕作活动会移动和干扰这些侵蚀针,因而不能用于长期观测。(2) 捕沙器法。方法是挖坑将盒子放入坑中,盒子的上端与地表齐平,在斜坡上收集表面径流和沉积物。为了得到单位面积上的土壤侵蚀速率和侵蚀量,需要确定捕沙器收集的泥沙来源面积,因此需要圈闭范围,圈闭的结果使坡长的影响以及由此产生径流的影响没有得到很好的考虑。而且侵蚀针法和捕沙器法都要求持续观察,劳动量相对较大。除此之外,树根的出露和有机质层的厚度损失也可作为土壤流失的指示。

遥感研究法: 利用遥感数据光谱特征,对地表植被覆盖度、地形地貌、土壤、地球化学异常等信息进行提取、分析与处理,特别是GIS、GPS、RS技术的结合进行土壤侵蚀的定性和定量研究。由于遥感研究法蕴藏着巨大的信息量,其应用前景十分广泛。但就目前而言,遥感法要求的技术含量高、一次性投入较大,遥感图像的分辨率也还没有达到十分满意的程度,因而需要进一步研究。

RU SLE (Revised Universal Soil Loss Equation, 修正通用土壤流失方程): 是保持了USLE (通用土壤流失方程) 基本结构升级的计算机程序^[5]。这种方法最先在美国提出,而后在世界各国得到广泛应用。要利用RU SLE 得到可靠的侵蚀估计,要求对耕作和土地利用历史有详细的了解。因为RU SLE 中的R (气象侵蚀性因子, climatic erosivity factor)、K (土壤可蚀因子, soil erodibility)、C (作物管理因子) 和P (侵蚀控制因子, conservation support practices) 等因子对作物郁闭度、作物残茬的数量和部位、地表粗糙度的变化相当

灵敏。由于缺少这方面的长期记录和有关农业侵蚀的研究, 因此应用RU SLE 得到的土壤流失结果有相当大的不确定性^[6]。在加拿大就由于缺少RU SLE 需要的关于降雨、种植和土壤可蚀性的数据而使其应用受到限制。而且RU SLE 未考虑细沟和冲沟侵蚀引起的土壤流失及某些部位发生的土壤沉积, 造成RU SLE 得到的侵蚀结果偏低^[7]。

水土流失监测点法: 在特定研究区域设置监测点, 用水槽或托盘以固定的比例把径流和沉积物收集到大容器中, 得到该地块的土壤流失量。监测地块用混凝土、金属边框、木料、石棉等限定地块面积, 在这种侵蚀物质贡献面积已知的情况下, 土壤流失速率就可以用单位面积单位时间的流失量来表示。根据研究目的不同, 这种监测点对侵蚀速率的测量通常是在大雨事件中或一定的时间段内。监测点可以分为实验点和观察点。对实验点, 研究者至少控制影响土壤侵蚀的一个因素(如地表覆盖或土地利用); 对于观察点, 则是在自然条件下研究土壤流失, 但限制地块之外径流和侵蚀物质的贡献。监测地块的侵蚀速率只有推广到更大的范围才具有监测意义, 这种推广需要对选定地块进行很多假设, 但这种假设的实现前提很少有人去验证^[4]。而且, 监测点的维护和日常观测需要花费大量的时间和资金, 还要配备专门的监测人员^[8~10]。

总而言之, 当前使用的诸多土壤侵蚀研究方法存在应用局限性或不完善之处。在这种情况下, 地球化学发挥学科特点, 利用自然界某些元素、同位素和理化指标的独特性质, 作为土壤侵蚀和沉积的示踪剂, 对土壤侵蚀进行不同时间和空间尺度的定性和定量研究, 为侵蚀研究开辟一条新路。

2 目前侵蚀研究所采用的一些地球化学示踪方法

2.1 核素地球化学法

Menzel (1960) 发现美国威斯康星州和乔治亚州侵蚀地块的土壤流失与⁹⁰Sr 流失明显相关^[11], 开创放射性核素示踪土壤侵蚀的先例。而后, 核素地球化学示踪法在土壤侵蚀研究中得到广泛的应用, ⁷Be、¹⁰Be、²¹⁰Pb、²²⁶Ra、²²⁸Ra、¹³⁷Cs 的应用先后都有所报道, 而²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、²²⁸Th、³H、²⁴¹Am、⁸⁵Sr、⁹⁰Sr 等放射性核素在沉积环境恢复研究中的应用预示着它们应用于土壤侵蚀速率研究的可能性。这里需要特别提到的是⁷Be、²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs, 其中尤以¹³⁷Cs 技术的理论研究最为透彻, 技术较为成熟, 应用也最为广泛。

2.1.1 ¹³⁷Cs 技术

一定面积地块中¹³⁷Cs 重新分布与土壤侵蚀运移之间存在紧密关系最先是Rogowski 发现^[12]。其原理是: 在世界大多数地区(切尔诺贝利核电站泄漏事故产生的¹³⁷Cs 没有进入平流层, 影响范围主要限于前苏联和西欧地区) 土壤环境中的¹³⁷Cs 几乎全部来源于大气核试验, 环境中不存在天然来源的¹³⁷Cs。大气核试验产生的¹³⁷Cs 进入平流层后, 在全球范围均匀分布, 而后进入对流层, 随大气降水和降尘到达地表。这部分¹³⁷Cs 沉降在数十公里范围内是很均匀的, 其沉降量取决于雨季的气象条件、出现在大气中的放射性尘埃的数量和高度^[13], 受降雨和当时空气中¹³⁷Cs 浓度的控制^[14]。¹³⁷Cs 被表土中的有机和无机组分强烈吸附, 基本上属于不可交换态, 后期的化学和生物过程导致的¹³⁷Cs 运移十分有限。因此¹³⁷Cs 在环境中的迁移主要是侵蚀、耕作、沉积等土粒物理搬运过程引起的^[15]。据此, 土芯¹³⁷Cs 剥蚀或富集程度可以反映自¹³⁷Cs 在环境中出现以来由侵蚀造成的净土壤流失量或净沉积

量^[16~19], 可用来定量研究土壤侵蚀速率和侵蚀的空间分布^[20, 21]。

^{137}Cs 技术之所以能够对土壤侵蚀速率进行定量研究, 依赖于它能够将单位面积土芯的 ^{137}Cs 含量与当地背景值相比较的 ^{137}Cs 损失百分比转换成土壤重新分布的定量估计 (见图 1)。因此提高定量模型的可信度变得至关重要^[8]。这些定量模型包括经验公式、比例模型和质量平衡模型等。经验公式现在已经基本被淘汰。比例模型假设 ^{137}Cs 流失量和土壤流失量直接成比例, 其形式简单, 要求提供的参数少, 容易应用, 但由于不考虑自然衰变引起的 ^{137}Cs 损失, 其缺点也是显而易见的。目前应用最多的是质量平衡模型^[22, 23], 其中又分为简化的质量平衡模型、常用质量平衡模型、考虑耕作土壤运移的质量平衡模型等。其中, Zhang 等^[24~26] 提出简化的质量平衡模型被世界上许多学者采用, 应用也较为简单。由于各种侵蚀速率定量模型都将侵蚀因素和侵蚀过程简化, 并作了很多假设, 因此 ^{137}Cs 定量模型之间的比较并不是说哪一个更正确, 而是哪一个模型考虑的因素更为充分, 考虑的因素越充分, 得到的结果就越接近真实状况^[7]。

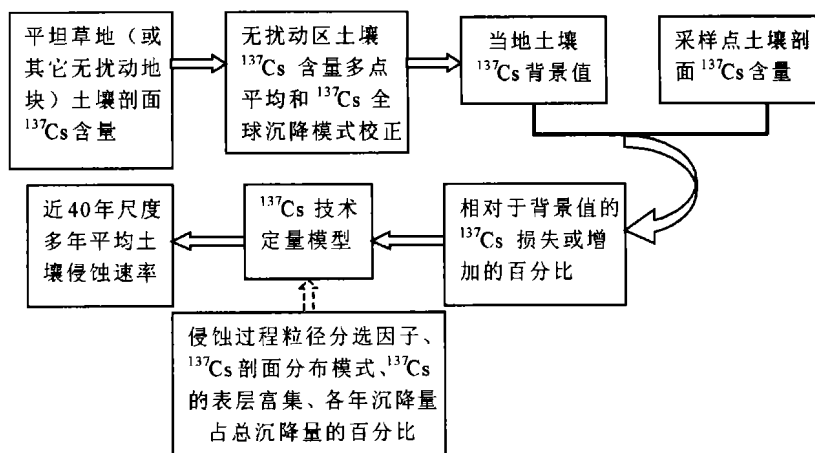


图 1 ^{137}Cs 技术定量土壤侵蚀速率技术路线

Fig. 1 The path of using ^{137}Cs technique to qualify soil erosion rates

近十年来, 坡地耕作引起的土壤侵蚀定量研究日益引起学术界的重视, 由于犁耕作用本身也是耕地土壤运移的重要组成部分, 如坡地上部土壤因顺坡耕作逐渐下移, 当然也引起 ^{137}Cs 的重新分布。这使得 ^{137}Cs 技术在研究耕作侵蚀和耕作位移的研究中发挥出独特作用^[16, 27~34]。

^{137}Cs 技术存在明显的比较优势。首先, ^{137}Cs 半衰期为 30.12 年, 环境中的 ^{137}Cs 需要 150 年以上的自然衰变才能使其值下降到初始沉降量的 3%, 因而该技术可以长期应用; 其次, ^{137}Cs 可以进行较大面积的侵蚀研究, 也不会对农民的耕作和农业生产产生不便, 而且 ^{137}Cs 容易测量, 技术简单; 最后, ^{137}Cs 仅凭一次野外采样就可以得到土壤侵蚀速率, 可以为研究侵蚀和沉积的空间分布快速地积累大量信息。虽然土壤学家凭野外观测也可判别侵蚀和沉积, 但是不可能观测出长期土壤流失速率。

2.1.2 ^7Be 法

^7Be 是宇宙射线轰击大气中 N、O 等靶核而产生的放射性核素, 随大气降水到达地表,

具有稳定的输入来源和较短的半衰期 (53.3 天), 平均寿命 76.5 天, 适合于反映季节性环境地球化学示踪^[35]。雨水中的⁷Be 快速而牢固地与表土结合, 研究发现, 土粒中近 80% 的⁷Be 存在于 Fe-Mn 氧化物及有机质结合相, 15%~18% 存在于残渣相^[36]。Fe-Mn 氧化物结合相只有在还原条件下才能被释放, 有机质结合相则只有在强氧化条件下才可被释放。因此, 土粒中的⁷Be 化学形态的改变主要受氧化还原条件变化的控制, 自然环境条件下不易被溶析, 主要随土粒运动而迁移, 可以用于研究季节性的土壤侵蚀规律。Bai 等人在黔中喀斯特山区用⁷Be 示踪表土季节性侵蚀的研究取得较好效果^[37, 38]。Walling 等首次提出应用⁷Be 定量侵蚀速率的数学模型^[39], 相对¹³⁷Cs 而言, ⁷Be 法虽然在土壤侵蚀的定量研究方面存在着很多不确定性, 如: ⁷Be 在未扰动土层中的渗透深度秋季明显大于春季; 植被覆盖截留⁷Be 的比例不确定, 草本植物截留的⁷Be 可占地表⁷Be 总活度的一半左右, 而对于森林而言, 地表的⁷Be 沉降可能被落叶层全部吸附, 这导致土壤中⁷Be 剖面分布难以准确描述; ⁷Be 的地球化学 (包括输入通量、沉降模式、迁移和渗滤速率等) 还不是很明确。但是, 建立⁷Be 损失或增加量与土壤侵蚀或沉积速率之间的定量估算模型所涉及的不确定因素却相对较少。由于⁷Be 半衰期仅有五十多天, 所以只需考虑其短期地球化学行为, 不需要像¹³⁷Cs 那样对其长达 40 余年的沉降行为和归宿进行各种假设, 而且研究区域在这期间的环境条件也是已知的, 耕作侵蚀引起的土壤位移也可忽略。因此, ⁷Be 法是研究土粒季节性搬运和一次降雨事件土壤侵蚀速率的有效方法, 也是对¹³⁷Cs 技术的有益补充。

2.1.3 ²¹⁰Pb 法

尽管²¹⁰Pb 在沉积年代学方面被广泛接受和使用, 但其作为侵蚀示踪剂的研究却仍处于起步阶段。需要发展²¹⁰Pb 法的原因在于: 切尔诺贝利核电站事故影响地区的¹³⁷Cs 沉降在空间上具有较大的可变性, 使得¹³⁷Cs 定量侵蚀速率更为复杂化, 在这些地区, 目前使用的¹³⁷Cs 技术是有局限性的, 需要寻求可替代的示踪剂。²¹⁰Pb 由此被重视起来。²¹⁰Pb (半衰期 22.2 年) 是²³⁸U 系列衰变的产物, 由²²²Rn (气态, 半衰期 3.8 天) 衰变产生, 而²²²Rn 是由岩石和土壤中天然存在的²²⁶Ra 衰变产生。因此土壤中原地产生的²¹⁰Pb 与土壤中的²²⁶Ra 平衡, 称为补给²¹⁰Pb (²¹⁰Pb_{supported})。土壤和岩石中的少量²²²Rn 向上扩散, 导致²¹⁰Pb 进入大气, 这部分²¹⁰Pb 沉降在表土和水体沉积物上, 不与其母体²²⁶Ra 平衡, 称为无补给²¹⁰Pb (又叫过剩²¹⁰Pb, 记为²¹⁰Pb_{ex}), 这部分²¹⁰Pb 可以通过从土壤中总的²¹⁰Pb 减去²²⁶Ra 补给的²¹⁰Pb 得到。²²⁶Ra 补给的²¹⁰Pb 可以用土壤剖面下部无²¹⁰Pb_{ex}的土壤样品测量获得^[40]。

在一定研究区域内²¹⁰Pb_{ex}的沉降量不随时间变化, 相对是个常数^[41]。²¹⁰Pb_{ex}一经从大气层降落到地表, 就与表土层中的粘土矿物和有机质结合, 它在地表的重新分布是由土地利用、土壤侵蚀和沉积物运移等物理过程所控制, 因此具有定量土壤侵蚀速率的潜能^[42]。Walling 等在英国农耕地上研究了利用²¹⁰Pb 示踪土壤侵蚀的可能性, 并提出侵蚀速率的定量模型^[43], 为²¹⁰Pb 法定量长期土壤侵蚀速率展示出良好的应用前景。

2.2 稀土元素示踪法

稀土元素与土壤之间紧密结合, 在多数土壤中的背景含量甚微, 植物富集有限, 淋溶迁移不明显。同时它们是稳定同位素, 对环境无损害。田均良等人借鉴 Knaus^[44]利用稳定性稀土元素 (REE, Rare Earth Element) 示踪和中子活化分析技术在野外测定沼泽地侵蚀、沉积速率的成功经验, 在国内成功地将REE 示踪法用于研究黄土高原土壤侵蚀及小流域泥沙来源^[45]。其基本原理是将REE 与土壤均匀混合后布设于被研究地区的不同地形部位, 使

之在整个降雨过程中随径流泥沙一起迁移,而后采集径流池中泥沙样品,利用中子活化分析技术测定其中的REE浓度^[46],计算不同部位的侵蚀量,从而研究侵蚀与沉积的空间分布规律。所选取的稀土元素应具有土壤中背景含量低、实验时施加量少、中子活化截面大、容易识别和探测、不易被植物吸收等特征。La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy、Yb是应用较多的几种示踪剂。在REE施放方法上,又可以分为段面法、条带法、点穴法。杨武德等^[47]在南方红壤侵蚀研究中所采用的Eu土芯法其实就是单一稀土元素的点穴法布点。

由于REE示踪法是利用稀土元素独特的地球化学性质,采用化学吸附方法在土壤上标记示踪元素,并不改变泥沙粒径和比重,因此可真实地描述侵蚀与沉积过程。而且该方法可在不同的地形条件下施放,一次施放,多次观测,可以细致地确定产沙部位和产沙类型。

稀土元素示踪法不足之处在于:在研究区域内如何合理布点,以较为全面地反映侵蚀分布信息比较困难;而且,不管采用何种布点方法,在将稀土元素和土壤混合均匀再回填的过程中,回填位置的土壤物理性质及抗蚀能力与原状土壤相比有较大改变,因此得到的侵蚀速率也就不能很好反映原状土壤的真实侵蚀信息。此外,作为示踪剂的稀土元素售价高,用量大,研究成本较高。

3 土壤地球化学指标法

土壤侵蚀造成土壤质量下降,一些敏感的土壤地球化学指标也相应发生改变,因此,选择一定的土壤地球化学指标可以用来研究土壤的侵蚀状态。

3.1 土壤磁化率

土壤磁学是一门新兴的土壤学分支,在研究土壤发生分类、土壤肥力演变规律、土壤调查制图、植物营养诊断、生物磁性以及土壤改良等领域有着广泛的应用。近年来,国内外学者利用不同利用方式土地中土壤磁化率的空间变异来研究土壤侵蚀的空间分布相继取得一些进展。一般而言,表土层的磁化率高于心土层。Pu的研究结果表明^[3],随着坡度的增大,土壤表层磁性的富集系数 X_{slef} 减小(X_{slef} 表示土壤表层磁化率与样点磁化率平均值的比值)。这种现象可能说明,土壤表层被冲蚀的强度随着坡度的增大逐渐增强。Pu据此认为,坡地不同位置表土磁化率的变化可以用来表征这些位置遭受的侵蚀状态。然而,很多因素都会对土壤磁化率产生影响,不同点之间磁化率的变化并不能完全反映土壤侵蚀的贡献,其侵蚀示踪的理论基础需要进一步论证。

3.2 土壤理化指标

研究发现,随着坡度的增大,土壤表层被冲蚀的强度逐渐增强,土壤交换性盐基(BS)和阳离子交换量(CEC)等反映土壤性质的理化指标数值降低,总体上是平缓的坡顶高于其中下坡位。因此也可以用来研究土壤侵蚀状态^[3]。

不同的土地利用类型中,表土的有机质含量、K、土壤团粒结构水稳性指数、土壤粒径分布等均存在显著差异,预示着这些指标有助于土壤侵蚀研究的可能性。

不足之处:土壤地球化学指标一般都只能用作土壤侵蚀与质量退化的定性指标,用作定量指标比较困难。而且,这些方法本身还很不成熟,尚处于探索阶段。

4 结论

当然, 地球化学示踪研究土壤侵蚀也存在一些不足之处, 如: 仪器设备、分析测试费用较高, 对研究人员的素质要求较高, 侵蚀速率的定量模型与实际侵蚀状态之间尚存在差异, 一些示踪方法至今还没有较为合理的定量模型, 如理化性质法、磁化率法等。

但是, 各种地球化学方法在现代土壤侵蚀的研究中的应用, 为研究土地退化状况和土壤资源利用的可持续性、侵蚀和沉积的空间分布模式、土壤侵蚀的经济损益评估等提供有力的技术支撑。尤其是 ^{137}Cs 技术最为成熟, 操作相对简单, 应用也最为广泛。 ^{210}Pb 在具有与 ^{137}Cs 相类似的地球化学性质, 在 ^{137}Cs 技术无法开展的地区, ^{210}Pb 有望成为研究数十年时间尺度平均侵蚀速率的良好替代。 ^7Be 是目前应用于季节性侵蚀研究的很好的地球化学示踪剂, 但它和 ^{210}Pb 一样在理论基础和定量模型优化上仍需要进一步研究。REE示踪法在事件性侵蚀研究中应用效果较好, 尤其适合于在实验室内进行侵蚀理论的研究。磁化率和土壤物理化学指标具有示踪土壤侵蚀的潜力, 但要完成从定性研究到定量研究的转化, 还有很长的路要走。

参考文献:

- [1] Basher L R, Matthews K M, Zhi L. Surface erosion assessment in the South Canterbury down-lands, New Zealand using Cs-137 distribution[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, **33**: 787-803
- [2] Glymph L M. Agriculture's contribution to the nation's water resources and flood control[J]. *J. Environ. Quality*, 1972, **1**: 128-133
- [3] Pu L J, Bao H S, Peng B Z et al. Distribution and assessment of soil and land degradation in Subtropical China——A case study of the Dongxi River Basin, Fujian province[J]. *Pedosphere*, 1998, **8**(3): 201-210
- [4] Loughran R J. The measurement of soil erosion[J]. *Progress in Physical Geography*, 1990, **13**: 216-233
- [5] Renard KG, Foster G R, Yoder D C et al. RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future[J]. *J. Soil Water Conserv*, 1994, **49**: 213-220
- [6] Montgomery J A, Busacca A J, Frazier B E et al. Evaluating soil movement using cesium-137 and the Revised Soil Loss Equation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**(2): 571-579
- [7] Turnage K M, Lee S Y, Foss J E et al. Comparison of soil erosion and deposition rates using radiocesium, RUSLE, and buried soils in do- lines in East Tennessee[J]. *Environmental Geology*, 1997, **29**(1, 2): 1-10
- [8] Higgitt D L. Quantifying erosion rates from caesium-137 measurements: A comment on Elliott and Cole-Clark (1993): "Estimates of erosion on potato lands on Krasozems at Dorriggo, N. S. W. using the caesium-137 technique"[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, **33**: 709-714
- [9] Ritchie J C, McHenry J R, Gill A C. Fallout ^{137}Cs in the soils and sediments of three small watersheds[J]. *Ecology*, 1974, **55**(1): 887-890
- [10] Ritchie J C, McHenry J R. Fallout ^{137}Cs : a tool in conservation research[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1975, **30**: 283-286
- [11] Menzel R G. Transport of strontium-90 in runoff[J]. *Science*, 1960, **131**: 499-500
- [12] Rogowski A S, Tamura T. Movement of ^{137}Cs by runoff, erosion and infiltration on the alluvial Captina silt loam[J]. *Health Physics*, 1965, **11**: 1333-1340
- [13] Gibbs W J, Wilson G U. Meteorological implication of measurement of strontium in the Australia environment[J]. *Aust. J. Sci*, 1965, **28**: 59-69
- [14] Hedvall R, Erlandsson B, Soren M. ^{137}Cs in fuels and products from biofuel plants in Sweden[J]. *J. Environ.*

- Radioactivity*, 1996, **31**(1): 103-117.
- [15] Bonnett P J P. A review of the erosional behavior of radionuclides in selected drainage basins[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1990, **11**: 251-266
- [16] Brown R B, Cutshall N H, Kling G F. Agricultural erosion indicated by ^{137}Cs redistribution: I levels and distribution of ^{137}Cs activity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, **45**: 1184-1190
- [17] Brown R B, Kling G F, Cutshall N H. Agricultural erosion indicated by ^{137}Cs redistribution: II estimates of erosion rates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, **45**: 1191-1197
- [18] E de Jong, Begg C B M, Kachanoski R G. Estimates of soil erosion and deposition from some Saskatchewan soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1983, **63**: 607-617.
- [19] Longmore M E, McCallan B M, O'Leary C W et al. Chandica, Mapping erosion and accumulation with the fallout isotope caesium-137[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1983, **21**: 373-385.
- [20] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data[J]. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1990, **2**: 161-175.
- [21] Sutherland R A. Caesium-137 estimates of erosion in agricultural areas[J]. *Hydrological Processes*, 1992, **6**: 215-225.
- [22] Yang H, Du M, Zhao Q et al. A quantitative model for estimating mean annual soil loss in cultivated land using ^{137}Cs measurements[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, **46**(1): 69-79.
- [23] Yang H, Chang Q, Du M et al. Quantitative model of soil erosion rate using ^{137}Cs for uncultivated soils[J]. *Soil Science*, 1998, **163**(3): 248-257.
- [24] Zhang X B, Li S, Wang C et al. Use of caesium-137 measurements to investigate erosion and sediment sources in a small drainage basin in the Loess Plateau of China[J]. *Hydrological Processes*, 1989, **3**: 317-323.
- [25] Zhang X B, Quine T A, Walling D E et al. A study of soil erosion on a steep cultivated slope in the Mt. Gongga Region near Luding, Sichuan, China, using the ^{137}Cs technique[J]. *Acta Geologica Hispanica*, 2000, **35**(3-4): 229-238.
- [26] Zhang X B, Quine T A, Walling D E et al. Application of the caesium-137 technique in a study of soil erosion on gully slopes in a yaun area of the Loess Plateau near Xifeng, Gansu Province, China[J]. *Geografiska Annaler Series A. Physical Geography*, 1994, **76**(A): 103-120.
- [27] de Jong, Villar H, Bettany J R. Preliminary investigations on the use of ^{137}Cs to estimate erosion in Saskatchewan[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1982, **62**: 673-683.
- [28] Cao Y Z, Coote D R, Rees H W et al. Effects of intensive potato production on soil quality and yield at a benchmark site in New Brunswick[J]. *Soil and Tillage Research*, 1994, **29**: 23-34.
- [29] Moulin A P, Anderson D W, Mellinger M. Spatial variability of wheat yield, soil properties and erosion in hummocky terrain[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, **74**: 219-228.
- [30] Quine T A. Use of caesium-137 data for validation of spatially distributed erosion models: the implications of tillage erosion[J]. *Catena*, 1999, **37**(3-4): 415-430.
- [31] Schumacher T E, Lindstrom M J, Schumacher J A et al. Modelling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, **51**: 331-339.
- [32] Quine T A, Govers G, Poesen J et al. Martinez-Fernandez, Fine-earth translocation by tillage in stony soils in the Guadalentin, south-east Spain: an investigation using caesium-134[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, **51**(3-4): 279-301.
- [33] Lobbo D A, Kachanoski R G. Modelling tillage erosion in the topographically complex landscapes of southwestern Ontario, Canada[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, **51**(3-4): 261-277.
- [34] Kachanoski R G, Carter M R. Landscape position and soil redistribution under three soil types and land use practices in Prince Edward Island[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, **51**(3-4): 211-217.
- [35] 万国江. 环境质量的地球化学原理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [36] 白占国, 万国江, Santichi P H. 宇宙线散落核素 ^{7}Be 在山区表土层中的分布和侵蚀示踪原理[J]. 土壤学报,

- 1998, **35**(2): 265-275
- [37] Bai Z, Wan G, Wang C et al. ^7Be distribution in surface soil of central Guizhou karst region and its erosion trace [J]. *Progress in Natural Science*, 1996, **6**: 700-710
- [38] Bai Z, Wan G J, Wang C S. Geochemical speciation of soil ^7Be , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{228}Ra as tracers to particle transport [J]. *Pedosphere*, 1997, **7**(3): 263-268
- [39] Walling D E, He Q, Blake W. Use of Be-7 and ^{137}Cs measurements to document short- and medium- term rates of water- induced soil erosion on agricultural land [J]. *Water Resources Research*, 1999, **35**(12): 3865-3874
- [40] Wallbrink P J, Murray A S. Determining soil loss using the inventory ratio of excess ^{210}Pb to cesium-137 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(4): 1201-1208
- [41] Baskaran M, Coleman C H, Santschi P H. Atmospheric deposition fluxes of ^7Be and ^{210}Pb at Galveston and College Station, Texas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**: 20555-20571.
- [42] He Q, Walling D E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 1997, **48**: 677-690
- [43] Walling D E, He Q. Using fallout Lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 1404-1412
- [44] Kuau S R M. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wet-land: A new soil horizon marker method for measuring recent accretion [J]. *Estuaries*, 1989, **12**(4).
- [45] Tian J L et al. NAA determination of major and tracer elements in loess, paleosol and precipitation layers in a Pleistocene loess section, China [J]. *J. Radioanal Nucl Chem*, 1987, **110**(1): 261-274
- [46] 田均良. 土壤侵蚀REE示踪法初报 [J]. 水土保持学报, 1992, **6**(4): 12-18
- [47] 杨武德, 王兆骞. 红壤坡地不同利用方式土壤侵蚀模型研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, **5**(1): 52-58, 68

Using Geochemistry as a Tool Measuring Soil Erosion

ZHENG Yong-chun^{1,2}, WANG Shi-jie¹, OU -yang Zi-yuan¹

(1. State key Laboratory of Environmental Geochemistry, C A S, Guiyang 550002 China;

2. Postgraduate Academy, C A S, Beijing 100039 China)

Abstract: Soil erosion results in land degradation, farming product output and quality declined, and water pollution, etc. The problem becomes more and more serious with the changed farming fashion, tillage mode, and progressing pressure of population. Many conventional erosion research methods and techniques, such as Elevation method, Remote Sensing technique, Revised Universal Soil Loss Equation method, Field Investigation technique, and Soil Loss Monitoring Spot method, have their limitations, though they are used widely today. Using geochemical tracers to measure soil erosion rates is popular and exerting particular function in erosion study. Those tracers include radionuclides, Rare Earth Element, magnetic susceptibility, and soil physics and chemistry index. This paper points out several limitations of conventional erosion research methods, and indicates that: (1) ^{137}Cs , ^{210}Pb can be used to study soil erosion rates in about 30~40 years. ^7Be can be used to trace seasonal soil particle movement and one-rainfall erosion rates. The tracing

theory, principle and technical path are also concluded. (2) REE can be used to measure incident erosion rates and to study erosion and deposition pattern. (3) Magnetic susceptibility and soil physics and chemistry index can be expected to use in studying soil erosion and land degradation in future. Geochemical tracing techniques have their own limitations. For example, chemical analysis of tracers in soil is expensive. Researchers are required to master essential analysis method and understand the knowledge of geochemical behavior of tracers. But these techniques are very useful supplements to traditional techniques, especially in the study of average erosion rates in several ten years and in one rainfall.

Key words: Radionuclides; Rare Earth Element; Geochemical index; Soil erosion

* * * * *

《地理科学进展》征订启事

《地理科学进展》是中国科学院地理科学与资源研究所主办的综合性学术期刊, 为更及时地反映地理科学的研究成果, 经国家科技部批准, 于 2002 年起正式改为双月刊, 2003 年将版面进一步扩大至每期 112 页, 国内刊号: CN 11-3858/P, 国际刊号: ISSN 1007-6301, 国内邮发代号已改为 2-940, 每期定价 20 元, 全年共计 120 元, 全国各地邮电局均可订阅。如有漏订者或需过刊者请与本编辑部联系。

联系单位: 《地理科学进展》编辑部

地 址: 北京安外大屯路 917 大楼 中科院地理所

邮政编码: 100101

《地理科学进展》编辑部