

土壤侵蚀示踪方法研究综述

马 琨, 王兆骞, 陈 欣

(浙江大学农业生态研究所, 杭州 310029)

摘 要: 土壤侵蚀已成为极为严峻的环境问题之一, 由于降雨、坡面层流引起的土壤侵蚀被认为是涉及到坡面土壤的分散、沉积和转移同时发生的过程。分别介绍了放射性核素 ^{137}Cs 示踪, 稳定性稀土元素示踪, 磁性示踪剂在土壤侵蚀、沉积、分布和泥沙来源研究领域中的进展情况。旨在借鉴国内外研究方法上的经验。对于准确评价侵蚀泥沙在坡面空间、时间尺度上的分布、转运、沉积, 了解土壤侵蚀过程和评价基于坡面、流域的土壤侵蚀模型有重要的指导意义。

关键词: 示踪剂; ^{137}Cs ; 稀土元素; 磁性示踪剂; 土壤侵蚀

中图分类号: S157; TL 99

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2002)04-0090-06

Summary of Tracer Method on Studies of Soil Erosion

MA Kun, WANG Zhao-qian, CHEN Xin

(Agricultural Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310029, Zhejiang Province, China)

Abstract: Soil erosion has already become one of the most serious environmental problems, soil erosion by water is considered a process involving the detachment, transport and deposition of soil materials by the erosive forces of rainfall and surface flow of water. The development of radionuclide ^{137}Cs tracer, stability rare earth element tracer and magnetism tracer were used to study soil erosion, deposition, sediment distribution and the source of sediment, which were separately presented. The object was to use for reference the experience of study method. It is important that accurate evaluations of the processes of detachment, transport and deposition from hillslopes are important to better understand the process of soil erosion and evaluate physically based on hillslope or watershed scale erosion models.

Key words: tracer; ^{137}Cs ; rare earth element; magnetism tracer; soil erosion

土壤流失对包括农业和林业在内所有的自然和人工生态系统带来广泛的不利影响, 并且影响范围大, 危害持续时间长^[1]。因此, 土壤流失被认为是全球最严重的环境问题之一。随着人口增加, 土地的强化利用, 水土流失日益严重。水土流失及其引起的江河堵塞、洪水泛滥、养分流失、土壤退化、土地生产力下降、水体污染等一系列生态环境问题, 不仅为全球所关注, 而且也关系到我国农业持续发展的重大问题^[2]。在水土侵蚀监测方法研究方面, 众多研究者认为土壤侵蚀监测研究是一项非常复杂的工作^[3-6]。国内外常用的示踪方法有: 放射性核素示踪法、稳定性同位素中子活化技术以及磁性示踪剂等。但各种方法均有其优缺点。

1 核素示踪法

在土壤侵蚀研究中, 由于研究手段的限制, 致使土壤侵蚀过程中的沉积现象及侵蚀分异规律等方面很少有人涉及, 这直接影响了土壤侵蚀机理及水土流失预测、预报的研究。

因此, 探索投资少, 周期短又能测定天然状态下土壤侵蚀量的新方法成为土壤侵蚀研究工作者努力的一个重点。放射性核素的应用是从本世纪60年代初Menzel研究土壤侵蚀和放射性核素沉降运移的关系之后逐步发展起来的^[7]。核素示踪法的原理是: 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。在非侵蚀地上沉降的核素输入量可以作为观测区的背景值, 而在侵蚀地上, 土壤剖面中的核素量小于该地区的背景值。在流域中有沉积的地方, 核素总量或其分布深度则大于在非侵蚀地所观测的结果。这样通过测定核素在地表水平断面和垂直剖面上的空间分布形态, 就可测定流域不同部位的土壤侵蚀率^[8-11]。目前, 应用的核素包括 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^7Be 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{32}Si 、 ^{35}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{90}Sr 等, 其中应用最广泛的是 ^{137}Cs ^[8-24]。

^{137}Cs 在土壤侵蚀研究中的应用早在1960年, Menzel^[17]在乔治亚和威斯康星洲就开始研究了沉降在径流小区内 ^{90}Sr

* 收稿日期: 2002-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号30030030)资助。

作者简介: 马琨, 男, (1972-), 宁夏银川人, 浙江大学生态所博士研究生, 主要从事土壤侵蚀方法研究。

的流失量与土壤流失量的关系,利用核素分析建立了侵蚀速率、侵蚀产物的输运速率和泥沙淤积速率之间的关系。Gramham^[25](1963)年也发现沉降的⁸⁵Sr及¹³¹I和土壤流失量之间有一定的比例关系。Frere和Roberts^[26](1963)年测定俄亥俄州的Coshocton一个小研究流域内沉降的⁹⁰Sr流失时,发现完全被植被覆盖的流域没有⁹⁰Sr的流失,而农作区域的⁹⁰Sr的量只相当于它们的1/3~2/3。此外,国外许多研究者研究¹³⁷Cs时也发现类似规律。由于¹³⁷Cs其自身的再迁移能力极差,主要依赖于土壤颗粒的移动而发生再分布,故而具备作为土壤侵蚀示踪剂的条件^[12, 13, 15, 16, 19~22]。放射性同位素¹³⁷Cs方法在这样背景下应运而生。McHenry和Ritchie^[27](1985)开始了一系列¹³⁷Cs在空间分布的研究,并且得出结论:通过测定¹³⁷Cs的时空分布,土壤侵蚀和沉积比例就可以推算出来。

Simpson(1997)在研究Hudson河下游沉积时发现,¹³⁷Cs在河口不同部位、不同深度有着不同浓度^[28]。杨明义等^[29](1997)运用¹³⁷Cs示踪和网格点采样法对陕北典型的农耕地坡面的土壤侵蚀空间分布特征进行了研究,发现在坡脊和坡沟,随坡长的增长,¹³⁷Cs含量分布呈增加、减少,再增加的波动趋势,而侧坡则呈现相反的波动趋势,并利用新的公式计算了农耕地的侵蚀模数为11 570 t/(km²·a)。文安邦等^[30](2000)对云贵高原区龙川江流域不同源地表层土壤和坝库淤积泥沙¹³⁷Cs含量的对比,结果表明,侵蚀裸坡地和沟道重力侵蚀是坝库淤积泥沙的主要来源,随着流域面积的增大,相对产沙量为54%~85%。Brown等(1995)在研究Willamette流域农地侵蚀时发现坡地和岭脊¹³⁷Cs含量没有差异,而沉积剖面的¹³⁷Cs含量明显增加;Wallbrink^[18](1996)在研究澳大利亚Canberra也发现坡角的¹³⁷Cs大于中坡;汪阳春等^[31](1994)在研究黄土高原坡的侵蚀中发现,坡由上而下¹³⁷Cs含量呈现减弱的波动趋势;韦中亚等提出了航空能谱测量的方法,可以很好的对地表的¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²³²Th等放射性核素进行同步快速大面积监测,通过不同源地表层土壤和坝库预计泥沙¹³⁷Cs含量的对比,或¹³⁷Cs浓度的多期测量值进行比较,结合流域土地利用现状,分析不同类型源地的相对来沙量来判断泥沙的来源及运移轨迹^[32]。此外,国内外许多学者研究表明,不同土地利用方式、坡度、坡形、坡长也会影响土壤土壤侵蚀强度,从而影响土壤中¹³⁷Cs的含量^[12, 15, 20, 27~32]。Hao Yang和Qing Chang等^[16]认为,搞清¹³⁷Cs在土层中的分布是估计土壤流失率的主要因素。应用¹³⁷Cs来研究土壤的侵蚀作用的关键和基础是土壤剖面与土壤侵蚀量之间的相关关系问题,只有相对准确地建立起这种关系,才能定量地估计土壤剖面的侵蚀量。

土壤侵蚀速率的¹³⁷Cs示踪法基本原理为对比分析法,通过不同土地利用类型下土壤剖面¹³⁷Cs单位面积浓度与区域¹³⁷Cs本底值比较,建立土壤剖面¹³⁷Cs单位面积浓度、¹³⁷Cs本底值和¹³⁷Cs产生年代之间的理论模型,求算平均土壤侵蚀强度。文安邦等^[33](2000)在研究雅鲁藏布江中游地区林草地平均土壤侵蚀强度时提出了一个平均土壤侵蚀量的计算公式:

Qztas et al(1997)利用曲线拟合的方法提出了一个相对于¹³⁷Cs活度的时间、土层深度变量的三阶多项式模型^[15]。

目前,利用¹³⁷Cs的测定来计算土壤流失率有以下几种方法。(1)经验模型,如Elliot^[34](1990)发展的¹³⁷Cs的活度与土壤流失量之间的经验关系;(2)理论方法,如Kachanoski^[35](1987)的比例方法;(3)重量分析的方法(Brown et al, 1981)^[36];(4)剖面分布模型(Zhang et al, 1990)^[18];(5)质量平衡模型(Frederickes和Parrens, 1988)^[18]。这些方法已经被用在耕作土壤侵蚀的研究工作中。但是,这些计算方法都倾向于计算年平均土壤流失率,都是假定¹³⁷Cs开始沉降时沉积状况是均一的,在被土壤微粒吸附之前没有重新分布。而¹³⁷Cs的分布是不均一的,实际变动很大,有的变动幅度可达40%。(Wallbrink P. J. and Murray A. S. 1996)^[8]因此从以上研究基础上主要发展了两种模型。(1)经验模型,它利用¹³⁷Cs的损失量与通过其它方法获得的土壤侵蚀量进行统计而得到经验方程,例如,Elliot等提出估算土壤侵蚀的经验模型:Y=A·BX,是利用¹³⁷Cs的损失量与获得的土壤侵蚀量进行统计而得到的经验方程,仅适用于比较小的研究区域,无普适性。(2)理论模型,它假设土壤侵蚀量与¹³⁷Cs的损失量之间呈线性正比关系。质量平衡模型是一种理论模型,最早由Kachanoski^[35]等提出: $S_t = (S_{t-1} + T_t - E_t)k$ 其模型的建立是基于对侵蚀机理的理论分析基础之上的,综合考虑了影响土壤侵蚀的诸多因子,模型估算结果更为准确。理论模型虽得到了广泛使用,但它没有全面考虑¹³⁷Cs在土壤剖面中的分布模式,以及¹³⁷Cs的年沉降分量和衰变损失等因素,因此这个模型给出的土壤侵蚀量估计也不是最好的。David L. Higgitt^[13](1995)年通过测定¹³⁷Cs来定量估计土壤侵蚀量。他使用两种方法,一种是Elliot et al(1990)在研究径流小区土壤流失时导出的回归关系模型,另一个是假定耕层土壤被均一混合的比例模型。通过比较净土壤流失量,发现来自相同¹³⁷Cs测定数据模型计算的结果与土壤侵蚀量不在相同数量级上。利用回归模型导出的土壤流失量变幅在0.4~2.5 kg/(hm²·a),利用比例模型导出的净土壤流失量变幅在8~37 t/(hm²·a)。因此,他认为不同定量化的方法应该在不同田间状态条件下使用。例如,采用成比例的方法时,前提是假定在¹³⁷Cs沉降和测定期间,耕层的¹³⁷Cs是稳定的,没有考虑任何在土壤表层¹³⁷Cs的损失,也没有考虑导致表层¹³⁷Cs变化的连续过程,诸如来自上坡泥沙的沉积。简言之,成比例的线性关系不能反映¹³⁷Cs再分布的实际动力学过程。

杨浩等^[37](2000)利用质量平衡模型,充分考虑了¹³⁷Cs的年沉降分量、耕层厚度、¹³⁷Cs的衰变常数和采样年份的影响,认为:¹³⁷Cs的损失量与年平均土壤侵蚀量之间既非线性关系,亦非指数关系,而是一种复杂的曲线关系。唐翔宇等^[38](2002)年利用理论模型,建立起土壤¹³⁷Cs损失率与土壤侵蚀模数之间的定量关系,研究得出:红砂岩发育的红壤的侵蚀模数明显大于第四纪红色黏土发育的红壤,前者大于120 t/(hm²·a),而后者小于100 t/(hm²·a)。唐翔宇等(2001年)采用杨浩建立的分别适用于非耕作土壤和耕作土

壤的不同定量模型,给出土壤 ^{137}Cs 的剖面分布函数: $C_s = 74.621E^{-53.124X}$,并且考虑了 ^{137}Cs 的年沉降分量和衰减常数,在质量平衡基本方程的基础上,对南方红壤区耕地土壤侵蚀进行研究,结果较为成功^[39]。

但是,通常采用的 ^{137}Cs 技术有两个主要限制。其一,全球 ^{137}Cs 的沉降输入和额外 ^{137}Cs 输入的差异性,核武器 ^{137}Cs 输入在南半球显著低于北半球,并且赤道地区 ^{137}Cs 的输入低于中纬度的欧洲和北美洲。由于核武器引起的 ^{137}Cs 的沉降主要出现在1950~1960年之间,由于放射性衰变, ^{137}Cs 的总量在逐步减少,加之切而诺贝利核泄露引起的 ^{137}Cs 比核武器 ^{137}Cs 沉降输入更具有空间变动性。这种变化开始限制 ^{137}Cs 在世界范围内的使用。其二,由于从大气沉降的放射性核素 ^{137}Cs 是土壤 ^{137}Cs 的主要来源,并且沉降后主要集中在表土,半衰期长,适用于长历时的侵蚀量估算及地学上沉积物年龄的测算,但有些地区由于强烈的现代侵蚀,表土侵蚀殆尽,测定 ^{137}Cs 的量受到限制,而且 ^{137}Cs 随土壤侵蚀易造成再分布,使取样受到限制^[40~44],并且 ^{137}Cs 法只能用于研究泥沙的粘粒部分。因此有必要探索一种新的替代示踪剂来研究土壤侵蚀的时空分布。

Schimmack W 等^[44](2001)提出了用 $^{239+240}\text{Pu}$ 来代替 ^{137}Cs 的示踪方法。认为利用Pu做示踪剂有两大优点:(1)土壤中99%的 $^{239+240}\text{Pu}$ 来自于全球的大气沉降,受切尔诺贝利核泄露影响的沉积量可以忽略不计;2)利用Pu监测的精度和 ^{137}Cs 相似。但研究发现该法不足之处在于土壤中 $^{239+240}\text{Pu}$ 只能通过放射性化学程序来确定,需要消耗大量测定时间。此外和 ^{137}Cs 相比(^{137}Cs 主要结合在黏土矿物中), $^{239+240}\text{Pu}$ 主要结合在有机物和氧化物中,由于在土壤中结合形态不同,导致在土壤侵蚀转移过程中发生运移的状态不同。因为涉及到这些不确定因素,限制了 $^{239+240}\text{Pu}$ 作为示踪剂的使用。

2 REE-NAA(中子活化分析)在土壤侵蚀研究中的应用

由于稀土元素与土壤有较高的亲和力,且在土壤中含量甚微,植物富集有限,淋溶迁移不明显,对环境无放射性危害。1986年美国的Knaus等人首先利用稳定性稀土元素(REE)示踪和中子活化技术成功地在野外测定了沼泽地的演变。中国科学院水土保持研究所田均良等人对REE的研究做了改进^[45~47]。以REE元素标记示踪泥沙样品,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^[48~49](1997)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。利用REE示踪元素和中子活化技术相结合,认为中子活化分析及REE示踪不仅可以准确的测定坡面不同地形部位相对侵蚀量,还可以客观地描述降雨侵蚀过程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^[50],刘普灵^[51~52],李雅琦^[53~55],田均良^[45~47],吴普特^[56~58]等在研究时,发展了三种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,该法虽然施放简单,但点的定位选择较为困难,难以找到代表该类型平均侵蚀强度的点。虽然这些方法还存在一些问题,但国内研究者^[45~58,60~67],已经就存在问题开展了一些工作,证明了稀土元素示踪法在土壤侵蚀时空分布研究中的适用性,并给出估算坡面沟蚀率的关系式。得出结论认为:应用REE示踪时,首先应对所研究的区域按不同地貌单元、侵蚀类型以及侵蚀部位分类划分,确定示踪元素所代表的面积。点穴法观测结果仅代表所在位置的侵蚀量,用它来代表陡坡某一面积的侵蚀量就是我们所需解决的问题^[54]。选用点穴法进行小流域泥沙来源或其它区域泥沙来源研究时,其研究精度取决于点穴布置密度,密度越大,精度越高。具体布设时可采用网格法,但网格如何划分,仍需进一步研究^[61]。

石辉等^[62~63](1997)通过模拟研究,首次将REE示踪法引入到小流域侵蚀产沙的时间分布研究,结果表明,随小流域沟道的发育,流域侵蚀产沙的数量逐渐减少;次降雨过程中,不同位侵蚀产沙量随时间变化,变化趋势复杂。李雅琦等^[54~55](1997)利用可活化稳定核素示踪法研究土壤侵蚀研究时发现,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。来自坡面上部的泥沙在坡面上部的沉积比下部更明显。在坡面上部以面蚀和轻微的细沟侵蚀为主,汇流现象不明显,细沟浅沟侵蚀较多,集中于细沟,浅沟的流量大,使对侵蚀泥沙在坡面的中下部运移能力增强,沉积作用相对减弱。武春龙等^[61](1997)利用REE示踪研究时得出的研究结果认为,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可能存在增长型,增长后逐减型和波动型三种模式。在坡面上部以片蚀和轻微的细沟侵蚀为主,径流汇集不明显,因而沉积相对显著,坡面中下部则沉积相对集中。田均良等(1997)小区试验结果表明,坡面侵蚀泥沙在低雨强,长历时降雨侵蚀过程中,沉积明显,输沙比较低,且在坡面不同部位泥沙的沉积状况差异明显^[47]。

李雅琦等^[55](1998)利用REE示踪法成功地定量描述了侵蚀泥沙延小区的分布,其一次降雨的侵蚀泥沙分布总体上随坡长的增加而呈上升趋势,表现出随坡面汇流面积增加,径流量增加,侵蚀力增强的特征。侵蚀泥沙的沉积主要延径流方向分布,发生在邻近的径流区内,随着距离的增加沉积量急剧减少。利用REE作为细沟间侵蚀的示踪物质,计算可知,不同雨强条件下沟蚀率不同,随着降雨量的增加,沟蚀率增大,土壤侵蚀增强。但REE施放后,随降雨次数的增加,各坡段的相对侵蚀量的计算精度在递减^[51]。利用室内小流域模型,REE施放研究表明,小流域侵蚀产沙的主要源区随流域沟道的侵蚀发育不断变化,沟道下切侵蚀是主要的侵蚀方式^[60~61]。点穴施放法的确可用于小流域泥沙来源观测中,

但它仅仅能够代表其本身布设位置处的侵蚀强度,其研究精度取决于点穴的布置密度,密度越大,精度越高^[62-63]。杨武德、眭国平等^[64-66](1997)利用Eu定位土芯研究红壤坡地时发现在复合坡面,随坡的陡、缓、凹,土壤侵蚀表现强、弱,沉积,在陡坡地,坡顶侵蚀量大雨坡底部;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(1997, 1998)的Eu定位土芯示踪的基础是基于点穴布样的方法,但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。

REE示踪法作为一种研究土壤侵蚀的新方法,可以解决现阶段涉及很少的沉积现象和侵蚀分布规律等方面的问题,但它是一种人为施放的元素,投资较大,同时在一些极其特殊的部位(如,陡坡等)难以施放^[67]。REE法不足之处还在于中子活化分析(NAA)需要特殊的试验设备,且对于大区域或长时段的研究,REE法试验成本高,从而限制了该法的广泛应用^[49, 68-69]。

3 土壤磁化特性在土壤侵蚀研究中的应用

Eusebio Ventura Jr等(2001)^[68]提出利用磁性示踪剂替代传统的核素和稀土元素示踪的方法,他利用磁铁矿粉和聚苯乙烯混合制成直径3.2 mm,容重为1.2 g/cm³的颗粒示踪剂和土壤均匀混合后用磁力计来测定土壤磁化系数的变化。测定土壤侵蚀变化的原理主要是依据坡面流失泥沙沉积和分散后,土壤磁化系数的增高和降低。得出结论认为,利用磁力计可以精确、灵敏地测定坡面土壤侵蚀的空间变化,试验过程不破坏土壤状况。E. de Jong等(1998)^[68-71]利用土壤磁化系数的变化来研究长期土壤侵蚀的再分布。在侵蚀区域(利用¹³⁷Cs技术的研究结果)磁化系数随土层深度变化很大,在这些位置上使用磁化系数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系数高于坡底部,这些地方磁化系数随土层深度的变化可用于估计土壤沉积。试验结果发现,利用磁化系数分布变化估计靠近沉积区的区域比较成功。磁化系数的变化反映的是只区域内沉积物质的来源,而不是地形的变化。当在降雨强度较小时,流失泥沙中磁性示踪剂有富集现象,因此在定量研究土壤侵蚀率时,需要各种粒径和密度分布的磁性示踪剂。因此,也限制了磁性示踪剂在土壤侵蚀研究中的应用。

4 小 结

目前,国内外土壤侵蚀的研究方法中,径流小区法、调查法、立体摄影法、人工模拟降雨等方法在大多数下只能调查记载侵蚀作用的后果,很难同时提供侵蚀和沉积的数据,很难知道其泥沙的沉积率和泥沙来源。大部分过去用来研究土壤侵蚀的方法所提供的信息,只是特定研究区域内的泥沙平均输移率,不能提供离开坡面泥沙的来源,也不能提供泥沙在坡面内的再分布状况。核素示踪技术研究作为一种新的土壤侵蚀研究方法,已经在土壤侵蚀研究中获得了极大应用,并在土壤侵蚀的沉积、侵蚀、运移研究上取得许多成果。随着时间的推移,示踪技术在土壤侵蚀研究中被提高到了新的层次,尤其是与GIS、GPS的结合,使核素示踪技术的取样更精确、直观,分析更深入。土壤侵蚀研究方法的突破与创新,目的在于为土壤侵蚀模型的建立和完善提供理论基础,但单一的示踪方法,都存在不同的局限性。因此在利用示踪物质,研究土壤侵蚀、沉积、再分布的过程中,应该注重土壤侵蚀与土壤学、生态学、植物营养学、水文学及环境科学等领域进行交叉和融合。吸取其他学科的最新研究成果,才能促进土壤侵蚀研究技术的突破。对于准确评价侵蚀泥沙在坡面空间、时间尺度上的分布、转运、沉积;了解土壤侵蚀过程和评价基于坡面、流域的土壤侵蚀模型有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 徐世晓,赵新全,译 土壤流失状况及其生态学效应[J]. 资源生态环境网络研究动态, 2000, 11(4): 30- 35
- [2] 赵其国,我国的土地资源[J]. 地理学报, 1995, 45(2): 154- 162
- [3] 唐克丽,郑芬莉,史德明 土壤侵蚀研究与展望[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 226- 233
- [4] 唐克丽 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 1- 7
- [5] 郑粉莉 浅谈我国土壤侵蚀学科亟待加强的研究领域[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 26- 31
- [6] 邵明安 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 1- 8
- [7] Menzel, R G. Transport of ⁹⁰Sr in runoff[J]. Science, 1960, 131: 499- 500
- [8] Wallbrink, P J, Murray, A S. Determining Soil loss using the inventory ratio of excess Lead- 20 to Cesium- 137[J]. Soil Sci Soc Am. J. 1996, 60: 1201- 1208
- [9] Everett C Bonniwell, Gerald Matisoff, Peter J. Whiting. Determining the times and distances of particle transit in a mountain stream using fallout radionuclides[J]. Geomorphology, 1999, 27: 75- 92
- [10] Milton G M, Kramer, S J, Waston W L, et al. Qualitative estimates of soil disturbance in the Vicinity of CANDU ' station, utilizing measurements of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in soil core[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 55: 195- 205
- [11] Lionel Mabit, Claude Bernard. Relationship between soil ¹³⁷Cs inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed[J]. Earth and Planetary Sciences, 1998, 327: 527- 532

- [12] Collins A L, Walling D E, Sickingabula H M, et al Using ^{137}Cs measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the upper Kaleya river basin, Southern Zambia[J]. Geoderma, 2001, 104: 299-323
- [13] David L Higgitt Quantifying erosion rates from Cesium-137 measurements: A comment on Elliot and Colebark (1993): Estimates of erosion on potato lands on Krasonzems at Dorriggo, N. S. W. Using the Cesium-137 technique[J]. Aust. J. Soil Res, 1995, 33: 709-714
- [14] Montgomery J A, Busacca A J, Frazier B E, et al Evaluation soil movement using Cesium-137 and the revised universal soil loss equation[J]. Soil Sci Soc Am. J, 1997, 61: 571-579
- [15] Roshan M Bajracharya, Ratten L al, John M Kimble Use of radioactive fallout Cesium-137 to estimate soil erosion on three farms in West central OHIO[J]. Soil Science, 1998, 163(2): 133-142
- [16] Hao Yang, Qing Chang, Ming Yuan Du, et al Quantitative model of soil erosion rates using ^{137}Cs for uncultivated soil[J]. Soil Science, 1998, 163(3): 248-257
- [17] W iranatha A S, Rose C W, Salama M S A comparison using the caesium-137 technique of the relative importance of cultivation and overland flow on soil erosion in a steep semi-tropical sub-catchment[J]. Aust. J. Soil Res, 2001, 39: 219-238
- [18] Wallbrink P J, Murray A S, Olley J M. Relating suspended sediment to its original soil depth using fallout radionuclides[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1999, 63: 369-378
- [19] Timothy A Quine, Gerarel Govers, Jean Poesen, et al Fine earth translocation by tillage in stony soils in the Guadalentin southeast Spain: an investigation using Caesium-137[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 51: 279-301
- [20] Timothy A. Quine use of caesium-137 data for validation of spatially distributed erosion models: the implications of tillage erosion[J]. Catena, 1999, 37: 415-430
- [21] VandenBygaart A J. Erosion and deposition history derived by depth-stratigraphy of ^{137}Cs and soil organic carbon[J]. Soil and Tillage Research, 2001(61): 187-192
- [22] Quine T A, Walling D E, Chakela N Q K, et al Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from Caesium-137 measurements[J]. Catena, 1999, 36: 115-142
- [23] Paolo Porto, Des E Walling, Vito Ferro. Validating the use of caesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria, Southern Italy[J]. Journal of hydrology, 2001(248): 93-108
- [24] He Q, Walling D E. Calibration of a field-portable gamma detector to obtain in situ measurements of the ^{137}Cs inventories of cultivated soils and floodplain sediments[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2000, 52: 865-872
- [25] Graham E R. Factors affecting Sr-85 and I-131[J]. removal by runoff water Water Sewage Works, 1963, 110: 407-410
- [26] Frere M H, Robert H Jr. The loss of strontium-90 from small cultivated watershed[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1963, 27: 82-83
- [27] McHenry J R, Bubenzer G B. Field erosion estimated from ^{137}Cs activity measurement[J]. Trans Am Soc Agric Engi, 1985, 28: 480-483
- [28] Simpson M. man-made radionuclides and sedimentation in the Hudson River estuary[J]. Science, 1976, 194
- [29] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 用 ^{137}Cs 法研究农耕地坡面土壤空间分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 96-99, 112
- [30] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 长江上游云贵高原区泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 25-27, 103
- [31] 汪阳春, 赵庆昌. 黄土峁坡的 ^{137}Cs 法研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(3): 34-37
- [32] 韦中亚, 徐素宁, 吴景双, 等. 土壤侵蚀调查中的航空 ^{137}Cs 测量方法初探[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 45-49
- [33] 文安邦, 刘淑珍, 范建容, 等. 雅鲁藏布江中游地区土壤侵蚀的 ^{137}Cs 示踪法研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 47-50
- [34] Elliot G L, Campbell B L, Loughran R J. Correlation of erosion measurements and soil caesium-137 content[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1990, 41, 713-717
- [35] Kachanoski R G, DeLong E. Predicting the temporal relationship between soil Caesium-137 and erosion rate[J]. Environ Qual, 1984, 13(2): 301-304
- [36] Brown R B, Kling G F. Cutshall Agricultural erosion indicated by ^{137}Cs redistribution: II estimates of erosion rates [J].

- Soil Sci Soc Am J, 1981, 45: 1 191- 1 197
- [37] 杨浩, 杜明远, 赵其国. 利用 ^{137}Cs 示踪农业耕作土壤侵蚀速率的定量模型[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 296- 304
- [38] 唐翔宇, 杨浩, 赵其国, 等. 红砂岩母质侵蚀作用的 ^{137}Cs 法初步研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 121- 125
- [39] 唐翔宇, 杨浩, 曹慧. ^{137}Cs 法估算南方红壤地区土壤侵蚀作用的初步研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 4- 11
- [40] 杨明义, 田均良, 石辉. 核分析技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 100- 112
- [41] 宋炜, 刘普灵, 郑良勇. 核素示踪在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 17- 21
- [42] Eventura, M A, Nearing E Amore. The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer[J]. Catena, 2002, 48, 149- 161.
- [43] Walling D E, and He Q. Using fallout Lead- 210 measurement to estimate soil erosion on cultivated land[J]. Soil Sci Soc Am. J, 1999, 63: 1 404- 1 412
- [44] Schimmack W, Auerwald K, Bunzl K. Can $^{239+240}\text{Pu}$ replace ^{137}Cs as an erosion tracer in agricultural landscapes contaminated with Chernobyl fallout[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53: 41- 57.
- [45] Junliang T, Peihua Z, Puling L. Re tracer method for soil erosion studies[J]. Int J Sed Res, 1994, (9): 39- 46
- [46] 田均良, 周佩华, 刘普灵. 土壤侵蚀REE示踪研究法初报[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 23- 27
- [47] 田均良. 侵蚀泥沙坡面沉积研究初报[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 57- 63
- [48] 石辉, 段宏斌, 刘普灵. 坡面土壤侵蚀分布规律的初步研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 64- 68, 74
- [49] 石辉, 刘普灵, 田均良. 土壤侵蚀的中子活化示踪法研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 126- 132
- [50] 周佩华, 田均良, 刘普灵. 黄土高原土壤侵蚀与稀土元素示踪研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 2- 9
- [51] 刘普灵, 田均良, 周佩华. 土壤侵蚀稀土元素示踪法操作技术[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 10- 16
- [52] 刘普灵, 武春龙, 琚彤军, 等. 稀土元素示踪法在坡面土壤侵蚀垂直分布研究中的应用[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 331- 335
- [53] 李雅琦, 田均良, 刘普灵. 可活化稳定核素示踪法在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 核技术, 1997, 20(7): 418- 422
- [54] 李雅琦, 吴普特, 刘普灵. REE示踪法研究土壤侵蚀的室内模拟实验[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 26- 33
- [55] 李雅琦, 吴普特, 刘普灵. 土壤侵蚀示踪的中子活化分析技术[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 21- 25, 46
- [56] 吴普特, 刘普灵, 武春龙. 坡面侵蚀垂直分布特征动态变化过程初步研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 41- 46
- [57] 吴普特, 刘普灵. 沟坡侵蚀REE示踪法试验研究初报[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 69- 74
- [58] 吴普特, 周佩华, 武春龙. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47- 56
- [59] Yosof A M, Sakyll, Wood A K H. Rare earth elements determination and distribution patterns in sediments of polluted marine environment by instrumental neutron activation analysis[J]. Journal of Radioanalytical and nuclear chemistry 2001, 249(2): 333- 341.
- [60] 琚彤军, 刘普灵, 李雅琦. 示踪REE的中子活化分析[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 17- 20
- [61] 武春龙, 刘普灵, 邓世清. 坡面土壤侵蚀垂直分布定量分析研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 34- 40
- [62] 石辉, 田均良, 刘普灵. 小流域侵蚀产沙时间分布的模拟试验[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 85- 91
- [63] 石辉, 田均良, 刘普灵. 小流域侵蚀产沙空间分布的模拟试验[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 75- 84, 95
- [64] 杨武德, 王兆骞, 眭国平, 等. 红壤坡地不同土地利用方式的时空分布规律研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 155- 158
- [65] 杨武德, 王兆骞, 眭国平, 等. 红壤坡地土壤侵蚀定位土芯Eu示踪法研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 61- 65
- [66] 眭国平, 徐锴, 罗雯泓, 等. 中子活化分析技术在野外红壤侵蚀研究中的应用[J]. 核技术, 2000, 23(4): 285- 288
- [67] 石辉. 小流域侵蚀产沙研究方法进展[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(3): 102- 108
- [68] Eusebio Ventura JR, Mark A Nearing, Norton L Darrell. Developing a magnetic tracer to study soil erosion[J]. Catena, 2001, 43: 277- 291.
- [69] Eusebio Ventura JR, Mark A Nearing, Amore E, et al, The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer[J]. Catena, 2002, 48: 149- 161.
- [70] Jong E De, Nestor P A, Pennock D J. The use of magnetic susceptibility to measure long-time soil redistribution[J]. Catena, 1998, 32: 23- 35
- [71] Eriksson M G, Sandgren P M. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in Central Tanzania[J]. Palaeoecology, 1999, 152: 365- 383