

土壤侵蚀磁性示踪技术

鲍玉海<sup>1,2</sup>, 贾松伟<sup>1,2</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 系统介绍磁性示踪技术的基本原理、测量参数、计算模型及应用前景。近年来, 利用磁性示踪研究土壤侵蚀成为示踪技术在土壤侵蚀研究中应用的一种新思路, 利用环境物质磁性的时空差异性来研究区域内侵蚀泥沙来源, 以沉积物磁性作为流域环境变迁指示剂以及利用磁性参数的变化研究土壤侵蚀等方面已取得的一些成果, 同时利用人工磁性示踪剂来研究土壤侵蚀强度的空间分异规律, 定量描述侵蚀方式的演变及侵蚀过程的发生、发展规律, 并在野外进行小区试验。磁性示踪技术具有测量简便易行、无破坏性、连续性好、分辨率高, 并可迅速与其它示踪技术复合示踪等优点, 将成为水土保持监测的有力手段之一。

**关键词:** 水土保持监测; 磁性示踪; 土壤侵蚀

**中图分类号:** S157. 1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-3409(2007) 06-0005-05

Assessment of Soil Erosion Using Magnetic Tracing Technique

BAO Yu-hai<sup>1,2</sup>, JIA Song-wei<sup>1,2</sup>, HE Xi-bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, C.A.S., Chengdu 610041, China;  
2. Academy of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This article systemically introduced the basic principle, the survey parameter, the computation model and the application prospect of the magnetic tracing technique. In recent years, the magnetic tracing technique has become a new technology in the soil erosion research. With measured temporal and spatial variability of natural magnetism, sources of mobilized sediments have been assessed using different parameters. Manmade magnetic tracers were also applied in experimental plot to study the temporal and spatial variability of erosion intensities; observe the evolvement of erosion types and erosion processes. The magnetic tracing technique has a few of merits, such as simple and convenient surveys, no destructiveness, better continuity, highly power of discrimination, and may rapidly compound tracing with other tracers technique and so on. It will become one powerful method of the soil and water conservation monitoring.

**Key words:** soil and water conservation monitoring; magnetic tracing; soil erosion

土壤侵蚀是当今世界重大的环境问题之一。土壤侵蚀导致的土地退化、土地生产力下降、水环境污染、泥沙淤积等诸多问题, 给人类带来严重的社会、经济和生态等各方面危害。尤其随着开发建设项目数量和规模的不断扩大, 其对环境的影响也愈来愈大。研究土壤侵蚀速率、沉积速率及其侵蚀强度的空间分布, 了解土壤侵蚀机理和运移途径, 是分析研究侵蚀泥沙来源及侵蚀区土地整治、水土保持措施合理布设的主要理论依据<sup>[1]</sup>。

现有的土壤侵蚀测定方法基本上分为<sup>[2]</sup>: 水文法、普查法和示踪法。其中示踪法能够克服水文法和普查法在研究土壤侵蚀的过程, 侵蚀强度和侵蚀沉积的空间分布特征、实施费用及劳动强度等方面的不足, 近年来发展迅速。自 Cai-theon<sup>[4]</sup>, Ventura 等<sup>[5]</sup>提出利用磁性示踪研究土壤侵蚀的新思路以来, 磁性示踪技术以其测量无需破坏性地取样, 不扰动土壤, 试验快速、简单、方便, 成本低的优势, 逐渐被人们所认可。本文就磁性示踪在土壤侵蚀评价研究中的应用做一简要地论述。

1 磁性示踪技术基本原理

1.1 磁性矿物来源

从磁学的观点, 自然界中颗粒物的磁性主要是由磁性矿物产生的<sup>[6]</sup>。总体上可将物质分为铁磁性、亚铁磁性、反铁磁性、顺磁性、抗磁性 5 种基本类型<sup>[7]</sup>。环境物质(如土壤、沉积物)是由不同磁性质的矿物、有机质等组成, 环境系统中的自然物质所表现出的磁性特征, 与其所含的磁性矿物类型、含量和晶粒特征等有关, 在一定程度上反映了物质来源、搬运过程、成土作用、成岩作用、人类活动等综合信息。

环境物质中磁性矿物来源可分外源和内源两类: 外源磁性矿物的输入主要通过大气和径流。大气降尘主要有火山灰、土尘、宇宙尘埃和人类活动释放的大气污染物等; 径流带入的主要有母质风化碎屑物、表土以及工业和生活污水排放物等。内源磁性矿物主要由原生铁通过化学或生物化学作用形成的次生磁性矿物。磁性矿物的外源组分可以反映流域周围的自然条件及人类活动影响, 通过物质磁性特征的变

\*收稿日期: 2007-01-04  
基金项目: 国家自然科学基金项目(40271015); 科技部 973 项目(2003CB415201); 四川省科技攻关计划(05SG023007) 资助  
作者简介: 鲍玉海(1981- ), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。  
通信作者: 贺秀斌(1967- ), 男, 研究员, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

化常常可以追溯环境变迁过程。这些磁性颗粒在全球岩石圈、水圈、生物圈和大气圈内以及相互能量转换和物质循环过程中,不断地迁移,最后赋存在磁性矿物载体中,于是这些磁性矿物就携带了气候和环境变化信息。

1.2 矿物磁性变化

磁性矿物在土壤中的变化可分为物理变化和生物化学变化。物理过程虽然不能改变磁性矿物的性质,但是通过影响磁性矿物在环境物质中的赋存方式,却对环境物质的磁性产生重要的影响。搬运和沉积分异过程也会引起物质磁性特征的差异,原生的磁性矿物往往富集在粗粒级之中,而次生磁性矿物则主要集中在细粒级中,不同动力条件下所沉积的物质,其粒级组成是不一样的,反映在磁性特征上也是不同的,粒级分离基础上的磁性测试很好地说明了这一点。生物化学作用对环境物质的磁性特征具有重要影响,这是由于微生物活动及环境化学因子,如有机质、pH 值、氧化-还原电位等变化,使得磁性矿物和非磁性矿物发生溶解、水解、吸附等作用,从而影响环境物质的磁性。

内源磁性矿物是在物质形成和次生变化过程中形成的,在一定时空尺度上是稳定的;外源磁性矿物是以陆源碎屑物形式在外营力的作用下从外界输入的。因此,一切能导致磁性矿物相对富集或稀释的物理因子都会对物质的磁性产生影响。它们不同的物源输入、物质沉积速率的变化、土壤中物质垂直运移以及搬运和沉积分异过程对物质的磁性影响是极为明显的<sup>[8]</sup>。

1.3 磁性矿物尺度分布特征

在大尺度范围内磁性矿物分布具有差异性,首先是地质构造和成岩过程决定了不同地域中磁性矿物的种类、含量和赋存方式的不同,其次就是气候、植被、水文等条件的地带性差异决定了土壤化过程的差异性。因此,在大尺度范围内,同一区域磁性矿物的含量具有相对的均一性,不同区域具有明显的差异性。在小尺度范围内或某一流域内,由于土壤侵蚀、植被覆盖、土地利用结构以及微地貌的差异,易引起磁性矿物在流域内局部地区的相对差异性。韩晓非等<sup>[9]</sup>在红壤地区通过分析研究侵蚀土壤磁性特征的演变规律,结果表明磁化率和饱和等温剩磁的变化明显反映了土壤熟化程度和利用方式对土壤磁性变化的影响,尤其裸地磁化率的下降则反映了裸地地表受强烈侵蚀的结果。董元杰等<sup>[10]</sup>通过对坡面不同空间部位土壤的磁化率特征和降雨后土壤磁化率变化机理的研究,结果表明由于土壤遭到侵蚀后粒级组成发生变化,从而造成磁性矿物的含量发生变化,进而引起了土壤磁化率的改变,证明利用磁性示踪法来研究坡面土壤侵蚀是一个行之有效的方法。

1.4 磁性矿物在土壤剖面中的分布特征

土壤的表层和底层的磁学特性有着显著区别,表层土壤磁性特征明显增强<sup>[11]</sup>,这可能是由于表土含有大量由燃烧、成土或铁细菌等生物作用新生成磁性矿物的缘故。此外,人为活动所产生的磁性矿物,能通过大气尘降、污水扩散,以不同的赋存状态在环境中富集,从而使地表物质表现出较强的磁信息。如燃煤产生大量的磁铁矿小球,它们随烟尘、煤灰进入环境,或随炉渣直接排放。电镀厂、冶炼厂、钢铁厂等排放的工业废水中含有铁锰物质,通过大气、径流等途径进入

环境系统中,对物质的磁性产生了很大的影响。俞劲炎等<sup>[12]</sup>研究红壤磁化率剖面时指出表面磁性增强的现象。濮励杰等<sup>[13]</sup>研究了坡度与土壤表层磁性富集系数的关系。经分析,两者呈现较好的负对数相关( $R = -0.63$ ),经方差检验在  $\alpha = 0.05$  水平上呈显著性相关关系,相关方程为

$$X_{\text{self}} = -16.88 \ln X + 149.63$$

式中:  $X_{\text{self}}$ ——土壤表层磁性富集系数;  $X$ ——坡度。

虽然土壤表面磁性变化原因究竟是物理迁移过程、生物化学过程还是人类活动的影响以及它们对总磁测的贡献率仍在研究之中,但是磁性参数在坡面不同空间部位及土壤剖面上具有差异性为其在土壤侵蚀中应用提供了可能性。

1.5 磁性示踪土壤侵蚀的应用原理

用磁信息对土壤形成过程、土壤分层、土壤结构及土壤侵蚀状况等方面的研究已成为一种有效的方法,并已形成了一门新的学科——土壤磁学<sup>[12]</sup>,这主要是由于土壤中的铁能够改变价态、形成与环境有关的多种氧化物或与土壤中其他成分一起形成络合物的缘故。在风化层内部由基岩风化过程中析出的铁已经转变成化学性质稳定的磁性氧化物、铁的氢氧化物和铁的硫化物等,故它们完全有可能继续存在于土壤或者河流悬浮物和大气尘埃中,这样也就完全有可能作为一种新的历史记载被保存在沉积物、泥炭或冰块的样芯中。因此,用磁化率检测方法对土壤进行测量、研究和分析便成为可能。磁性示踪技术就是利用土壤本身的矿物磁性或磁性示踪剂,通过磁化率仪等磁性测量工具测量土壤侵蚀前后磁化率等磁参数的变化来确定土壤侵蚀或沉积。

磁性示踪技术早在 1986 年就有报道应用于土壤侵蚀研究坡面表层土壤颗粒的运动<sup>[14]</sup>。基于利用磁性示踪技术能将土坡表层土和底层土区分开来,可以确定侵蚀土壤颗粒的运动模式以及讨论土坡可能的形成过程。E. Ventura 等<sup>[5]</sup>通过实验研究提出利用磁性示踪剂代替传统的核素和稀土元素进行示踪的方法。其基本原理主要是将磁性示踪剂和土壤按照一定的质量比例均匀混合后,磁性物质在侵蚀过程中随土壤一起同步运动,再利用磁化率仪分别测定土壤侵蚀发生前后的土壤磁化率。磁性示踪剂分散或沉积的区域可以由磁化率仪测量磁化率来确定。在磁性示踪剂分散的区域,磁化率下降,对应于该区域土壤被侵蚀;在磁性示踪剂沉积的区域,磁化率升高,对应于该区域土壤沉积。

近年来,国内外学者利用不同土地利用方式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。濮励杰等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,随着坡度的增大,土壤表层磁性的富集系数减小。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,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。

2 磁性矿物选择与磁参数确定

2.1 磁性示踪矿物的选取

目前土壤侵蚀磁性示踪技术选用的磁性载体可分为天然磁性矿物和人工磁性示踪剂,其中天然磁性矿物具有成本低、测定方便等特点,但其磁参数具有在季风区和西风区表现迥异的缺陷。吕厚远等<sup>[15]</sup>和 Han 等<sup>[16]</sup>通过对中国现代土壤磁化率的研究发现磁化率与成土因素间的关系比较复

杂。磁化率指标在我国最佳使用范围是中纬度半湿润地区,而在高温高湿的南方和异常干旱的西北地区,磁化率指标与湿度(如降水)间的关系十分复杂。常见的天然磁性矿物<sup>[17]</sup>如表 1。

人工磁性示踪剂主要由磁粉和塑料珠合成磁性材料,能在侵蚀过程中随土壤运动,并且在侵蚀发生前后能被磁化率仪测定出来。E. Ventura 等<sup>[5]</sup>指出球形颗粒示踪剂具有与天然土壤团聚体相类似的粒径和密度,是比较经济合理的选

择。另外,也有研究者选用粉煤灰作为示踪剂<sup>[10,18]</sup>。

### 2.2 磁参数的确定

最常见的测量参数是单位质量磁化率( $\text{m}^3/\text{kg}$ ),能给出磁性矿物集合影响的结果。剩磁测量对确定泥沙的一般磁化特性也很有用,在稳定地域中存在等温剩磁强度,因此可将试样从该区域移走后再进行磁性测量。常用的磁参数及意义见表 2<sup>[19]</sup>。

表 1 几种常见的磁性物质

磁性分类	常见物质	化学组成	质量磁化率/ ( $10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	矫顽力
铁磁性	纯铁、镍、铬	Fe, Ni, Cr	$10^{4\sim 5}$	—
亚铁磁性	磁铁矿、磁赤铁矿、磁黄铁矿、	$\text{Fe}_3\text{O}_4, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3,$	$10^{1\sim 2}$	0.02~ 0.04
	胶黄铁矿	$\text{Fe}_7\text{S}_8, \text{Fe}_3\text{S}_4$		
反铁磁性	赤铁矿、针铁矿	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3, \alpha\text{-FeOOH}$	$10^{-1}$	0.76
顺磁性	纤铁矿、水铁矿	$\gamma\text{-FeOOH}, 5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	$10^{-2}$	—
抗磁性	石英、碳酸钙、	$\text{SiO}_2, \text{CaCO}_3,$	—	—
	有机质塑料和水	$\text{H}_2\text{O} < 0$		

表 2 常用的磁性参数及意义

磁性参数	意 义
质量磁化率 $X/(10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	在弱磁场中(0.1 mT),样品的磁化强度与磁场强度之比,常用作磁性矿物含量的粗略量度
频率磁化率 $X_{fd}/\%$	样品在低频(0.47 kHz) 磁场和 高频(4.7 kHz) 磁场中磁化率值的相对差值,即 $X_{fd} = (X_{ld} - X_{hd})/X_{ld} \times 100$ ,区分存在的超顺磁性颗粒与单畴颗粒,反映磁性矿物颗粒大小的分配,一般指示了细粘滞性晶粒 $FM$ 的存在及其相对含量
非滞 后剩磁 $\text{ARM}/(10^{-6} \text{ mA}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	样品由强度逐渐下降的交变磁场(100~ 0 mT) 与恒定的弱磁场(0.04 mT) 相叠加的磁场中磁化,获得非滞 后剩磁,与单畴晶粒的含量有着正相关关系
饱和等温剩磁 $\text{SIRM}/(10^{-6} \text{ mA}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	样品能获取的最大剩磁,一般指样品在 1 T 磁场中磁化后所保留的剩磁,与磁性矿物类型及其含量有关
软剩磁 $\text{Soft RM}/(10^{-6} \text{ mA}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	样品在 20 mT 磁场中所获剩磁,用来指示磁性物质,多畴 MD 和假单畴 PSD 晶粒的含量
硬剩磁 $\text{Hard RM}/(10^{-6} \text{ mA}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	SIRM 与 IRM 300 mT 的差值,指示不完整的反铁磁性物质的含量
剩磁矫顽力 $B/T$	样品退磁所需的反向磁场强度,区分磁性矿物的类型
$\text{SIRM}/X$	识别磁性矿物类型,分辨铁磁晶粒特征。不完整的反铁磁矿物具有较大的 SIRM/X 值
$\text{IRM}_{0.1\text{T}}/\text{SIRM}$	反向磁场强度为 0.1 T 时的等温剩磁与饱和等温剩磁的比值,表示样品中赤铁矿与磁铁矿的比例

## 3 磁性示踪土壤侵蚀应用模型

利用磁性示踪技术研究土壤侵蚀主要有以下几个方面:定量研究土壤侵蚀速率、泥沙来源以及对土壤侵蚀历史过程的重建和对土壤侵蚀的时间空间分布规律的研究等。

### 3.1 利用矿物磁性示踪确定泥沙来源

利用磁性测量建立沉积物与其来源物质的联系是基于以下考虑<sup>[20]</sup>:铁元素及其化合物广泛地散布在自然系统的土壤、岩石、沉积物之中,它们极大程度上主导了自然物质的磁性特征;铁化合物是对环境中化学和温度变化最为敏感的矿物类型之一,流域物质的磁性特征会因局地环境条件的差异及自然过程(如风化、土壤发育等)或人类活动(如烧荒、垦殖等)的影响呈现明显的差异,在一定程度上打上了环境的烙印;上述自然过程和人类活动所产生的磁性矿物很可能在后继的搬运、沉积过程中保持相对的稳定。从而,沉积物的磁性特征继承了其来源物质的属性,并取决于各来源物质的配比。

沉积物来源不同,其相应的磁性矿物成分、颗粒度、含量也不同,因而它们的磁特性如磁化率、饱和剩磁、矫顽力等就

有差别。将它们和周围可能来源物质的磁特性作比较,即可得出各种沉积物准确的来源地。环境矿物磁性进行泥沙示踪的方法即在河流汇合处确定相关流域的泥沙输出程度。此法利用矿物磁性参数之间的线性关系确定数值信号,在河流汇合处及下游河段确定支流泥水来源,并用此关系确定相关支流对干流二维混合泥沙的补给程度。此项技术的必要条件是在适当时段内,支流和下游河段具有固定的平均信号(即泥沙被充分混合),依据泥沙输移机理这是可能的。当河流泥沙磁性信号常量为已知时,此项示踪技术在大多数情况下均能定量区分有关流域的泥沙补给情况。

(1) 不同土地利用类型对泥沙的贡献。俞立中等<sup>[20]</sup>从磁参数角度建立沉积物来源构成的定量分析模型,通过多元回归分析,建立一组回归方程,其自变量是各来源物质的百分含量,应变量是混合物的磁参数,表示为

$$y_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} x_i (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中:  $y_j$  ——混合物的磁参数(如磁化率、饱和等温剩磁等);  $x_i$  ——来源物质的百分含量(%);  $a_{ij}$  ——第  $i$  个来源的第  $j$  个磁参数测值(或回归方程系数);  $m$  ——物源的个数;  $n$  ——

磁参数的个数。

磁混合模型表示了来源物质的相对含量与其混合物磁参数的数量关系。但是,用解线性方程组的方法来计算沉积物来源组成存在不少实际问题。俞立中等<sup>[20]</sup>以磁混合模型为基础,对各来源组分的相对贡献量增加了非负的限制条件,并要求来源组分和为 1。同时,要求相对误差的总和趋于最小。

Objective:  $f = \sum_{j=1}^n \varepsilon_j / b_j \rightarrow \min$

Subject to:  $\varepsilon_j = |b_j - \sum_{i=1}^m x_i \alpha_{ij}|, -\varepsilon_j + \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} x_i$

$\leq b_j, \varepsilon_j + \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} x_i \geq b_j$

$\sum_{i=1}^m x_i = 1.0, 0.0 \leq \varepsilon_i \leq h_j, x_i \geq 0.0,$

$(i = 1, 2, 3, \dots, m), (j = 1, 2, 3, \dots, n)$

式中:  $x_i$ ——第  $i$  个物源组分的相对贡献(%) ;  $b_j$ ——沉积物样品的第  $j$  个磁参数测值;  $\alpha_{ij}$ ——第  $i$  个来源的第  $j$  个磁参数测值(或回归方程系数);  $h_j$ ——第  $j$  个磁参数拟合误差的最大允许值;  $\varepsilon_j$ ——第  $j$  个磁参数的实际拟合误差;  $m$ ——物源的个数;  $n$ ——磁参数的个数。

对线性规划问题求解,求得在相对拟合误差总和最小的情况下,各物源组分的相对含量(%)和沉积物样品各磁参数的实际拟合误差( $\varepsilon_j$ )。

(2) 不同支沟对主沟道泥沙的贡献。澳大利亚的 Caitecheon<sup>[4]</sup> 基于以上理论基础,给出了支流百分比( $C_p$ )的计算公式:

$C_p = \frac{X_1 - X}{X_1 - X_2} \times 100$

式中:  $C_p$ ——支流补给百分比;  $X$ ——流域磁性参数的平均值,等于  $SIRM/X$ (见表 2)。这个模型同样适用于任何存在两种泥沙来源的流域。

3.2 利用矿物磁性示踪坡面土壤侵蚀分布规律

国内外大量研究表明<sup>[20-21]</sup>,磁性信息可以反映流域内土地利用方式、植被演替、气象水文因子变化以及土壤侵蚀等的历史过程,可以提供一定时期内土壤再分布的方式和速率,为土壤侵蚀预报和小流域的发展规划提供理论基础。Eriksson<sup>[22]</sup>等在坦桑尼亚利用土壤沉积物矿物磁性分析研究土壤侵蚀速率和土壤侵蚀的历史过程,通过试验表明该方法是重建土壤侵蚀历史的一个重要手段。利用矿物磁性示踪坡面表土迁移的基本依据是土壤表土与底土存在磁性的强弱差别<sup>[14, 23]</sup>。Dan Royall<sup>[24]</sup>通过分析土壤表面磁性的变化,来确定农业集排水小流域的土壤侵蚀和沉积模式。在阿拉巴马西北部的 Gilbert 农场,结合已有的土壤形态学及土壤剖面资料和放射性核素<sup>137</sup>Cs 短期沉积数据来评估长期的泥沙输移。所有测定的土壤磁性参数都可以与土壤侵蚀联系起来,尽管它们的空间模式是不完全相同的。研究表明,在流域最陡峭的坡中部大约有 30 cm 土壤流失。他指出,利用磁性示踪技术来确定土壤再分布的一个主要的不足之处在于很难将土壤表面磁化率的数值与土壤侵蚀或沉积的深度直接联系起来。Dan Royall<sup>[25]</sup>是根据未侵蚀区域的土壤剖面特性,利用简单的耕作均一化模式来预测土壤侵蚀深度

和表面磁化率之间的关系。

$x_d^f = [\sum x^f] / h \quad (d = 0)$

$x_d^f = [(h - 1)(x_{d-1}^f) + (x_{d+h}^f)] / h \quad (d \neq 0)$

式中:  $x_d^f$ ——耕地(表层)土壤总侵蚀深度为  $d$  时的磁参数;  $i$ ——随着表土以下深度的增加(不考虑侵蚀),代表耕地土壤样品的厚度;  $x_{d-1}^f$ ——耕地前一阶段的土壤磁参数背景值;  $x_{d+h}^f$ ——在耕作深度下单位厚度上的磁参数(不考虑侵蚀);  $x^f$ ——质量磁化率,也可为其磁参数;  $h$ ——耕作深度。

3.3 人工磁性示踪剂在土壤侵蚀研究中的应用

人工磁性示踪剂的示踪原理主要是依据坡面土壤沉积和分散后,土壤磁化系数的增高和降低。因为示踪剂可以增强土粒的磁性及其和土壤颗粒的移动具有同步性,所以把和土壤具有相似密度和粒径级配的人工示踪剂与土壤按一定比例充分混合,利用降雨前后测定的磁性参数之间的差异,通过统计分析,得出磁性参数与侵蚀指标之间的定量化关系,侵蚀强度的空间分异规律,定量化描述侵蚀方式的演变及侵蚀过程的发生、发展规律。

E. Ventura 等<sup>[5]</sup>指出磁性示踪剂应与土壤均匀混合在土壤表层 3~ 5 cm 的范围内,示踪剂与土壤颗粒的质量比例控制在 5%~ 15% 之间较为合适。由于降雨、坡面层流而引起的土壤侵蚀被认为是涉及到坡面土壤分散、转移和沉积同时发生的过程,研究结果还表明,利用磁性示踪剂可以有效地分辨出土壤侵蚀和沉积的区域。E. De Jong 等<sup>[23]</sup>利用土壤磁化率的变化来研究耕作土壤上的长期土壤侵蚀的再分布。在侵蚀区域(利用核裂变产物<sup>137</sup>Cs 技术的研究结果)磁化率随土层深度变化很大,在这些位置上使用磁化率定量分析土壤分布不太可能。在土壤沉积出现的地方,沉积区上部和中部土壤磁化率高于坡底部,这些地方磁化率随土层深度的变化可用于估计土壤沉积。该方法可以精确、灵敏地测定坡面土壤侵蚀的空间变化,且不会破坏土壤原有状况。但由于区域磁化系数可能变化较大,所以本方法应用于大范围的区域性土壤侵蚀还有一定难度,目前还局限于小区范围的土壤侵蚀研究。另外,磁性示踪剂与土壤质量比例在侵蚀过程中并不一定总能保持不变,因此对不同的土壤及不同环境条件下,需要研究各种不同粒径和密度分布的磁性示踪剂。人工磁性示踪剂的示踪过程如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

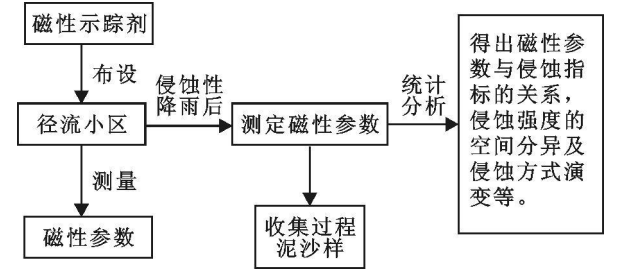


图 1 人工磁性示踪剂示踪坡面土壤侵蚀过程

4 磁性示踪技术应用前景

利用磁性示踪技术的主要优点是测量简便易行,无破坏性,并可迅速与其它示踪技术(如<sup>137</sup>Cs, <sup>7</sup>Be, <sup>210</sup>Pb 和 REE 示踪等)相结合,进行复合示踪,来研究不同侵蚀方式的演变过程、侵蚀强度的空间分异和流域内的泥沙来源等问题。通过

研究土壤中磁性矿物的种类、形状和晶粒特征,并量化它们对土壤整体的磁性贡献率,以及不同粒径的土壤颗粒中磁性矿物的赋存量和搬运沉积分异过程引起的物质磁性特征的差异,可量化研究侵蚀过程的分选性,为进一步深化坡面土壤侵蚀过程和建立土壤侵蚀预报模型奠定坚实的理论基础。同时,利用经验或理论模型把不同物源产生的磁性讯号,从总的磁测结果中定量分离出来,确定物理作用、生物化学作用以及人类活动对磁测结果差异的贡献率,解释土壤磁性增强的机理,可准确预报土壤侵蚀的发生发展。此外,通过研究流域内不同土地利用结构和方式以及不同地形地貌类型的土壤磁性参数的变化及差异性,量化研究不同土地利用方式对侵蚀量的贡献和土壤侵蚀的空间分布特征,可为优化土地利用方式,防治土壤侵蚀提供理论支持。

由于磁性测量具有连续性好、分辨率高等优点,磁性参数记录过去全球变化、气候过程和人类对环境的影响,随着更为理想的人工磁性示踪剂的研制和土壤磁性参数与土壤侵蚀速率之间的定量化模型的建立,磁性示踪技术将成为水土保持监测的有力手段之一,可提高土壤侵蚀预报的准确性和精确度,为采取有效的土壤侵蚀防治措施提供可靠的基础数据。

参考文献:

[ 1 ] 李立青, 杨明义, 刘普灵.  $^{7}\text{Be}$  在坡面土壤侵蚀中应用的研究进展[ J ]. 水土保持通报, 2003, 23( 2 ): 69– 72.

[ 2 ] 宋炜, 刘普灵, 杨明义, 等. 坡面侵蚀形态转变过程的 REE 示踪法研究[ J ]. 中国稀土学报, 2003, 21( 6 ): 711– 715.

[ 3 ] 张风宝, 杨明义, 赵晓光, 等. 磁性示踪在土壤侵蚀研究中的应用进展[ J ]. 地球科学进展, 2005, 20( 7 ): 751– 755.

[ 4 ] Caitcheon G G. Sediment source tracing using environmental magnetism: A new approach with examples from Australia[ J ]. Hydrological Processes, 1993, 7( 4 ): 349– 358.

[ 5 ] Ventura E, Nearing M A, Amore E, et al. Developing a magnetic tracer to study soil erosion[ J ]. Catena, 2001, 43: 277– 291.

[ 6 ] Oldfield F. Introduction to environmental magnetism [ R ]. 1987.

[ 7 ] Thompson, Oldfield F. Environmental Magnetism [ M ]. London: Allen & Unwin, 1986: 15– 28.

[ 8 ] Kukla G, Heller F, Ming L X, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility[ J ]. Geology, 1988, 16: 811– 814.

[ 9 ] 韩晓非, 柳云龙, 陈永强, 等. 低丘侵蚀红壤垦种熟化过程中土壤磁性特征演变规律[ J ]. 水土保持学报, 2001, 15( 2 ): 60– 63.

[ 10 ] 董元杰, 史衍玺. 坡面侵蚀的土壤磁化率及磁性示踪

试验研究[ J ]. 水土保持学报, 2004, 18( 6 ): 21– 26.

[ 11 ] ZHOU Liping, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess[ J ]. Nature, 1990, 346: 737– 739.

[ 12 ] 俞劲炎, 卢升高. 土壤磁学[ M ]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1991.

[ 13 ] 濮励杰, 包浩生, Higgitt D L. 土地退化方法应用初步研究[ J ]. 自然资源学报, 1998, 14( 1 ): 55– 61.

[ 14 ] Dearing J A, Morton R I, Price T W, et al. Tracing movements of topsoil by magnetic measurements: two case studies[ J ]. Phys. Earth Planet. Inter., 1986, 42: 93– 104.

[ 15 ] LU Houyuan, HAN Jiamao, WU Naiqin, et al. The magnetic susceptibility of modern soil in China[ J ]. Science in China: Series B, 1994, 24( 12 ): 1291– 1297 ( in Chinese ).

[ 16 ] HAN Jiamao, LU Houyuan, WU Naiqin, et al. The magnetic susceptibility of modern soil in China and its use for paleoclimate reconstruction[ J ]. Studia Geophysical et Geodati, 1996, ( 40 ): 262– 275.

[ 17 ] 刘皇凤. 环境磁学[ J ]. 地球科学进展, 1993, 8( 2 ): 85– 87.

[ 18 ] 闫海涛, 胡守云, Appel E, 等. 土壤剖面中粉煤灰垂向迁移的磁响应[ J ]. 地球物理学报, 2005, 48( 6 ): 1392– 1399.

[ 19 ] 潘永信, 朱日祥. 环境磁学研究现状和进展[ J ]. 地球物理学进展, 1996, 11( 4 ): 87– 100.

[ 20 ] 俞立中, 张卫国. 沉积物来源组成定量分析的磁诊断模型[ J ]. 科学通报, 1998, 43( 19 ): 2034– 2040.

[ 21 ] Dearing J A, Elner J K, Haphey Wood C M. Recent sediment influx and erosional processes in a Welsh upland lake– catchment based on magnetic susceptibility measurements[ J ]. Quaternary Research, 1981, 16: 356– 372.

[ 22 ] Eriksson M G, Sandgren P. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in central Tanzania[ J ]. Palaeoecology, 1999, 152.

[ 23 ] Jong E D, Nestor P A, Pennock D J. The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution[ J ]. Catena, 1998, 32: 23– 35.

[ 24 ] Dan Royall. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain[ J ]. Catena, 2001, 46: 15– 34.

[ 25 ] Dan Royall. Particle-size and analytical considerations in the mineral magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes[ J ]. Catena, 2004, 57: 189– 207.