

放射性核素¹³⁷Cs在土壤侵蚀研究中的应用

魏彦昌, 欧阳志云, 苗 鸿, 王效科, 高 军

(中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085)

摘 要: 利用放射性核素铯-137(¹³⁷Cs)进行土壤侵蚀研究能够简便、快速、准确地获取土壤流失、沉积和空间重新分布等详细信息。本文在简要总结该技术优越性和应用限制的基础上, 重点讨论了区域¹³⁷Cs输入背景值确定和定量转换模型选择等关键技术, 同时对¹³⁷Cs法应用的一些基本假设的合理性进行了探讨。认为改进取样方法, 结合³S和航空测量技术, 利用双核素或三核素同时示踪, 可以使该技术在研究方法上更加成熟; 加强¹³⁷Cs与土壤碳和微生物以及其它土壤理化性质指标关系的研究, 可以扩展该技术的应用领域。

关键词: 铯-137(¹³⁷Cs); 背景值; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)03-0200-07

土壤侵蚀加剧和伴随的土地质量退化是影响区域可持续发展的主要环境问题^[1]。全世界每年的净土壤流失量估计为230亿t, 相当于每十年全球土壤资源就要损耗7%^[2]。土壤侵蚀不仅破坏当地的土地资源、影响农业生产, 而且会威胁下游地区的河流水体和景观植被^[3]。土壤侵蚀问题日益严峻, 必然促使土壤侵蚀研究工作的发展, 以便于提供完善的土壤流失速率信息和可靠的土壤侵蚀评价方法。传统的土壤侵蚀研究方法如径流小区、水土流失监测点和实地高差测量法等需要投入大量的资金和人力进行长期的监测, 同时径流小区的设置也改变了原来的地貌, 使研究结果可靠性减弱。利用自然界某些核素的独特性质作为示踪剂, 对土壤侵蚀进行不同时间和空间尺度的定量研究, 是目前土壤侵蚀研究的一种新途径。这其中又以¹³⁷Cs法应用最多, 研究理论最为成熟。

¹³⁷Cs法在20世纪90年代初期才引入我国, 但发展很迅速, 目前国内已有许多高校、研究所都在使用这项技术研究土壤侵蚀^[4~10]。本文综述了¹³⁷Cs法土壤侵蚀研究的进展, 重点讨论了应用中的关键问题和注意事项, 提出该技术在方法上的改进意见, 旨在为¹³⁷Cs技术在我国土壤侵蚀研究中的正确运用提供理论依据。

1 ¹³⁷Cs法定量研究土壤侵蚀原理

¹³⁷Cs是20世纪50~60年代大气核试验产生的人工放射性核素, 在自然界中没有天然来源, 其物理半衰期30.174 a。核爆炸产生的放射性烟云在大

气层扩散, 大当量的核爆炸裂变产物可进入平流层, 3~12个月内在全球均匀分布, 而后逐渐进入对流层, 主要随大气降水过程沉降到地表。很多研究表明在纬度变化不大、气象条件均一的地区, ¹³⁷Cs的空间分布是均匀的^[4, 8]。沉降到地面的¹³⁷Cs很快被表土中的有机和无机组分强烈吸附, 限制了化学和生物过程导致的¹³⁷Cs迁移, 其在土壤中的重新分布只是由土壤侵蚀或沉积、土壤耕作等物理过程引起, 与其它因素基本无关。

早在1960年, Menzel在美国乔治亚和威斯康星洲就开始研究了沉降在径流小区内⁹⁰Sr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^[11]。1965年Rogowski等发现小面积侵蚀地块中¹³⁷Cs的重新分布与土壤侵蚀运移之间紧密相关^[12]。随后Ritchie和Henry证实了¹³⁷Cs作为示踪剂进行土壤侵蚀和沉积研究的巨大潜能^[13, 14], 从此这项技术被全球研究者广泛运用, 截至2000年相关文献已超过了2400篇^[15]。国外的研究涉及¹³⁷Cs在土壤中的水平、垂直分布特征, 定量模型的建立与评价, 以及对¹³⁷Cs技术方法的改进与评价以及包括不同地貌类型, 如坡耕地、草原、盆地、林地等的大量案例研究。我国的研究大部分是对方法本身的介绍, 在案例研究上中科院成都山地所和西北水保所在黄河中游、长江上游地区, 南京土壤所在南方红壤丘陵区开展了一些开创性的研究工作。

¹³⁷Cs定量土壤侵蚀量和侵蚀速率是通过测定研究区域侵蚀或沉积样点土壤剖面的¹³⁷Cs含量与

收稿日期: 2005-11-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30230090); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G2000046807); 中国科学院知识创新工程方向资助项目(KZCX2-405)

作者简介: 魏彦昌(1978-), 男, 博士生, 研究方向为生态系统服务功能与森林土壤学。E-mail: weiyanchang@163.com.

该区域中¹³⁷Cs输入量(背景值)相比较,得到各点¹³⁷Cs含量减少或增加的百分比。减少的样点发生土壤侵蚀,增加的样点发生土壤沉积。然后通过定量模型将¹³⁷Cs减少或增加的百分比换算成土壤侵蚀量或沉积量。背景值可以通过放射性沉降的长期监测数据计算得到,也可以在研究区域采集背景值样点实际测量获取。理想的背景值样点应取自地势平坦、既无侵蚀又无沉积发生、植被覆盖较好的区域,如山顶平坦的草地样点。在没有平坦草地的地区也可以用森林样点或50年代以前修建的梯田土壤等,但需要注意森林样点由于树冠的雨滴滞留和降雨分布不均,导致¹³⁷Cs在很小范围内有较大空间可变性。因而需要一定数量样点的平均值才能较好地代表¹³⁷Cs的背景值。

2 ¹³⁷Cs法定量研究土壤侵蚀的关键问题

2.1 背景值的确定

确定研究区域¹³⁷Cs输入的背景值资料是¹³⁷Cs法土壤侵蚀研究的重要基础,也是该方法得以实现的关键所在。所有研究样点的土壤剖面¹³⁷Cs含量都要和该区域背景值进行比较,高于背景值表明土壤有沉积,低于背景值表明土壤有侵蚀。Walling在《¹³⁷Cs技术应用手册》中规定了用于获得背景值资料的参照点选取标准^[16],他认为有代表性的参照点应选取在和研究区域相同的小流域内,并且具有最小的坡度,没有侵蚀和沉积发生,完全被植被覆盖等。在实际的研究中,这样的参照点往往不容易找到。我国黄土高原土壤侵蚀区,植被稀少、人为的景观破坏强烈,许多研究者都选择了40 a以上的坟地作为参照点^[5,8];在我国南方红壤侵蚀区有些研究者采用老水稻田或竹林地作为¹³⁷Cs参照点^[7]。选择这样的参照点在研究区域独特的自然条件下,对实现土壤侵蚀和沉积的定量研究具有重要意义。但关于获得的背景值是否可靠,是否与研究要求的精度范围相适应,还缺乏考虑。

近年来的研究表明,在认定的无干扰地块内不同样点之间的¹³⁷Cs活度存在一定的随机变化,导致这种随机变化的原因可能是不同的土壤理化性质导致¹³⁷Cs下渗和流失的不均匀性^[17~19],在森林样点可能是由于树冠的雨滴滞留和降雨分布不均等导致¹³⁷Cs沉降的不均匀^[20]。为了防止这种随机变化可能给侵蚀定量带来的误差,¹³⁷Cs背景值的正确估计需要一定数量的参照样点土壤¹³⁷Cs活度平均值来确定。参照点的个数可以通过以下的方程来确定^[21~22]

$$N = \left[\frac{t \times cv}{AE} \right]^2$$

式中: N 为需要的参照点个数; t 为95%置信区间的 t 值; cv 为变异系数(用小数表示); AE 为允许误差(小数表示)。 t 和 cv 值的确定可以预先在研究区域选取一定数量(如10个)的参照点,测量其¹³⁷Cs活度,然后统计结果得到。

2.2 定量转换模型的选择

¹³⁷Cs法能够用于定量研究土壤侵蚀和沉积速率有赖于利用相关模型将样点土壤剖面的¹³⁷Cs含量转换为土壤重新分布的定量估计值。¹³⁷Cs技术发展至今,已有大量的转换模型被提出。这些模型主要包括经验模型^[14]、比例模型^[23]、重量模型^[24]、质量平衡模型^[25]、简化的质量平衡模型^[26]和基于剖面富集的质量平衡模型^[6]等。每一个定量模型的提出,都有其一定的研究背景和理论依据,在实际研究中都有一定的应用价值。模型并没有好坏和正确与错误之分,只是存在考虑影响因素是否全面的问题。对可能的影响因素考虑越充分,模型的结果就越靠近真实值。我们总结了¹³⁷Cs法常用定量转换模型的基本形式、优缺点和应用范围,详见表1。

3 ¹³⁷Cs法土壤侵蚀研究中的一些假设

3.1 ¹³⁷Cs时间空间上的均匀分布

几乎所有的研究都认为在纬度变化不大、气象条件均一的地区,¹³⁷Cs的空间分布也是均匀的,因此可以假定研究区域内¹³⁷Cs的输入量(背景值)是均等的,可以用取样点土芯¹³⁷Cs含量与背景值比较来判断侵蚀或沉积的发生。全球范围而言,¹³⁷Cs沉降量随降雨量的增加而增加,在北纬50°以内随纬度的增加而增加。区域沉降量的多少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出现高度^[27],反映了降雨条件和当时空气中¹³⁷Cs浓度^[28]。土壤¹³⁷Cs浓度的区域性变化是降雨量分布不均的结果,但它们之间相关性并不是常数,而是随时间和空间变化而变化^[29]。因此在研究中必须选择降雨条件、土壤类型等基本一致的区域开展¹³⁷Cs法研究。如在降雨条件不同的地区必需采集不同参照点土样,获取各自的¹³⁷Cs背景值。

在¹³⁷Cs沉降的时间分布上,许多研究者都假定¹³⁷Cs沉降全部发生在首次沉降年(1954年)或最大沉降年(1963年)^[26,30~31]。而实际上1963年的沉降量只占总量的18.2%^[32]。因此在建立定量转换模型时必须考虑¹³⁷Cs年际沉降量的不同,任何缺少时间参数的模型都是不完全的。

表 1 ^{137}Cs 法土壤侵蚀研究常用转换模型比较
Table 1 Conversion models for ^{137}Cs technique in soil erosion research

模型名称 Model Name	基本形式 Base form	优缺点 Advantages	应用范围 application fields
经验模型 Experiential model	$Y = \alpha X^\beta$	形式简单、便于应用;但模型推导只局限于特定的试验小区,不能推广应用	只能在特定的研究小区应用,但可作为其它模型发展的基础
比例模型 Proportional model	$Y = 10 \frac{BdX}{100T}$	是最为简单的理论模型,但假设前提过于简单	适用于在 ^{137}Cs 最大沉降发生后土地利用方式发生改变的地区
重量模型 Gravimetric model	$Y = 10 \frac{A_{\text{ref}} - A}{C_s T}$	没有考虑耕作稀释和表明富集,以及 ^{137}Cs 的年沉降差异	用于估算特定土壤侵蚀地区平均土壤侵蚀速率
质量平衡模型 Mass balance model	$dA(t) = (1 - \Gamma)I(t) - (\lambda + P \frac{R}{d_m})A(t)$	考虑降雨、耕作、粒径等影响因素,但形式复杂	可在不同研究地区推广应用,但由于需确定参数多,需要完善的基础数据
简化的质量平衡模型 Simplified mass balance model	$Y = \frac{10dB}{P} \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{1/(\tau-1963)} \right]$	考虑因素较全面,但较质量平衡模型形式简单	可在不同研究地区推广,且易于应用
基于表面富集的质量平衡模型 Mass balance model Bbased on surface enrichment	$C_{\text{st}} = \begin{cases} A_t e^{-\lambda t} & \text{指数型 exponential} \\ A_t(1 - Z/H_s) & \text{线性型 linear} \\ A_t & \text{均一型 uniform} \end{cases}$	形式简单而且考虑因素更多,但模型考虑函数类型较少	可在不同研究地区推广,考虑了表面富集,误差更小

注: Y 为年土壤侵蚀损失量 [$t/(hm^2 \cdot a)$], X 为土壤 ^{137}Cs 损失百分率 ($X = (A_{\text{ref}} - A)/A_{\text{ref}} \times 100$), A_{ref} 为该区土壤中的 ^{137}Cs 活度基准值 (Bq/m^2), A 为采样点土壤中的 ^{137}Cs 活度 (Bq/m^2), α, β 为待定系数, B 为土壤容重 (kg/m^3), d 为耕作层深度 (m), T 为自 ^{137}Cs 沉降开始以来经历的时间 (a), C_s 为侵蚀区域土壤的当前 ^{137}Cs 平均活度 (Bq/kg), $A(t)$ 为单位面积土壤的 ^{137}Cs 总量 (Bq/m^2); $I(t)$ 为年份 t 的 ^{137}Cs 年沉降量 [$Bq/(m^2 \cdot a)$]; t 是时间 (a); Γ 是新沉降的 ^{137}Cs 在混入耕作层之前的侵蚀损失率; P 为颗粒校正因子; λ 为 ^{137}Cs 的年衰减常数 (a^{-1}); d_m 为耕作层土壤容重 (kg/m^3); R 为侵蚀速率 [$kg/(m^2 \cdot a)$]

Note: Y = mean annual soil loss, X = percentage reduction in total ^{137}Cs inventory, A_{ref} = local ^{137}Cs reference inventory, A = measured total ^{137}Cs inventory at the sampling point, α, β = constants to be determined, B = bulk density of soil, d = depth of the plough or cultivation layer, T = time elapsed since initiation of ^{137}Cs accumulation, C_s = mean ^{137}Cs concentration of surface soil within the eroded area, $A(t)$ = cumulative ^{137}Cs activity per unit area, $I(t)$ = annual ^{137}Cs deposition flux at time t , t = time since the onset of ^{137}Cs fallout, Γ = the proportion of the freshly deposited ^{137}Cs fallout removed by erosion before being mixed into the plough layer by cultivation, P = particle-size correction factor, λ = decay constant for ^{137}Cs , d_m = the average plough depth represented as a cumulative mass depth, R = erosion rate.

3.2 ^{137}Cs 在土壤中的迁移

一般研究都认为 ^{137}Cs 一旦沉降到地表和土壤接触,就立即被土壤颗粒牢固吸附,基本不会发生化学迁移和生物吸收运移等过程,其在土壤中含量的变化主要受土壤物理过程的影响,如侵蚀和沉积、土壤耕作等,因此可以用来定量研究土壤侵蚀速率。实际上 ^{137}Cs 在土壤中的迁移与土壤物理性质紧密相关,研究表明 ^{137}Cs 与土壤颗粒中的粘粒结合最为紧密,其次是粉粒和砂粒^[33]。在水分下渗率大的土壤 ^{137}Cs 会很快渗透到下层土壤,砂性和粉砂性土壤中分别只有 37% 和 40% 的 ^{137}Cs 存在于表层 5cm 的土层内。因此同样收集表层土样进行研究,会减小对砂粒含量多的土样侵蚀量的估计而扩大对粘粒含量高的土样侵蚀量的估计。

沉降在植物表面的 ^{137}Cs 大部分在一年内就会被雨水冲刷进入土壤^[34],而且植物对 ^{137}Cs 的吸收可以忽略不计。当然 ^{137}Cs 的生物迁移过程是客观存在的,有些研究也证实了植物对 ^{137}Cs 的吸

收^[35~37]。这部分生物迁移的 ^{137}Cs 量虽然不大,但在今后的研究中如能充分考虑这些影响,必将得到更为精确的研究结果。

3.3 耕作稀释和地表富集

在对耕作土壤侵蚀研究时,大部分的模型都假设除了自然衰变以外,耕作层土壤 ^{137}Cs 的活度是不变的。实际耕作表土发生侵蚀后,原耕作层以下的土壤会混入新的耕层而导致耕作层 ^{137}Cs 的总活度稀释,这样侵蚀同样厚度的耕层损失的 ^{137}Cs 要比首次侵蚀损失的 ^{137}Cs 量少。土壤流失量和 ^{137}Cs 损失量的关系从正常的线性关系转变为幂函数关系^[26]。在这种情况下其它定量模型适用性会降低,而需要考虑采用幂函数模型来进行转换^[38]。

对于非耕作土壤来说,许多研究都证实 ^{137}Cs 主要集中在表层 20~30 cm 土层内,并且随土层深度的增加迅速下降,即非耕作土壤 ^{137}Cs 具有地表富集作用。这与耕作层土壤中 ^{137}Cs 含量均匀分布不同,其流失同样的土壤会产生很大的 ^{137}Cs 损失。这也

需要对现有的模型进行改进来消除这种影响,目前已有一些基于地表富集的模型^[6],但其在其它方面考虑因素还不全面,需要进一步完善。

4 ¹³⁷Cs 法的优缺点

利用放射性核素铯-137 进行土壤侵蚀研究虽

然只经历了短短的几十年时间,但它能得到如此广泛的应用,自然有其独特的优越性。几乎在所有的利用¹³⁷Cs 研究土壤侵蚀的文献中都对其较传统方法的明显优点进行了阐述^[4,33,39],该方法的主要优越性和局限性详见表 2。

表 2 应用¹³⁷Cs 法研究土壤侵蚀的优越性和局限性
Table 2 Advantages and limitations of the ¹³⁷Cs technique

项目 items	优越性 Advantages	局限性 Limitations
可操作性 maneuverability	¹³⁷ Cs 来源确定且单一,输入量已知,便于定量研究要求;可以用于大范围的土壤侵蚀研究,而不会对研究区的景观地貌和农业生产带来不便;土壤样品不需要经过特殊的处理, ¹³⁷ Cs 含量测量过程简单; ¹³⁷ Cs 运用于土壤侵蚀研究相关文献已达 2400 多篇,在理论和技术上均较为成熟。	是一种间接的土壤侵蚀研究方法,依赖各种模型将观测到的 ¹³⁷ Cs 含量分布转换为土壤侵蚀或沉积的空间再分布;所有的转换模型都包含一定假设条件,必然会导致研究结果的不确定性;需要多学科合作和专业的实验室和昂贵的伽玛射线测量仪器,限制了该技术在大多数发展中国家的应用
适用范围 application fields	利用土壤剖面中 ¹³⁷ Cs 的含量不仅可以估算土壤侵蚀和沉积量,同时可以获得土壤再迁移的空间分布;对土壤重新分布的估算,反映了所有景观过程的整体作用,包括水蚀、风蚀、耕作影响等;利用当前采集的土样就可以对研究地区进行回顾性的研究,能提供较长期的平均土壤侵蚀和沉积速率,避免了花费大量资金建立长期水土流失监测站点	在研究片状侵蚀和大面积的表土流失中可能有效性不高,但可用来研究耕作土壤的沟蚀现象;不能用于研究短期的土壤侵蚀变化,如土地利用变化和管理措施改变造成的土壤侵蚀
研究尺度 research scale	在尺度方面的限制较少,研究区域可以在几平方米到整个小流域。这避免了利用径流小区土壤侵蚀研究中常常需要考虑的尺度转换问题。	大尺度研究需要很大的样本量,测量样品 ¹³⁷ Cs 含量会耗费很长的时间
发展潜力 development potential	¹³⁷ Cs 的半衰期为 30.174 a,需要 150 a 以上的自然衰变才能下降到初始沉降量的 3%,因此这一技术可以长期应用	

5 ¹³⁷Cs 法土壤侵蚀研究展望

5.1 完善¹³⁷Cs 土壤侵蚀研究方法

¹³⁷Cs 法在研究尺度上没有很大的限制,但研究区域的扩大会导致样本量的加大,测量需要耗时较长。例如在一个 6 公顷的区域取 117 个样点,取样需要 4 d 的时间,而接下来的¹³⁷Cs 含量测定需要 60d^[40]。所以现有的利用¹³⁷Cs 法进行土壤流失研究都局限在相对较小的区域,一般在几公顷到几平方公里以内。降低取样密度是一种有效的解决方法,但这样做会显著降低研究结果的空间分辨率。因此需要发展改进的取样方法,在减少取样量的同时能保证分析精度要求。

¹³⁷Cs 技术在研究土壤侵蚀方面具有独特的优势,但其应用有一定的限制性。在土壤侵蚀严重的地区,表土损失殆尽无法监测出¹³⁷Cs 的含量。而且该方法的研究结果是 40a 左右土壤侵蚀的平均速率,它不能对短时间内或突发事件(如暴雨)土壤侵蚀过程进行研究。因此需要发展替代核素或多核素,共同研究,会对该方法进行有益的补充。同时结合一些新兴技术如航空伽玛能谱测量技术,地理信

息系统、遥感和全球定位系统等“3S”技术,以及土壤质量评估、生态环境评价等专家系统等能更好的发挥¹³⁷Cs 的潜力。

5.2 扩展¹³⁷Cs 方法的研究领域

¹³⁷Cs 方法除了在土壤侵蚀研究中得到广泛应用外,国外关于¹³⁷Cs 与土壤碳、微生物关系的研究也逐渐受到重视。Ritchie 等^[41]在美国北部一个小流域的研究表明,¹³⁷Cs 的含量和土壤碳的含量显著相关,土壤沉积发生部位土壤碳的含量明显高于土壤侵蚀部位。Quang^[42]也认为铯-137 与土壤有机质、棕黄酸显著相关,特别是在 0~10 cm 表层土壤。这证明¹³⁷Cs 和碳在土壤中按照相同的物理方式进行迁移,调查土壤中¹³⁷Cs 的含量对于了解土壤中碳的分布有很大的帮助。在土壤微生物方面,Vinichuk 研究了 Cs-137 的在土壤中的迁移与土壤真菌的关系^[43],表明在真菌含量丰富的泥炭土中,表层 5 cm 土壤微生物的菌丝体包含¹³⁷Cs 总量的大部分,而在非泥炭土中只有大约总量的 0.3%¹³⁷Cs 在土壤真菌菌丝体中发现。有研究认为真菌在上层有机层土壤或有机层和矿物层界面含量非常丰富,可能是影响有机质丰富的森林土壤¹³⁷Cs 持留和循

环的一个关键因素^[44]。反过来说,土壤表层¹³⁷Cs 的含量也间接反映了土壤中真菌等微生物的状况。而关于森林土壤真菌的研究一直以来被认为是研究的难点,如果能建立¹³⁷Cs 与土壤真菌和其它微生物之间的关系模型,对于森林生态系统土壤微生物的研究肯定会是一个巨大的贡献。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil management in the developing countries[J]. *Soil Sci*, 2000, 165: 57—72.
- [2] Brown L R. *Conserving Soils: State of the World*[M]. New York: Norton, USA, 1984.
- [3] Pimental. World agriculture and soil erosion—erosion threaten world food production[J]. *BioScience*, 1987, 37(4): 277—283.
- [4] Zhang X, Quine T A, Walling D E. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shaanxi Province, China; An investigation using ¹³⁷Cs and rill measurements[J]. *Hydrology Proceedings*, 1998, 12(1): 171—189.
- [5] Zhang X B, Shaolong L, Chenghua L, et al. Use of caesium—137 measurements to investigate erosion and sediment sources within a small drainage basin on the loess plateau of China[J]. *Hydrological Processes*, 1989, (3): 317—323.
- [6] Yang H, Du M, Zhao Q, et al. A quantitative model for estimating mean annual soil loss in cultivated land using ¹³⁷Cs measurements[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(1): 69—79.
- [7] Zhang Yan, Peng Bu-zhuo, Gao Xiang, et al. Degradation of Soil Properties due to Erosion on Sloping Land in Southern Jiangsu Province, China[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(1): 17—26.
- [8] Feng Mingyi, Walling D E, Zhang Xinbao, et al. A study on responses of soil erosion and sediment yield to closing cultivation on sloping land in a small catchment using ¹³⁷Cs technique in the Rolling Loess Plateau, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19): 2093—2100.
- [9] Yan Ping, Dong Guangrong, Zhang Xinbao, et al. Preliminary results of the study on wind erosion in the Qinghai—Tibetan Plateau using ¹³⁷Cs technique[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1019—1025.
- [10] Lu X X, Higgitt D L. Estimating erosion rates on sloping agricultural land in the Yangtze Three Gorges, China, from caesium—137 measurements[J]. *Catena*, 2000, 39: 33—51.
- [11] Menzel R G. Transport of ⁹⁰Sr in runoff [J]. *Science*, 1960, 131: 499—500.
- [12] Rogowski A S, Tamura T. Movement of ¹³⁷Cs by runoff, erosion and infiltration on the alluvial Captina silt loam[J]. *Health Physics*, 1965, 11: 1333—1340.
- [13] Ritchie J C, Mc Henry J R, Gill A C, et al. Distribution of fallout ¹³⁷caesium in sediment profiles[J]. *Health Physics*, 1970, 19: 334.
- [14] Ritchie J C, Spraberry J A, Mc Henry J R. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout ¹³⁷caesium [J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1974, 38: 137—139.
- [15] Ritchie J C, Ritchie C A. Bibliography of publications of ¹³⁷Cesium studies related to erosion and sediment deposition. 2003. <http://hydrolab.arsusda.gov/cesium137bib.htm>.
- [16] Walling D E, Quine T A. Use of caesium—137 as a tracer of Erosion and Sedimentation; Handbook for the Application of the Caesium—137 Technique[R]. University of Exeter, 1993.
- [17] Basher L R, Matthews K M. Relationship between ¹³⁷Cs in some disturbed New Zealand soils and rainfall [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1993, 31: 655—663.
- [18] Harper R J, Gilkes R J. Evaluation of the ¹³⁷Cs techniques for estimating wind erosion losses for some sandy Western Australian soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32: 1369—1387.
- [19] Sutherland R A. Examination of caesium—137 areal activities in control(uneroded) locations [J]. *Soil Technology*, 1991, (4): 33—50.
- [20] Chisato Takenaka, Yuichi Onda, Yasunori Hamajima. Distribution of cesium—137 in Japanese forest soils; Correlation with the contents of organic carbon [J]. *The Science of the Total Environmental*, 1998, 222: 193—199.
- [21] Nolin M C, Cao Y Z, Coote D R, et al. Short—range variability of fallout ¹³⁷Cs in an uneroded forest soil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1993, 73: 381—385.
- [22] Collins A L, Walling D E, Sichingabula H M, et al. Using ¹³⁷Cs measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the Upper Kaley River basin, southern Zambia[J]. *Geoderma*, 2001, 104: 299—323.
- [23] 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.
- [24] Brown R B, Kling G F, Cutshall N H. Agricultural erosion indicated by ¹³⁷Cs redistribution; II. Estimating of erosion rates[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1981, 45(6): 1191—1197.
- [25] Walling, D. E., and Q. He. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium—137 measurements. [J]. *J. Environ. Qual.*, 1999, 28: 611—622.
- [26] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using caesium—137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Hydrologic Science Journal*, 1990, 35: 243—251.
- [27] Gibbs W J, Wilson G U. Meteorological implication of measurement of strontium in the Australia environment [J]. *Aust. J. Sci.*, 1965, 28: 59—69.
- [28] Hedvall R, Erlandsson B, Soren M. ¹³⁷Cs in fuels and products from biofuel plants in Sweden [J]. *J. Environ. Radioactivity*, 1996, 31(1): 103—117.
- [29] Lance J C, McIntyre S C, Naney J W, et al. Measuring sediment movement at low erosion rates using cesium—137[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 1303—1309.
- [30] Cao Y Z, Coote D R, Nolin N C, et al. Using ¹³⁷Cs to investigate net soil erosion at two soil benchmark sites in Quebec [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1993, 73: 515—526.
- [31] Kiss J, Jong E de, Rostand H P W. An assessment of soil ero-

- sion in west-central Saskatchewan using caesium-137 [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1986, 66, 591-600.
- [32] Owens P N, Walling D E, He Q, et al. The use of caesium-137 measurement to establish a sediment budget for the start catchment, Devon, UK [J]. Hydrological Sciences, 1997, 42, 405-423.
- [33] Ritchie J C, McHenry JR. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns; a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19, 215-233.
- [34] Rogowski A S, Tamura T. Environmental mobility of cesium-137 [J]. Radiation Botany, 1970, 10, 35-45.
- [35] Vanden Berghe and H. Gulincx. Fallout ¹³⁷Cs as a tracer for soil mobility in the landscape framework of Belgian loamy region [J]. Pedologie, 1987, 37, 5-20.
- [36] Michael Stemmer, Angelika Hromatka, Herbert Lettner, et al. Radiocesium storage in soil microbial biomass of undisturbed alpine meadow soils and its relation to ¹³⁷Cs soil-plant transfer [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004.
- [37] Grazyna Bystrzejewska-Piotrowska, Pawel L, Urban. Accumulation and translocation of cesium-137 in onion plants (*Allium cepa*) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51, 3-7.
- [38] Kachanoski R G. Estimating soil loss from changes in soil cesium-137 [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1993, 73 (4), 629-632.
- [39] Felipe Zapata. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations; recent advances and future developments [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69, 3-13.
- [40] Walling D E, Quine T A. Use of ¹³⁷Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK; potential applications and limitations [J]. Journal of Soil Sciences, 1991, 42, 147-165.
- [41] Navas A, Machin J, Soto J. Assessing soil erosion in a Pyrenean mountain catchment using GIS and fallout ¹³⁷Cs [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004.
- [42] Technical report series. Airborne gamma ray spectrometer surveying international atomic energy agency [R]. Vienna, 1991. 323.
- [43] Burch G J, Barnes C J, Moore J D, et al. Detection and prediction of sediment sources in catchments; use of ⁷Be and ¹³⁷Cs. In: Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium [J]. Aust. Nat. Univ, Canberra. 1988. 146-151.
- [44] Walling D E, He Q, Blake W. Use of Be-7 and Cs-137 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.
- [45] Walling D E, He Q, Quine T A. Use of caesium-137 and lead-210 as tracers in soil erosion investigations [R]. International Association of Hydrological Sciences Publication No. 229. 1995. 163-172.
- [46] Wallbrink P J, Murray A S. Determining soil loss using the inventory ratio of excess lead-210 to cesium-137 [J]. Soil Science Society of American Journal, 1996, 60, 1201-1208.
- [47] Konshin O. Applicability of the convection diffusion mechanism for modeling migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the soil [J]. Health Physics, 1992, 63, 291-300.
- [48] Price K R. The depth distribution of ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs and ²³⁹, ²⁴⁰Pu in soil profile samples [J]. Radiochimica Acta, 1991, 54, 145-147.
- [49] Huh C A, Su C C. Distribution of fallout radionuclides (⁷Be, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb and ²³⁹, ²⁴⁰Pu) in soils of Taiwan [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 77, 87-100.
- [50] Walling D E, Quine T A. The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations [A]. Proceedings International Symposium on Nuclear and Related Techniques in Soil/Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation [C]. International Atomic Energy Agency Publication ST-1/PUB/947. 1995. 597-619.
- [51] Feng H, Cochran J K, Hirschberg D J. ²³⁴Th and ⁷Be as tracers for the transport and dynamics of suspended particles in a partially mixed estuary [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(17), 2487-2505.
- [52] Blake W H, Walling D E, He Q. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations [J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 51(5), 599-605.
- [53] He Q, Walling D E. The distribution of fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in undisturbed and cultivated soil [J]. J. Appl. Radiat. Isot., 1997, 48, 677-690.
- [54] Ritchie J C, McCarty G W. ¹³⁷Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69, 45-51.
- [55] Quang N H. ²³⁹+²⁴⁰Pu, ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs inventories in surface soils of Vietnam [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 75, 329-337.
- [56] Mykhaylo M, Vinichuk. ¹³⁷Cs in the fungal compartment of Swedish forest soils [J]. Science of the Total Environment, 2004, 323, 243-251.
- [57] Ruhm W, Kammerer L, Hiersche L, Wirth E. The ¹³⁷Cs/¹³⁴Cs ratio in fungi as an indicator of the major mycelium location in forest soil [J]. J Environ Radioactiv, 1997, 35, 129-148.

Application of radioactive fallout cesium— ^{137}Cs for soil erosion measurement

WEI Yan-chang, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, WANG Xiao-ke, GAO Jun

(Key Lab of Systems Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Applying radioactive fallout cesium— ^{137}Cs for soil erosion measurement, one can swiftly, accurately and conveniently acquire the detail information on soil erosion, sedimentation and spatial redistribution. This paper presented the fundamentals of this technique and summarized its advantages and limitations. Two key problems of ^{137}Cs technique, namely acquiring the reference value ^{137}Cs fallout in research area and selecting the quantitative model about the amount of ^{137}Cs lost from the erosion site and soil erosion rate, were discussed in detail. Some base assumptions of application ^{137}Cs technique are also discussed. Improving sampling method, integrating ^{35}S technique and aerial survey approach, using two or three nuclides as tracer at same time for soil erosion research can make the ^{137}Cs technique more perfect. Through Research on the relationship of ^{137}Cs with soil carbon, soil microorganism and other soil properties, the service fields of this technique will be extended.

Keywords: Cesium— ^{137}Cs ; reference value; soil erosion

(上接第 148 页)

- [20] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供求发展趋势分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [21] 陕西省农业区划委员会. 陕西省农业自然资源 [M]. 西安: 西安地图出版社, 1988.
- [22] 中国科学院黄土高原综合考察队. 黄土高原地区综合治理开发分区研究 [M]. 北京: 中国经济出版社, 1991.
- [23] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理总论 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [24] 叶青超, 吴祥定, 唐克丽. 黄河流域环境演变与水沙运行规律

研究 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994.

- [25] 唐克丽主编. 中国水土保持 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 194—208.
- [26] 林业部林业区划办公室. 中国林业区划 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1987.
- [27] 任继周, 唐华竣. 西北地区农牧业可持续发展与节水战略 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [28] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.

The discussion on further study of ecological zoning on the loess plateau

SHU Ruo-jie^{1,3}, GAO Jian-en^{1,2,3}, ZHAO Jian-min¹, WU Pu-te^{1,2,3}, ZHANG Qing-feng¹

1. Northwest Science-technology University of Agriculture and Forestry, Yangling Shannxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation CAS and MWR, Yangling Shannxi 712100;

3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling Shannxi 712100)

Abstract: The division of ecological region is the base for the management and continual development of natural resources. It provides construction of ecology and environment and making of environmental management policies with scientific basis. After synthetic analysis of ecological and environment features of the Loess Plateau, the ecological stage and main ecological problems of the area are cleared. According to its natural features, similarities and differences of internal structure, we got the principles, basis and inductors for sub region of the Loess Plateau through cluster analysis of climate parameters, soil parameters, cover parameters and other social and economic factors. Then seven first grade sub regions are got, also the missions and way of ecology construction and structure of eco-system for every sub-era are provided.

Keywords: The Loess Plateau; ecological Zoning; regional Variance; ecological reconstruction