

^{137}Cs 技术测量土壤侵蚀速率常用模型讨论

高 军, 欧阳志云

(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: 定量转换模型的选用是 ^{137}Cs 技术测量土壤侵蚀速率的一个关键, 从最初的经验公式到现在的理论模型, 形成了定量转换模型的两大主要类型。对常用模型建立的原理、适用范围和不足之处进行了分析。其中的质量平衡模型(包括不同的版本)因基于 ^{137}Cs 沉降、吸附、再分布等物理过程和相对精确而受到众多研究者的青睐。其局限性表现在: 为方便计算而过度简化与实际过程或为充分考虑实际过程而过多引入无法准确测定的参数。剖面分布模型和扩散迁移模型与质量平衡模型有相似的缺点。由于各模型的假设原理和计算公式不尽相同, 使用相同 ^{137}Cs 损失值估算出来的侵蚀速率差值甚至可以超过一个数量级。现有理论模型的完善和操作性较强的模型开发将是 ^{137}Cs 技术发展的主要方向之一。

关键词: ^{137}Cs 技术; 土壤侵蚀; 定量转换模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)01-0075-05

中图分类号: S157

Discussion on Several Models Used in Converting ^{137}Cs Measurement to Soil Erosion Rates

GAO Jun, OU YANG Zhi-yun

(Key Laboratory of System Ecology, Research Center

for Ecocenvironmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The choice of a quantitative conversion model is a key to the ^{137}Cs measurement to estimate soil erosion rate. Two main kinds of models including preliminary empirical equations and recent theoretical models have been established. The ranges and limitations of the common models are discussed respectively to the mass-balance model. Great attention is paid for its precision and basis of physical-chemical processes. At the same time, there are also several limitations with them. Firstly, for the convenience of computation, the processes are simplified. Secondly, in order to improve the processes related to the ^{137}Cs precipitation and erosion, many parameters which can not be measured accurately are incorporated. The profile-distribution model and the diffusion and migration model have the same situations. The results from the same reduction of ^{137}Cs may differ remarkably between different models for their different theories and expressions. So, improving the existing models and developing more reasonable models are still one of the main tasks for the ^{137}Cs technology.

Key words: ^{137}Cs technique; soil erosion; quantitative conversion model

^{137}Cs 示踪土壤侵蚀技术以其独特的视角提供其它方法所不能提供的关于景观元素间土壤移动与沉积的信息, 因此倍受土壤侵蚀研究者的青睐。从 1965 年 Rogowski 和 Tamura 在美国橡树岭国家试验室的研究首次发现 ^{137}Cs 具有测量土壤流失速率的潜能, 到 20 世纪 80 年代国际上 4 个主要 ^{137}Cs 研究中心的形成: 即 McHenry 和 Ritchie 在美国的研究; 澳大利亚的 Campbell, Elliott, Loughran 等研究北半球低水平 ^{137}Cs 在土壤侵蚀和沉积中的应用; de Jong 和他的学生小组将 ^{137}Cs 技术广泛地应用于加拿大草原

土壤侵蚀的研究; Walling 在英国埃克塞特大学建立中心, 应用 ^{137}Cs 技术研究景观地理学内的数量变化 (Ritchie, 1998); 再到国际原子能机构 (IAEA) 组织全球范围内 25 个研究小组开展包括 ^{137}Cs 技术专题的合作项目 (Co-ordinated Research Projects (CRP))^[1]。全球范围内不同地区的研究均表明 ^{137}Cs 测量土壤侵蚀技术是一项有效的土壤中长期 (大约 40 a) 侵蚀和沉积测量技术。

将 ^{137}Cs 变化量转化为土壤侵蚀或沉积值的定量转换模型研究是 ^{137}Cs 测量方法中的一项关键技术。

收稿日期: 2005-07-15

资助项目: 土地利用与生态过程国家基金委创新研究群体 (RCEES9903)

作者简介: 高军 (1979—), 男 (汉族), 河南信阳人, 博士研究生, 研究方向为生态系统土壤保持的生态学机制研究。E-mail: hanyu312@sohu.com.

不同的研究学者根据不同的研究对象和不同的构建原理,建立了多种不同的转换模型。各种模型都有一定的适用性和局限性,至今很难统一出标准的转换模型。本文仅对一些应用范围较广的模型进行分析,明确其建立原理、适用范围和不足之处,为研究中选择正确的转换模型及模型本身的进一步完善提供依据。

1 定量转换模型

已有的定量转换模型可分为两大类:经验公式和理论模型,为方便起见,本文将分干扰地(耕地)和未干扰地 2 种情况对转换模型进行讨论。

1.1 适用于耕地土壤的定量转换模型

1.1.1 经验公式 早期的¹³⁷Cs 技术定量侵蚀速率研究大多采用经验公式,主要是在侵蚀小区内用通用土壤流失方程(USLE, Universal Soil Loss Equation)或其它土壤流失方程计算土壤流失速率,与¹³⁷Cs 的损失百分比建立经验关系。其通用关系式为:

$$Y = X \quad (1)$$

式中: Y ——土壤损失总量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; X ——核素损失百分比; K ——待定系数。

Ritchie et al.^[2]第一个试图建立可以用于侵蚀调查的土壤损失速率与¹³⁷Cs 损耗之间的数量关系。尽管其数据来源种类变化不一,他们仍认为建立两者之间的对数关系式是可能的:

$$X = 1.6 Y^{0.68} \quad (2)$$

随后公式(2)被应用于土壤侵蚀的研究。

其它学者^[3-4]也根据自己在不同地区的研究建立了不同的经验公式,其原理和表达式基本与上述各经验公式相似。

早期的经验公式为¹³⁷Cs 技术在土壤侵蚀研究中的应用奠定了基础,却有一些难以克服的缺点:

(1) 建立关系式的数据反应的时期有长有短,它们不能有效地结合,即使此问题可以忽略,由于关系式建立于特定时间和特定的地点,使得关系式仅适用于数据收集期和相似的环境中。

(2) 建立关系式的数据代表了侵蚀小区内的平均土壤净损失率,与代表点侵蚀速率的¹³⁷Cs 损耗量无法直接比较。

(3) 侵蚀小区内的¹³⁷Cs 含量反应的是从原子沉降开始到取样期间较长时间的土壤侵蚀,而测量所得的侵蚀速率代表的时间段要短的多。

正是经验公式的这些缺点限制了自身的进一步应用,但经验公式也有其不同替代的优点,由于其数据来源包括从沉降开始到取样期间侵蚀小区的长期试验结果,在提供地面实况方面有许多潜在的优势可

以开发。同时经验公式也为其它模型方法的产生奠定了基础。

1.1.2 理论模型

理论模型以比例模型、重量模型及质量平衡模型为主。

(1) 比例模型是最简单也是应用最普遍的理论模型,此模型简单地假设沉降的¹³⁷Cs 原子尘完全混合于耕层土壤中,并且假设由于侵蚀造成的土壤损失量直接与土壤中¹³⁷Cs 的损失量成比例,因此被称作比例模型。其基本表达式:

$$Y = 10 \frac{dX}{100t} \quad (3)$$

式中: d ——为耕层深度(m); ρ ——为土壤容重(kg/m^3); t ——自¹³⁷Cs 沉降开始至取样的时间长度(a)。

出于研究的需要,不同的学者对比例模型进行了改进,主要是在式(3)的基础上引入新的参数,但其基本原理相同。

比例模型由于其参数和变量值容易确定而使用方便,但由于其假设忽略了¹³⁷Cs 在土壤中的重要行为特征,使得该模型具有比较明显的缺陷。

沉降到地表的¹³⁷Cs 需要借助耕作才能均匀混入耕层,而在 2 次耕作活动的间歇期,¹³⁷Cs 往往在表层富集,而此期间的土壤侵蚀必然带走部分富集层内的¹³⁷Cs,结果,用此模型必然会过高估算侵蚀量,尤其是在侵蚀量较小的地区。

由于未考虑由于侵蚀流失和下层土壤上翻对耕层¹³⁷Cs 的稀释作用,可能导致比例模型过低估算土壤的侵蚀量。

该模型没有考虑¹³⁷Cs 沉降的年际变化对估算土壤侵蚀量的影响。

(2) 重量模型是一个简单的理论计算模型,由 Brown^[5]最先应用并称之为重量模型。其基本步骤为比较侵蚀区¹³⁷Cs 测量平均值与当地¹³⁷Cs 参考值计算出¹³⁷Cs 亏损值,利用侵蚀区表层土壤中¹³⁷Cs 的平均浓度将¹³⁷Cs 亏损值转化为该地区均土壤损失量。重量模型具有与比例模型相同的缺陷。

$$Y = 10 \frac{(A_{ref} - A)}{C_s T} \quad (4)$$

式中: A_{ref} ——¹³⁷Cs 参考值(Bq/m^2); A ——侵蚀点¹³⁷Cs 测量值(Bq/m^2); C_s ——侵蚀区土壤平均¹³⁷Cs 浓度(Bq/kg)。

(3) 质量平衡模型由 Kachanoski 等^[6]首先提出,是一种更加精确和基于物理过程的计量程序,许多研究者进行了深入的研究。它将¹³⁷Cs 的积累与损失简

化为与时间相关的逐步过程,通过模拟¹³⁷Cs 沉降对地表后的行踪、剖面中¹³⁷Cs 随侵蚀而损失、从沉降开始耕层以下不含¹³⁷Cs 土壤的混入等过程试图克服比例模型的一些限制^[7]。此模型的基本表达式:

$$\frac{dA(t)}{dt} = I(t) - \left(1 + \frac{R}{d_m}\right) A(t) \quad (5)$$

式中: $A(t)$ —— 单位面积的¹³⁷Cs 累积活度 (Bq/m²); R —— 侵蚀速率 [kg/(m²·a)]; d_m —— 代表耕层厚度的累积质量深度 (kg/m²); λ —— 衰变常数 (a); $I(t)$ —— t 年内¹³⁷Cs 的年均沉积速率 [Bq/(m²·a)]。

然而众多此类模型仍未能考虑新沉降¹³⁷Cs 在被耕作混入耕层前的移除问题,未能考虑沉积移动和运输过程的粒度选择性对¹³⁷Cs 沉积移除和运输过程的影响,因此就会影响到土壤损失估算结果的可靠性。

为克服上述局限, Walling 和 He^[8]对表达式 (5) 进行了改进:

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \alpha) I(t) - \left(1 + P \frac{R}{d_m}\right) A(t) \quad (6)$$

式中: α —— 新沉降¹³⁷Cs 在未混入耕层前被侵蚀掉部分所占百分比; P —— 粒度校正系数,移动沉积部分土壤中¹³⁷Cs 浓度与侵蚀后土壤¹³⁷Cs 浓度的比值。

由于土壤细粒对¹³⁷Cs 的强烈吸附性, P 值因此可以与土壤粒径组成建立函数关系而 α 则由当地的耕作时间和雨情决定。He 和 Walling^[9]据此推导出了它们的估算公式。虽然 He 和 Walling 考虑了众多影响土壤侵蚀的因素,但这些参数的确定本身却又存在着许多不确定性,因此计算结果的准确性仍需进一步验证和探讨。

我国学者在对土壤侵蚀定量转换模型的研究中也提出了自己的质量平衡模型。其中具有代表性的有以下几种。

Zhang^[10]在研究黄土高原侵蚀状况的过程中假设:每年流失含¹³⁷Cs 的耕层土壤为犁耕翻起不含¹³⁷Cs 的底土补偿;每年的侵蚀速率一致;收割农作物和施肥对土壤的¹³⁷Cs 含量的影响可忽略不计。并将¹³⁷Cs 的沉降过程简化为其沉降最多的 1963 年一年,提出了如下质量平衡表达式:

$$A = A_{ref} \left(1 - \frac{d}{d_s}\right)^{N-1963} \quad (7)$$

$$R = d \quad (8)$$

式中: A —— 土壤剖面中的¹³⁷Cs 总量 (Bq/m²); d —— 年土壤损失厚度 (m); N —— 取样年份 (a); α_1, α_2 —— 分别与 Walling 和 He 模型中的 α, P 相对应,且作用相同 ($\alpha_1 = 1 - \alpha, \alpha_2 = P$)

杨浩^[11]在 Kachanosk 提出的质量平衡模型的基础上,将¹³⁷Cs 在地表富集层中的分布分为指数型、线性型和均一型 3 种情况并给出相应的函数形式。通过推导得出 3 种不同分布情况下的土壤侵蚀算式。

$$\text{指数型: } (A_{ref} - A) / A_{ref} = 100 - 100 \left[\sum_{i=1}^N R_i \left(1 - \frac{d}{d_s}\right)^{N-i} + R_N \right] \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda x}}{1 - e^{-\lambda d_s}}\right) / W_N \quad (9)$$

$$\text{线性型: } (A_{ref} - A) / A_{ref} = 100 - 100 \left[\sum_{i=1}^N R_i \left(1 - \frac{d}{d_s}\right)^{N-i} + R_N \right] \left(1 - \frac{d}{d_s}\right) / W_N \quad (10)$$

$$\text{均一型: } (A_{ref} - A) / A_{ref} = 100 - 100 \left[\sum_{i=1}^N R_i \left(1 - \frac{d}{d_s}\right)^{N-i} + R_N \right] \left(1 - \frac{d}{d_s}\right)^2 / W_N \quad (11)$$

$$R = d \quad (12)$$

式中: d_s ——¹³⁷Cs 沉降后的地表富集层厚度 (cm); R_i —— 给定年份的¹³⁷Cs 沉降量占总量的百分比; W_N —— 校正常数; λ —— 衰变常数。

杨浩的质量平衡模型形式相对简单使用方便,但也存在不足:¹³⁷Cs 在土壤表面的富集状况并不能由以上 3 种函数完全代表和准确描述;模型未考虑¹³⁷Cs 沉降的年际变化情况。

1.2 适用于未干扰土壤的定量转换模型

未干扰土壤中的¹³⁷Cs 分布未受人为活动影响,其剖面分布与分布深度完全不同于耕地中¹³⁷Cs 的分布情况。因此在计算未干扰土壤的侵蚀速率时必须采用与相对应的模型。

1.2.1 经验公式 在研究澳大利亚未干扰土壤的侵蚀状况过程中, Elliot 等^[12]、Loughran 和 Campbell^[13]等学者得出了相似的经验公式:

$$Y = aX^b \quad (13)$$

此经验公式与适用于耕地的经验公式有相同的优缺点。

1.2.2 剖面分布模型 我国学者张信宝^[14]在研究黄土高原土壤侵蚀时,根据本地区土壤中¹³⁷Cs 分布状况的研究报道确定¹³⁷Cs 随土壤深度呈指数分布,提出了适用于非耕地的剖面分布模型。

$$A(x) = A_{ref} \left(1 - e^{-\lambda x / h_0}\right) \quad (14)$$

$$Y = \frac{-10}{N - 1963} \ln \left(1 - \frac{ds}{100}\right) h_0 \quad (15)$$

式中: $A(x)$ —— 剖面中给定深度 x 以上¹³⁷Cs 含量 (Bq/m²); h_0 —— 剖面指数。

该模型的优点形式简单易于使用,也有局限性:

(1) 模型忽略¹³⁷Cs 沉降输入的时间变化而将其简化为 1963 年 1 a 集中输入。

(2) 模型没有考虑¹³⁷Cs 在土壤中的再分配过程,尤其是 h_0 会随着时间增加而变大的实际情况。

(3) ¹³⁷Cs 在土壤中呈指数分布的假设并不总是成立,在呈不同函数分布的地区,计算公式也必须随之改变。

其中、2 项会导致估算的土壤侵蚀速率偏高。而第 1 项则会增加计算结果的不确定性。

1.2.3 扩散迁移模型 为了更好地反应¹³⁷Cs 随时间的沉降输入变化及其随后在土壤中的再分配情况,同时避免模拟影响再分配状况的物理、物理化学、生物学等复杂过程,Pegoyev 等^[15]在扩散迁移模型中引入了扩散系数 D [$\text{kg}^4/(\text{m}\cdot\text{a})$]和迁移速率 V [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{a}$]用于计算未扰动土壤的侵蚀速率。

$$C_u(t) = \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t) e^{-R/H}}{D(t-t)} e^{-v^2(t-t)/(4D)} \cdot (t-t) dt \quad (16)$$

$$\int_0^t PR C_u(t) e^{-(t-t)} dt = A_{137}(t) \quad (17)$$

式中: H ——¹³⁷Cs 沉降后的释放质量深度 (kg/m^2); $C_u(t)$ —— t 时的¹³⁷Cs 浓度 (Bq/kg); $A_{137}(t)$ ——¹³⁷Cs 的减少量 (Bq/m^2)

扩散系数 D 和迁移速率 V 描述了¹³⁷Cs 剖面随时间的变化状况,其值越大表明¹³⁷Cs 在土壤剖面中下渗的越深。考虑到¹³⁷Cs 在土壤剖面移动中的质量守恒、¹³⁷Cs 沉降输入的时间变化及其在土壤表层中的最初分布状况。Walling 等^[8]还给出 D, V 值的估算公式。

扩散迁移模型充分考虑了¹³⁷Cs 的沉降变化和沉降后的再分配情况,使模型能够在较大程度上反应出¹³⁷Cs 在此方面的真实物理过程,计算结果更加接近真实侵蚀状况。然而其相对较多的参数引入及其计算的粗略性也增加了结果非准确性。

此外,周维芝^[16]在研究陕西安塞地区的土壤侵蚀状况时建立了可适用于耕地和非耕地 2 种土壤的质量平衡模型,模型设定从 1956 年¹³⁷Cs 沉降开始至取样期间,¹³⁷Cs 年流失量为一定值;自 1970 年以后¹³⁷Cs 输入量很少,可以认为没有沉降,¹³⁷Cs 变化仅由土壤侵蚀引起。

$$X_n = \frac{A_{137}}{15} \cdot (1 - a\%)^{n-70} \cdot \frac{(1 - a\%) - (1 - a\%)^{16}}{1 - (1 - a\%)} \quad (18)$$

$$R = H \cdot a\% \quad (19)$$

式中: X_n —— n a 时土壤¹³⁷Cs 含量 (Bq/a); X ——¹³⁷Cs 年均沉降量 (Bq/a); $a\%$ ——¹³⁷Cs 流失百分比; H ——¹³⁷Cs 分布厚度 (m)。

周维芝的模型结构简明,不包含任何经验系数,只需测得¹³⁷Cs 流失量即可计算土壤侵蚀量。但是周维芝将¹³⁷Cs 1956—1970 年间的沉降按均匀沉降处理,且未考虑¹³⁷Cs 在沉降期间因衰变而减少的事实,也就是任意 1 a 沉降的¹³⁷Cs 因衰变作用的减少是不同的,这就使¹³⁷Cs 在早期的沉降值偏大化,导致计算结果要小于实际值。

比较不同学者建立的理论模型我们可以发现,由于¹³⁷Cs 沉降、再分配过程和土壤侵蚀过程的复杂性,各模型试图在具体过程的准确性和实际操作的可行性之间做出一个偏好选择。针对具体过程的参数选取确实可以更加真实地反应土壤侵蚀状况,而对参数估算的粗略性和实际操作的困难使得研究者不得不简化相应的模型。因此各模型间的差异实际上是研究者们在实际过程的精确性和操作过程的可行性之间做出的倾向性选择。

2 各模型测量精度之间的比较分析

虽然大家对通过单一地点测量值获取长期的土壤侵蚀格局和侵蚀速率的¹³⁷Cs 法普遍认同,但在对侵蚀速率进行数量估算时仍存在着不少非确定性因素。相同的¹³⁷Cs 损失量,利用不同的计算模型,估算出来的侵蚀速率差值甚至可以超过一个数量级。如图 1—3 所示^[8]。

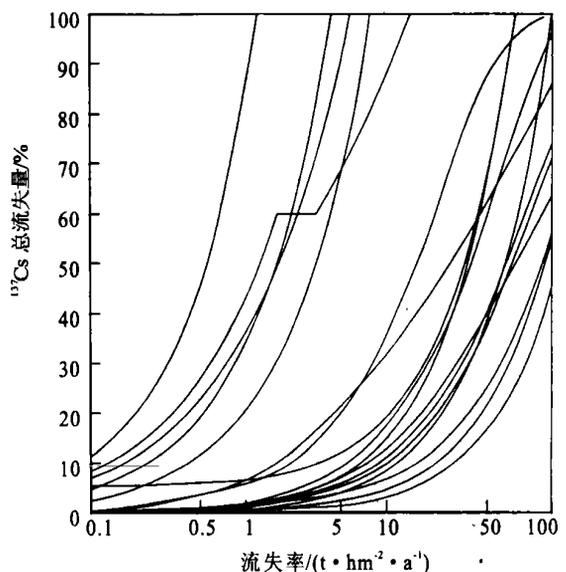


图 1 同一土壤剖面中应用不同研究者的校正关系式所得的¹³⁷Cs 总量减少百分比

其中,经验公式间的差值相对较大。由于经验公式大多来源于对具体环境、具体地点研究数据的规律总结,其规律性适用范围相对较理论模型要窄的多,因此用相同的¹³⁷Cs 损失量估算出来的土壤侵蚀结果也就各不相同(图 2)。

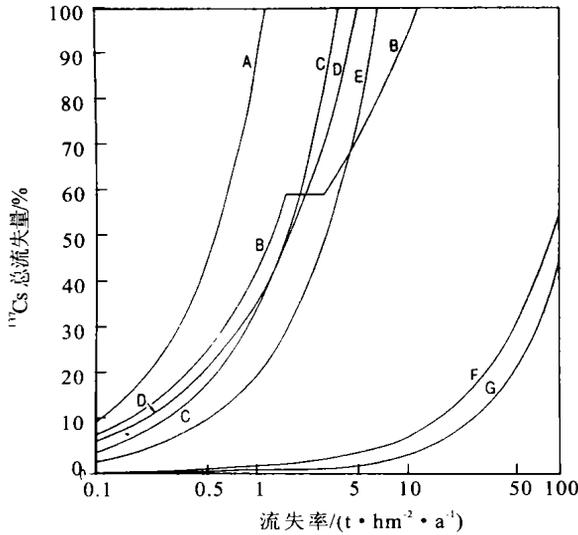


图 2 同一土壤剖面中用不同经验公式所得的¹³⁷Cs 总量减少百分比和长期侵蚀速率变化范围

各理论模型测量精度间的差异要小于经验公式测量精度间的差异(图 3),其差异产生的主要原因是研究者对¹³⁷Cs 在土壤中的行踪及其与土壤再分配过程的关系理解有限,在建立模型时未能考虑耕作活动对耕地土壤及土壤中¹³⁷Cs 再分配过程的影响,因而无法在模型中融入控制¹³⁷Cs 运输和最终归宿的关键过程进而更加真实地估算土壤再分配速率。

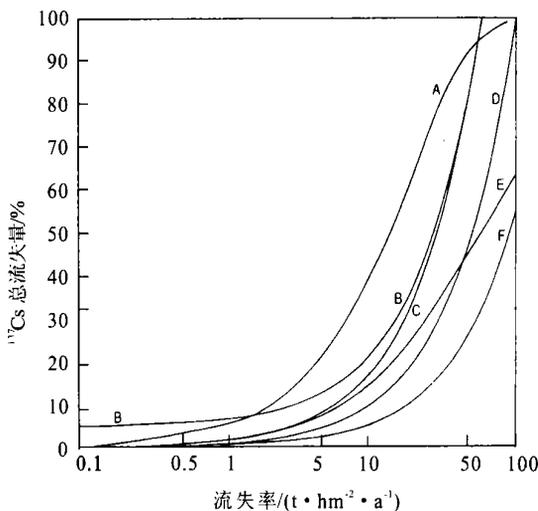


图 3 同一土壤剖面中用不同理论模型所得的¹³⁷Cs 总量减少百分比和长期侵蚀速率变化范围

为了克服经验公式、重量模型、比例模型对¹³⁷Cs 在土壤中的行踪及其与土壤再分配过程考虑不全的缺点,不少学者对基于物理过程的质量平衡模型寄予厚望,努力在此方向上有所突破。

3 结 语

由于¹³⁷Cs 吸附对土壤粒度和有机质部分的优先选择性对土壤侵蚀的影响的研究并不十分深入,在众多模型转换中未能充分考虑此现象对定量转换结果的影响。即使有些模型引入反应这些问题的因子,由于参数估算的粗略性,结果反而又影响了模型的准确度。因此应深入此方面的研究,同时有效结合经验公式的小区试验数据和质量平衡模型所反应的真实物理过程,以提供更加完善的定量转换模型。

模型是对现实过程的模拟,其假设的合理性及模拟过程的相似程度直接影响计算结果的准确性,因此在实际运用中,需要根据研究地点的实际情况和试验所能获得的数据选择最合适的模型。定量模型转换是¹³⁷Cs 技术研究土壤侵蚀中的一个关键环节。因此,完善现有模型,准确计算复杂模型中的各个参数;合理简化建模原理,开发操作性强的理论模型是¹³⁷Cs 技术发展的 2 个主要方向。

[参 考 文 献]

- [1] Zapata F, Garcia Agudo E. Future prospects for the ¹³⁷Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates [J]. Acta Geologica Hispanica, 2000, 35:197—205.
- [2] Ritchie J C, Spraberry J A, McHenry J R. Estimation soil erosion from the redistribution of ¹³⁷Cs [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1974, 38(1):137—139.
- [3] Zhang X, 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]. Hydrol Sci, 1990, 35:267—276.
- [4] Wilkin D C, Hebel S J. Erosion, deposition and delivery of sediment to Midwestern streams [J]. Water Resources, 1982, 18:1278—1282.
- [5] Brown R B, Kling G F, Cutshall N H. Agricultural erosion indicated by ¹³⁷Cs redistribution II: Estimating rates of erosion rates [J]. Soil Sci Soc Am, 1981, 45(6):1191—1197.
- [6] Kachanoski R G, de Jong E. Predicting the temporal relationship between soil caesium-137 and erosion rate [J]. Environmental Quality, 1984, 13:301—304.

(下转第 102 页)

- nese Forestry Soc, 1998, 68(2) : 61—65.
- [13] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3) : 7—14.
- [14] 史敏华, 王棣, 李任敏. 石灰岩土主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994(1) : 17—19.
- [15] 杨亚川, 莫永京, 等. 土壤—草本植物根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2) : 31—38.
- [16] 代全厚, 张力, 等. 嫩江大堤植物根系固土护坡功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(6) : 8—11.
- [17] 朱清科, 陈丽华, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002(4) : 64—67.
- [18] 陈丽华, 余新晓, 张东升. 整株林木垂向拔拉试验研究[J]. 资源科学, 2004(1) : 39—43.
- [19] 周跃, 张军, 等. 松属、青冈属乔木侧根的强度在防护林固土作用中的意义[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1) : 105—109.
- [20] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学实验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5) : 20—23.
- [21] 封金财, 王建华. 植物根系的存在对边坡稳定性的作用[J]. 华东交通大学学报, 2003, 20(5) : 42—45.
- [22] 封金财, 王建华. 乔木根系固坡作用机理的研究进展[J]. 铁道建筑, 2004(3) : 29—31.
- [23] Hong Cheng, Xiaojie Yang, et al. A study on the performance and mechanism of soil-reinforcement by Herb root system[C]. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition Vetiver and Water. An eco-technology for water quality improvement. Land stabilization and environmental enhancement. 2003. 403—410.
- [24] Cheng Hong, Liu Aiping. Comparison of root strength of different plant species. Water-saving Agriculture and sustainable use of water land Resources[C]. Vol. . Proceedings of International Conference on Water-saving. Agriculture and Sustainable Use of Water and Land Resources. Edited by Shaozhong Kang et al, Shaanxi Sci and Tech Press. 2003. 149—152.
- [25] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3) : 34—37.

(上接第 79 页)

- [7] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion data[J]. Land Degradation and Rehabilitation, 1990. 161—175.
- [8] Walling D E, He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements[J]. Environmental Quality, 1999, 28 : 611—622.
- [9] He Q, Walling D E. Interpreting the particle size effect in the adsorption of ^{137}Cs unsupported ^{210}Pb by mineral soil and sediments[J]. Environ. Radioact. 1996, 30 : 117—137.
- [10] Zhang X B, Walling D E, He Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using Caesium-137 measurements [J]. Hydrological Science, 1999, 44(1) : 33—45.
- [11] 杨浩, 等. 基于 ^{137}Cs 地表富集作用的土壤侵蚀速率的定量模型[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(3) : 42—48.
- [12] Elliott G L, Campbell B L, Loughran R J. Correlation of erosion measurements and soil Caesium-137 and erosion rate[J]. Environmental Quality, 1984, 3(2) : 301—304.
- [13] Loughran R C, Campbell B L. The identification of catchment sediment sources. In Foster I D L, Gurnell A M, Webb (Eds.) B W. Sediment and water quality in river catchments[M]. Chichester: Wiley 1995. 189—205.
- [14] 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. Hydrological Science[J]. 1990, 35 : 267—277.
- [15] Pegoyev A N, Fridman Sh D. Vertical profiles of cesium-137 in soils (English translation) [J]. Pochvove deniye, 1978, 8 : 77—81.
- [16] 周维芝. ^{137}Cs 法研究不同地貌类型土壤侵蚀强度分异[C]. 成都: 中国科学院西北水土保持研究所, 1996.