

基于¹³⁷Cs 的土壤沉积速率的定量模型

崔琚琰, 杨浩, 杜明远, 王轶虹

(南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 在假设¹³⁷Cs 在耕层中得到充分混合而变得均一的基础上, 根据质量平衡原理建立了一个根据农业耕作土壤剖面中¹³⁷Cs 的沉积量和土壤沉积量之间关系的定量模型。在建立模型的过程中, 充分考虑了¹³⁷Cs 的衰变常数, 年沉降分量, 耕层厚度和采样年份等因素。模型的模拟结果表明, ¹³⁷Cs 的沉积量与年平均土壤沉积量之间的关系是一种复杂的曲线关系。

关键词: ¹³⁷Cs; 土壤沉积速率; 定量模型

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)01—0099—04

中图分类号: S157.1, S124+.2

Quantitative Model of Soil Deposition Rate Constructed by Using ¹³⁷Cs

CUI Ju-yan, YANG Hao, DU Ming-yuan, WANG Yi-hong

(School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract: According to mass balance model and the assumption that before ¹³⁷Cs in plow layer was mixed for a uniform distribution, the surface of cultivated soil would form a surface enrichment layer, a quantitative model was developed to relate the amount of ¹³⁷Cs enrichment from the cultivated soil profile to soil deposition rate. During the construction of the model, the depth of surface enrichment layer, the ¹³⁷Cs depth distribution pattern in enrichment layer, the ¹³⁷Cs decay constant, the ¹³⁷Cs input fraction, the depth of plow layer, and sampling year were considered. Results from the model construction prove that the relationship between the rate of soil deposition and ¹³⁷Cs enrichment is neither linear nor logarithmic.

Keywords: ¹³⁷Cs; soil deposition rate; quantitative model

水土流失是当今世界重大的环境问题之一, 但是到目前为止精确地定量研究土壤的侵蚀和沉积过程仍然是一个难题^[1]。¹³⁷Cs 是 20 世纪 50—70 年代, 作为核爆炸散落的人工核素, 半衰期 30.1 a。它被释放进入平流层后, 随着大气运动, 最终以降水方式进入地表。研究发现, 它在土壤中主要和黏土颗粒结合, 基本不被雨水淋溶和植被摄取, 只随土壤颗粒发生机械迁移。基于上述铯的这些物理化学性质非常适合示踪土壤的侵蚀和沉积, 近 40 a 来已有大量的研究成果发表^[2-7]。

1965 年, Rogowski 和 Tamura 在美国橡树岭国家实验室首次发现¹³⁷Cs 具有测量土壤流失速率的潜能, 并迅速地成为研究土壤侵蚀、土壤沉积和泥沙运移的示踪剂。¹³⁷Cs 示踪法是一种简单、量化程度高、研究费用低、结果比较可靠的研究土壤流失的方法, 可在短期内对大区域的土壤流失快速做出诊断, 已在国内外得到广泛的应用; 美国、加拿大、澳大利亚、韩国等国学者分别报道了在其国内部分区域应用¹³⁷Cs 研究土壤侵蚀的情况, 我国已有黄土高原^[10]、黑土地区^[16]、青藏高

原^[11-12]、东南沿海地区^[13]、新疆塔里木盆地^[14]及苏南丘陵地区^[15]的研究报道。全球范围内不同地区的研究均表明, ¹³⁷Cs 示踪法是一项有效的研究土壤侵蚀和沉积的中长期(大约 40 a)测量技术。

土壤沉积同样能改变土壤的理化性质, 影响农作物的生长。而应用¹³⁷Cs 来研究土壤沉积作用的关键和基础是土壤剖面¹³⁷Cs 的沉积量与土壤的堆积量(亦即土壤的沉积量)之间的关系问题。只有相对准确地建立了这种关系, 才能定量地估计土壤剖面中土壤的沉积量。总结近 40 a 来的研究, 主要有 Low-ance 沉积模型, 该模型没有考虑不同的年沉降分量对土壤沉积的影响, 耕作的稀释以及耕作侵蚀以及衰变常数的影响, 忽略了耕层以下土壤与耕层的混合作用等, Zhang 和 Kachanoski 的定量模型中考虑了¹³⁷Cs 的年沉降分量的影响, 但只是进行了非常简单的处理, 如 Zhang 的模型仅将¹³⁷Cs 的年沉降分量简化成所有的¹³⁷Cs 的沉降均发生在 1963 年。这些模型虽然得到了广泛的应用, 但由于均未全面考虑

收稿日期: 2008-06-19

修回日期: 2008-09-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“滇池流域退耕还林工程对侵蚀产沙响应的多同位素联合示踪研究”(40873071); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(2007105SBJ0150)

作者简介: 崔琚琰(1983—), 女(汉族), 安徽省铜陵市人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和环境演变研究。E-mail: juyancui@126.com。

通信作者: 杨浩(1960—), 男, (汉族), 江苏省东台市人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和环境演变研究。E-mail: yanghao@njnu.edu.cn。

^{137}Cs 在土壤剖面中的分布模式(对非耕作土而言)以及 ^{137}Cs 的年沉降分量和衰变损失等因素,因此这些模型给出的土壤沉积量的估计不够精确。

本研究的目的是利用质量平衡模型,假设充分考虑 ^{137}Cs 的年沉降分量,耕层厚度, ^{137}Cs 的衰变常数和采样年份的影响,建立一个适合计算耕作土壤沉积速率的定量模型。

1 基本原理

土壤的沉积在对于农耕地和非农耕地的沉积是不同的,在非农耕地地表的沉积含量 ^{137}Cs 的浓度最高,向下呈指数减少;由于犁耕作用,农耕地中 ^{137}Cs 基本均匀分布于犁耕层深度内。

采用质量平衡模型,在给定的某一个年末, ^{137}Cs 的含量可以表达为:

$$S_t = (S_{t-1} + F_t + P_t)k, (t = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

式中: S_t ——在第 t 年末土壤剖面中 ^{137}Cs 的总含量(Bq/m^2); F_t ——在第 t 年的 ^{137}Cs 沉降量(Bq/m^2); P_t ——在第 t 年从土壤剖面中沉积的 ^{137}Cs 的数量(Bq/m^2); N —— $M-1954$, M 代表采样年份; k —— ^{137}Cs 的衰变常数(0.977)。

这个基本模型反映了1954年以来某一年份土壤剖面中 ^{137}Cs 含量的数量变化和平衡关系,我们可以利用它来建立平均年土壤堆积量与 ^{137}Cs 的沉积量之间的定量模型。

2 ^{137}Cs 技术应用土壤沉积的基本假设

(1) 首先,当地的散落分布是均一的,同时散落地表都迅速被土壤颗粒吸附;随着耕作等的物理作用的影响造成土壤的再分布^[8]。

(2) 自1954年开始, ^{137}Cs 就开始沉降在研究区域,估算土壤沉积速率可以直接根据土壤中 ^{137}Cs 总量的测量,土壤中 ^{137}Cs 的流失与富集与土壤侵蚀和沉积存在定量关系,这已被研究证明。

(3) ^{137}Cs 在研究区域内均匀分布,没有优先浓集在任何一个高度或地貌位置上,这个无法证明,因而研究区域的面积要小。

(4) 植物对 ^{137}Cs 的迁移效果在研究区域内是否相同,这无法证明,只能要求样点尽可能位于同一植物类型内;因此考虑不同的土地利用方式。同时,该模型是忽略作物的吸收作用。

(5) ^{137}Cs 沉降到达地表,在被土壤颗粒吸附固定之前的流失量是很小的,不至于影响结果的偏差。

(6) 土壤沉积土粒由高处向低处搬运时,没有发生砂、粉砂和黏土之间的分选。但是许多事实证明这种分选作用是存在的,因此粒径校正因子的引入是必要的;本模型没有考虑粒径的分选作用。

(7) ^{137}Cs 沉降量的估计是获得正确的沉积速率的关键,此值可根据本地无干扰样点或持续的 ^{137}Cs 沉降监测来估计。

3 定量模型的建立

3.1 ^{137}Cs 的沉降量

给定某年 t , ^{137}Cs 的沉降量(F_t)可以利用下列公式来表达:

$$F_t = R_t C_T \quad (t = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2)$$

式中: R_t ——在给定的年 t 中 ^{137}Cs 的沉降分量(年沉降分量),即 t 年中 ^{137}Cs 的沉降量在同一地区总的沉降量中所占的百分含量(%); C_T ——研究区内 ^{137}Cs 的总沉降量,因此满足下面的条件:

$$\sum_{t=1}^N R_t = 100\% \quad (3)$$

由于在某一研究区内的总沉降量(即 C_T)的估计是很困难的,但是可以利用研究区内背景值剖面中 ^{137}Cs 的总含量(定义为 C_R)来计算 C_T ,因 C_R 是经过放射性衰变后的值,因而有必要利用下列方程进行校正:

$$k^N R_1 C_T + k^{N-1} R_2 C_T + k^{N-2} R_3 C_T + \dots + k R_{N-1} C_T + R_N C_T = C_R \quad (4)$$

设:

$$k^N R_1 + k^{N-1} R_2 + k^{N-2} R_3 + \dots + k R_{N-1} + R_N = W_N \quad (5)$$

其中 W_N 称为校正常数,这样上面的等式可以写成:

$$C_T = \frac{C_R}{W_N} \quad (6)$$

综合以上方程,可以得到:

$$F_t = R_t C_R / W_N \quad (t = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

根据对 ^{137}Cs 的观测发现^[8],其沉降主要发生在1954年到1971年,由于苏联切尔诺贝利核电站事故,导致全球特别是北半球地区在1986年出现另一个 ^{137}Cs 的沉降高峰。

我们根据Owens(1996)的资料,获得了北半球从1954年到1990年之间的 ^{137}Cs 的沉降分量如表1所示。

3.2 ^{137}Cs 沉积量

许多研究者证实,由于农业土壤的耕作作用,在耕层范围内 ^{137}Cs 的分布具有相对均一分布的特征。假设 h_t 是第 t 年土壤增加的厚度(m), H 代表耕层厚度(m),因为沉积是均一的逐年增加,那么这两者间的比值($h_t/H + th_t$)将与第 t 年的 ^{137}Cs 沉积量(P_t)与残余量($S_{t-1} + F_t$)之间的比值相等,即:

$$h_t / (H + t \times h_t) = P_t / (S_{t-1} + F_t) \quad (8)$$

从式中可以得到:

$$P_t = h_t (S_{t-1} + F_t) / (H + t \times h_t) \quad (9)$$

表 1 北半球的¹³⁷Cs 年沉降分量

年份	年沉降分量	年份	年沉降分量	年份	年沉降分量	年份	年沉降分量
1954	1.03	1964	12.10	1974	0.73	1984	0.28
1955	2.71	1965	4.18	1975	0.59	1985	0.22
1956	3.80	1966	2.46	1976	0.40	1986	8.56
1957	3.64	1967	1.14	1977	0.63	1987	0.22
1958	4.48	1968	1.51	1978	0.62	1988	0.22
1959	9.69	1969	1.00	1979	0.40	1989	0.15
1960	2.18	1970	1.00	1980	0.25	1990	0.15
1961	2.57	1971	1.16	1981	0.45	90 年代后	0
1962	11.12	1972	0.56	1982	0.41		
1963	18.20	1973	0.42	1983	0.41		

因为最终要求得的是年平均土壤沉积厚度 $h(m)$, 可以假设每一年的 h_t 是相同的, 即:

$$h = h_t \quad (t = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (10)$$

上面等式改写为:

$$P_t = h(S_{t-1} + F_t) / (H + t \times h) \quad (11)$$

3.3 土壤沉积方程的建立

综合公式(7), (11), (1), 得到:

$$S_t = (S_{t-1} + R_t C_R / W_N) [1 + h / (H + t \times h)]^k \quad (12)$$

(t = 1, 2, 3, ..., N)

$$\text{令 } Q = [1 + h / (H + t \times h)]^k \quad (13)$$

把 Q 称为沉积常数, 则上式变为:

$$S_t = (S_{t-1} + R_t C_R / W_N) Q, \quad (14)$$

(t = 1, 2, 3, ..., N)

分别使 $t = 1, 2, 3, \dots, N$ 代入上式并简化得到下列方程

$$S_N = (R_1 Q^N + R_2 Q^{N-1} + \dots + R_N Q) C_R / W_N \quad (15)$$

而 S_N 所表示的就是沉积的土壤剖面中¹³⁷Cs 的总含量 C_E , 因此

$$S_N = C_E \quad (16)$$

则上式表达式可以表示为:

$$C_E = (R_1 Q^N + R_2 Q^{N-1} + \dots + R_N Q) C_R / W_N \quad (17)$$

由于目前通常将¹³⁷Cs 的沉积量表述为以参考剖面为基础含量的相对百分比的形式, 即 $(C_E - C_R) / C_R \times 100\%$, 其单位为 %, 因此上式可以写成

$$(C_E - C_R) / C_R = 100 [(R_1 Q^N + R_2 Q^{N-1} + \dots + R_N Q) / W_N] - 100 \quad (18)$$

这个等式满足下面 3 个条件:

$$\begin{cases} 1.954 & Q & 0.977 \\ 100\% & R_t & 0 \\ \sum_{t=1}^N R_t & = & 100\% \end{cases} \quad (19)$$

当满足上面的 3 个条件时, 方程给定的 $(C_E - C_R) / C_R$ 时, 方程(18) 的右边是一个递减函数。因此在方程给定一个 $(C_E - C_R) / C_R [100\% - (C_E - C_R) / C_R]$ 值时, Q 只有惟一的解。方程(18) 可以利用

图解法或者数值法进行求解, 图 1 是给出的一些典型采样年份的 Q 的图解。

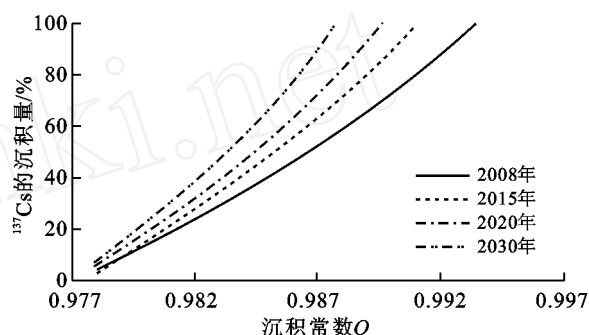


图 1 典型采样年份的¹³⁷Cs 沉积量与沉积常数关系

因此当获得 Q 值后, 容易求出年平均土壤沉积的厚度 h , 而年土壤沉积量可以从下式得到:

$$P_R = h \times D \times 10\,000 \quad (20)$$

式中: P_R ——年平均土壤沉积量 [$\text{kg} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; h ——年平均土壤沉积厚度 (m); D ——土壤密度 (kg / m^3)。

最后得到土壤年沉积量的模型:

$$P_R = \frac{H(k - Q)}{t(Q - k) - 1} \times D \times 10\,000 \quad (21)$$

4 讨论与分析

4.1 采样年份的影响

图 2 为根据模型所作的一些典型采样年份的拟合结果, 从中可以明显看出采样年份对土壤沉积速率的影响。前人的模型均是在计算出总的土壤沉积量后, 除以¹³⁷Cs 沉降的高峰年到采样年之间的年数, 从而获得年平均土壤沉积量的。由于总的年数比土壤中实际能检测到¹³⁷Cs 的年份少, 因此其结果具有较大的误差, 特别是当土壤损失超过 30% 的时候。采样年份越久远, 土壤中¹³⁷Cs 的沉积量也就越大, 同时也随着年平均土壤沉积速率的增加而不断累计沉积量, 但到达一定量时则增速缓慢趋于平稳。

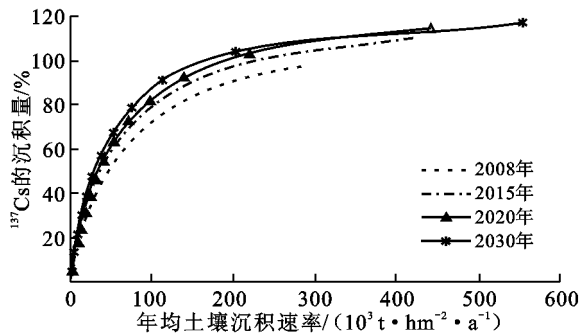


图 2 对¹³⁷Cs 的年沉降分量的不同处理情况下¹³⁷Cs 沉积量与土壤年平均沉积量的关系

注:假设采样年份为 2008 年;耕层厚度 0.2 m;土壤密度为 1 200 kg/m³。

4.2 耕层厚度的影响

图 3 为不同耕层厚度时¹³⁷Cs 沉积量与年平均土壤沉积关系曲线。从图中可以看出,耕层越厚,土壤中¹³⁷Cs 的沉积量就越多。在其它条件相同的情况下,耕层厚度的估计值是影响年平均土壤沉积量的重要因子。

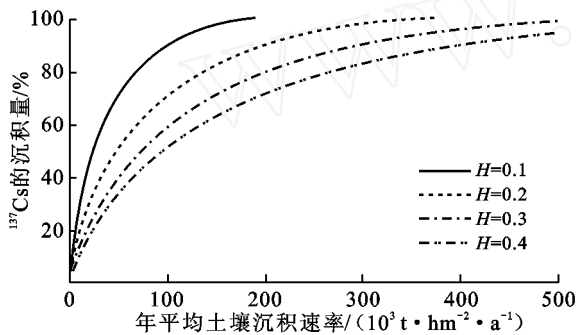


图 3 不同耕层厚度时¹³⁷Cs 沉积量与年平均土壤沉积

注:假设采样年份为 2008 年;土壤密度为 1 200 kg/m³;R_t 利用表 1 的数据。

4.3 ¹³⁷Cs 衰变的影响

在定量模型中,将¹³⁷Cs 衰变常数考虑在模型的建立中,¹³⁷Cs 衰变常数对年平均土壤沉积量的计算有一定的影响,特别是当采样的年份接近现在时,这个因子的影响是不容忽视的。

5 结论

在基于以上的假设前提下,根据质量平衡模型,建立了一个根据农业耕作土壤剖面中¹³⁷Cs 的沉积量与土壤沉积量之间关系的定量模型。该模型是土壤侵蚀模型的逆运算,也提供了一个利用示踪剂应用于农业耕作土壤的沉积速率研究的桥梁。

模型考虑了¹³⁷Cs 的衰变常数,年沉降分量,耕层厚度和采用年份等因素。

模型的模拟结果说明,¹³⁷Cs 的沉积量(CE—CR)/CR 与年平均土壤沉积量之间的关系是一种复杂的曲线关系。

[参 考 文 献]

- [1] 周启星,黄国宏. 环境生物地球化学及全球环境变化[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] Ritchie J C, Spraberry J A, McHenry J R. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout ¹³⁷Cs[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1974, 38:137-139.
- [3] Jong de E, Begg C B M, Kachanoski R G. Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1983, 63:607-617.
- [4] Kachanoski R G, Jong de E. Predicting the temporal relationship between soil cesium-137 and erosion rate[J]. J. Environ. Qual., 1984, 13:301-304.
- [5] Cao Y Z, Coote D R, Nolin M C, et al. Using ¹³⁷Cs to investigate net soil erosion at two soil benchmark sites in Quebec[J]. Can. J. Soil Sci., 1993, 73:515-526.
- [6] Wallbrink P J, Murray A S. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes [J]. Hydrological Processes, 1993, 7:297-304.
- [7] Quine T A, Navas A, Walling D E, et al. Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near las bardenas in the central Bro River Basin, Spain[J]. Land Degradation & Rehabilitation, 1994, 5:41-55.
- [8] 杨浩,杜明远,赵其国,等. 利用¹³⁷Cs 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):296-305.
- [9] 郑永春,王世杰. ¹³⁷Cs 技术定量侵蚀模型常用模型及其讨论[J]. 山地学报,2002,20(5):600-605.
- [10] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Science Journal, 1990,35(3):243-252.
- [11] 严平,董光荣,张信宝,等. 青海共和盆地土壤风蚀的¹³⁷Cs研究(II)[J]. 中国沙漠,2003,23(4):391-397.
- [12] 文安邦,刘淑珍,范建容,等. 雅鲁藏布江中游地区土壤侵蚀的¹³⁷Cs 示踪法研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):47-50.
- [13] 濮励杰,包浩生,彭补拙,等. ¹³⁷Cs 应用于我国西部风蚀地区土地退化的初步研究:以新疆库尔勒地区为例[J]. 土壤学报,1998,35(4):441-449.
- [14] 张燕,彭补拙,高翔,等. 人类干扰对土壤侵蚀及土壤质量的影响:以苏南宜兴低山丘陵区为例[J]. 地理科学,2002,22(3):335-340.
- [15] Adrian Chappell. The limitations of using ¹³⁷Cs for estimating soil redistribution in semi-arid environments [J]. Geomorphology, 1999, 29:135-152.
- [16] 阎百兴,汤洁. 东北黑土中¹³⁷Cs 背景值研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):33-36.