

^{137}Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征

方华军^{1,2}, 杨学明³, 张晓平¹, 梁爱珍¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Harrow, Ontario, Canada N0R 1G0)

摘要: 准确地测定研究区 ^{137}Cs 背景值, 建立 ^{137}Cs 流失量与土壤再分布速率之间的定量模型是 ^{137}Cs 示踪技术的关键。通过野外选择参照样地和利用热核爆炸源 ^{137}Cs 背景值模型来确定研究区 ^{137}Cs 的背景值, 在此基础上用体现耕作迁移的质量平衡模型估算黑土坡耕地不同地貌部位的土壤再分布速率, 并对主要参数进行敏感性分析。结果表明: (1) 研究区实测的 ^{137}Cs 背景值为 $2376.81 \pm 108.46\text{Bq/m}^2$, 模型预测值为 2318.4Bq/m^2 , 模型预测远离西北核试验基地的地区较为准确。(2) 研究区中坡位(坡肩和坡背) ^{137}Cs 含量最低, 侵蚀最为强烈, 平均侵蚀速率为 $33.56\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $21.67\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 坡麓和坡足则明显表现沉积, 平均沉积速率为 $-4.93\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $-24.61\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。(3) 模型预测的侵蚀速率与耕层质量深度(d)、张驰深度(H)正相关, 而与 ^{137}Cs 年沉降易被迁移的比例(γ)和颗粒校正因子(P)反相关。并且, 模型对参数 d 、 P 的敏感性分别高于参数 H 和 γ 。

关键词: 土壤再分布; ^{137}Cs 背景值模型; 质量平衡模型; 模型参数; 黑土

文章编号: 1000-0933(2005)06-1376-07 中图分类号: P333.4, S157.1 文献标识码: A

Study on soil erosion and deposition of black soils on a sloping cultivated land using ^{137}Cs tracer method

FANG Hua-Jun^{1,2}, YANG Xue-Ming³, ZHANG Xiao-Ping¹, LIANG Ai-Zhen¹ (1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Harrow, Ontario, Canada N0R 1G0). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1376~1382.

Abstract: Measuring the ^{137}Cs reference inventory in study area accurately and establishing quantitative models for converting ^{137}Cs measurements to estimates of soil redistribution rates are two key questions. The spatial variation of erosion and deposition of Black Soils on a sloping cropland in Northeast China was studied using ^{137}Cs tracer technique. In filed, three transects perpendicular to the contour were set and five slope units for each transect were located, including a summit, shoulder-slope, back-slope, foot-slope and toe-slope, respectively. Field measurements and model simulating were used to estimate Bomb-derived ^{137}Cs reference inventory in study area. The rates of soil erosion and deposition were estimated using the mass balance model incorporating soil movement by tillage. In order to compare the sensitive of parameters, we discussed the relationships between percentage loss in ^{137}Cs inventory and erosion rate by the mass balance model for different values of various parameters. The results showed that: (1) the surveying value ($2376.81 \pm 108.46\text{Bq/m}^2$) was very close to the predicted one (2318.4Bq/m^2) by the model for estimating bomb-derived ^{137}Cs reference inventories; For the areas far away from nuclear proving ground of the Northwest China, the predicted conclusions were more reasonable. (2) The ^{137}Cs inventories in shoulder-slope and back-slope were the lowest among five geomorphic positions and soil suffer erosion seriously with the rate of erosion of $33.56\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $21.67\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; Foot-slope and toe-slope behaved soil deposition obviously and the rate of deposition were $-4.93\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $-24.61\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, respectively. (3) The model predicted erosion rates were

基金项目: 中国科学院国外杰出人才支持资助项目(K09Z3); 国家自然科学基金资助项目(40271108, 40471125)

收稿日期: 2004-02-06; 修订日期: 2004-08-11

作者简介: 方华军(1978~), 男, 安徽巢湖人, 博士生, 主要从事土壤有机碳和土壤侵蚀研究。E-mail: huajunfang@yahoo.com

Foundation item: Project for supporting outstanding talents abroad of CAS (No. K09Z3) and National Natural Science Foundation of China (No. 40271108, 40471125)

Received date: 2004-02-06; Accepted date: 2004-08-11

Biography: FANG Hua-Jun, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil erosion and soil organic carbon. E-mail: huajunfang@yahoo.com

positively related to both the plow depth d and relaxation depth H , but inversely related to both γ and the particle size correction factor P . moreover, the model was more sensitive to d and p than to H and γ .

Key words: soil redistribution; model for estimating bomb-derived ^{137}Cs reference inventories, mass balance model; parameters of model; black soils

东北黑土区地形多为间歇性抬升的漫岗台地,底土粘重,表土富含有机质,土质疏松,抗蚀性低;同时该区降水集中,加上人为不合理耕种,导致黑土遭受严重的水土流失。根据 1986 年东北黑土区土壤侵蚀遥感资料,东北黑土区水土流失面积达 4.47 万 km²,占黑土区面积的 37.9%,比建国初期统计的侵蚀面积增加 82%^[1]。黑土区的水土流失主要集中在坡耕地,坡耕地黑土层以 0.1~0.5cm/a 递减,预计不同开垦年限的黑土将在 40~100a 内将完全消失^[1,2]。虽然东北黑土侵蚀非常严重,但是长期以来黑土侵蚀没有得到应有的重视,其中一个重要的原因就是缺乏适宜的研究方法。核素示踪技术弥补了其它常规方法的不足,用于研究土壤侵蚀和沉积速率是目前土壤学及生态学前沿领域之一^[3,4]。目前,黑土区土壤侵蚀(水蚀和风蚀)的研究基本上局限于小区监测^[5]或土壤侵蚀模型^[6]等方法,核素示踪技术在黑土侵蚀研究中是极为少见的。 ^{137}Cs 作为大气核试验所产生的人工放射性核素,以其独特的理化性质而成为研究土壤侵蚀和泥沙沉积的一种良好的示踪源。准确地测定研究区 ^{137}Cs 背景值,建立 ^{137}Cs 流失量与土壤再分布速率之间的定量模型是 ^{137}Cs 示踪技术迫切需要解决的两个关键性问题。本研究通过野外采样和利用热核爆炸源 ^{137}Cs 背景值模型来估计研究区的 ^{137}Cs 背景值,并与全国部分地区背景值进行比较;利用体现耕作迁移的质量平衡模型估算研究区不同地貌部位土壤侵蚀和沉积速率,同时进行模型参数的敏感性分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省德惠市松花江镇西南 5km 的沫石河小流域(N:44°43.0', E:125°51.6')。属于中温带半湿润气候,年均温 4.4°C,年均降水 533.7mm,降水主要集中在 6、7、8 三个月。采样区位于小流域的北坡,坡长 253m,相对高差 9.07~9.33m,地形为黑土区典型的漫岗台地,包括各种地貌类型:坡顶,坡肩,坡背,坡麓和坡足。坡顶坡度平缓,平均坡度为 2.6°;坡肩坡度最大,平均为 3.5°;坡背平均为 2.2°;坡麓和坡足部位坡度最小,平均为 1.1°。采样区为农田,玉米连作一直是该区的主要种植方式,顺向打垄和耕翻作业是该区常用的土壤管理方式。采样区土壤属于典型黑土亚类中的中层黑土。

1.2 土壤采样及分析方法

利用地球同步技术卫星自动聚焦水准仪(GTS601AF)进行采样区高程和坡度的测量,用 SUFER 软件绘制等高线和采样点布设图(如图 1)。土壤样品采集于 2002 年 10 月,沿着北坡分别设计 3 个地形断面(transect)。每个断面相距 25m,在每个断面上选择 5 个典型地貌类型分别代表坡顶(4)、坡肩(3)、坡背(2)、坡麓(1)和坡足(0)。各地貌部位分别距离坡脊 28m,43m,118m,213m 和 253m。在每个地貌部位挖一个长为 100cm 宽为 45cm 的土壤剖面。0~50cm 深度以 5cm 间隔采样,50~100cm 深度以 10cm 间隔采样。

土壤 ^{137}Cs 活度采用美国 ORTEC 公司生产的 HPGe 探测器(GEM-40190 型) γ 能谱仪进行测定。该谱仪的主要指标是:半高宽 1.33MeV;相对探测效率为 40%;峰康比 62:1; ^{137}Cs 含量用 661.6keV(射线的全峰面积计算,每个样品测量时间为 30000s;比活度采用与标准源相对比较法求得,本次测量 ^{137}Cs 的探测下限 LLD≈0.71Bq/kg,标准误差计算采用 95% 置信度。

1.3 ^{137}Cs 背景值估算模型

Walling 和 He^[7]假定 ^{137}Cs 通过干湿沉降到达地表,根据全球范围热核爆炸源 ^{137}Cs 总累积沉积量和全球降水分布数据来估计某个研究区域的 ^{137}Cs 背景值。

在经度为 ϕ ,纬度为 θ ,降水量为 $P(\text{mm})$ 的区域,其 ^{137}Cs 总量 $A(\phi, \theta)$ 可表示为:

$$A(\phi, \theta) = f_{h,z}(\phi_z) A_{h,b}(\theta_b) [\beta + \gamma(P/P')^\delta] / \alpha(\phi_z, \theta_b) \quad (1)$$

式中, $f_{h,z}(\phi_z)$ 为 16 个经度带 ^{137}Cs 的相对沉降量, $h=1, 2$, 分别代表北半球和南半球, $z=1, 2, \dots, 8$, ϕ_z 代表经度带位置。 $A_{h,b}(\theta_b)$ 为每个纬度带 ^{137}Cs 总量的平均值(Bq/m²), $b=1, 2, \dots, 9$, θ_b 代表纬度带位置。 $P' = 1\text{mm}$; β , γ 和 δ 为常量, 与 ^{90}Sr 沉降模型取相似值。常量 $\alpha(\phi_z, \theta_b)$ 可由下列公式计算得出:

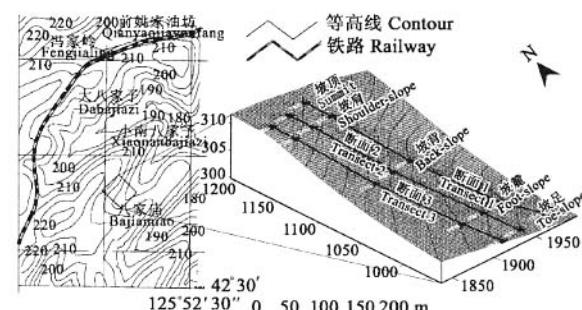


图 1 研究区位置及采样点分布图

Fig. 1 The location of Study area and distribution of sampling points

$$\alpha(\phi_z, \theta_b) = \frac{1}{S} \iint_{\phi_z, \theta_b} dS [\beta + \gamma(P/P')^\delta] = \beta + \frac{\gamma}{S} \iint dS (P/P')^\delta = \beta + \gamma \overline{(P/P')^\delta} \quad (2)$$

式中, S 为区域的面积(m^2), $\overline{(P/P')^\delta}$ 为区域 $(P/P')^\delta$ 的平均值。

Walling 和 He^[8] 利用世界各地数据校正上述提及的模型, 建立一个更为准确的热核爆炸源 ^{137}Cs 背景值模型:

$$A(\phi, \theta) = 1.10 f_{h,z}(\phi_z) A_{h,b}(\theta_b) [\beta + \gamma(P/P')^\delta] / \alpha(\phi_z, \theta_b) \quad (3)$$

常量 β , γ 和 δ 相应地取值 0.15, 0.051 和 0.45。根据某个研究区降水量数据, 由公式(3)可计算出该区 ^{137}Cs 的背景值。

1.4 体现耕作迁移的质量平衡模型(MBM₃)

利用 ^{137}Cs 活度和背景值之间的差异来估算研究区土壤再分布速率的模型很多, 其中 MBM₃ 模型综合考虑了 ^{137}Cs 在地表的富集作用, 颗粒的选择性迁移, ^{137}Cs 沉降及衰变, 以及耕作迁移的影响, 考虑因素较多, 估算结果相对比较合理^[7]。此模型考虑耕作活动引起的土壤再分配作用的影响, 作了一个重要假设: 将土坡划分为若干个坡段, 每个坡段可近似地看成一条直线, 把耕作活动导致的土壤损失视为耕作造成的第 $i-1$ 个坡段(从坡顶计)向第 i 个坡段迁移的土壤量。对于发生侵蚀损失的土壤而言, ^{137}Cs 总量 $A(t)$ (Bq/m^2)随时间变化可表示为:

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \Gamma)I(t) + R_{t,in}C_{t,in}(t) - R_{t,out}C_{t,out}(t) - R_wC_{w,out}(t) - \lambda A(t) \quad (4)$$

式中, $C_{t,in}$, $C_{t,out}$ 和 $C_{w,out}$ 分别是耕作输入、输出和水蚀输出土壤的 ^{137}Cs 活度(Bq/kg); $R_{t,in}$, $R_{t,out}$ 和 R_w 分别是耕作输入、输出和水蚀输出的土壤量($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)。净侵蚀速率 R ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)可表示为:

$$R = R_{t,out} - R_{t,in} + R_w \quad (5)$$

对于发生沉积的土壤而言, ^{137}Cs 总量 $A(t)$ (Bq/m^2)随时间变化可表示为:

$$\frac{dA(t)}{dt} = I(t) + R_{t,in}C_{t,in}(t) - R_{t,out}C_{t,out}(t) + R'_wC_{w,in}(t) - \lambda A(t) \quad (6)$$

式中, $C_{w,in}$ (Bq/kg)沉积泥沙中 ^{137}Cs 含量。净侵蚀速率 R 可表示为:

$$R = R_{t,out} - R_{t,in} - R'_w \quad (7)$$

$$R_{t,out}, i = \phi \sin \beta_i / L_i \quad (8)$$

$$R_{t,in}, j = \phi \sin \beta_j / L_j \quad (9)$$

式中, ϕ 是与耕作活动有关的常数, 由实验测得; β_i 和 β_j 分别为第 i 和第 j 个斜坡段角度; L_i 为第 i 个斜坡段坡长(m); R , $R_{t,out}, i$, $R_{t,in}, j$ 和 R'_w 分别为土壤的净侵蚀损失率、从第 i 个斜坡段输出到下一个(即第 $i+1$ 个)斜坡段的土壤量、从第 $i-1$ 个斜坡段输入第 i 个斜坡段的土壤量和土壤水力侵蚀速率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$); H 为 ^{137}Cs 沉降在整个土壤剖面的初始分布深度范围内的土壤的重量(kg/m^2)。

对于确定研究点, 测定出 β_i , β_j , L_i 和 p , 估算参数 H , d 和 γ , 输入背景值及采样时间后, 利用英国 Exeter 大学 Walling 教授提供的软件计算出耕作再分布速率、水蚀速率和净土壤再分布速率。

2 结果与讨论

2.1 ^{137}Cs 背景值

^{137}Cs 背景值是指特定地区保存下来的 ^{137}Cs 沉降总量, 即未受扰动、非积非蚀条件下的 ^{137}Cs 沉积总量。准确估计热核爆炸源 ^{137}Cs 的背景值是利用 ^{137}Cs 散落值测定土壤侵蚀和沉积速率的关键。根据有关土壤侵蚀的野外监测或模拟结果, 坡顶部土壤侵蚀轻微, 土壤 ^{137}Cs 损失较少, 可以将坡顶部作为未受侵蚀的标准剖面^[9]。3 个断面的坡顶部 ^{137}Cs 的面积浓度分别为 2147.1 Bq/m^2 , 1770.6 Bq/m^2 和 1398.9 Bq/m^2 。坡顶部 3 个点 ^{137}Cs 浓度差异很大, 这是由于断面 1 和断面 2 坡顶侵蚀显著高于断面 3, 耕层土壤有机碳含量可体现出这一趋势(断面 1, 2, 3 的土壤有机碳含量依次为 1.3%, 1.48%, 1.52%^[10]), 而研究资料表明黑土未开垦前的有机碳含量在 1.73% 左右^[11]。由于东北黑土区是我国重要的粮食生产基地, 200 多年前就有开垦利用, 至今未开垦的荒地极为少见。为此在采样区附近 5km 范围内选择平坦的坡顶、老坟地和防风林地($>25\text{a}$)作为研究区的参照样地($N=8$), 其 ^{137}Cs 活度介于 1728.68~2463.64 Bq/m^2 之间, 考虑到研究区 ^{137}Cs 本底值应该高于 2147.1 Bq/m^2 , 取剩余 5 个点的 ^{137}Cs 活度平均值 2376.81 Bq/m^2 为研究区 ^{137}Cs 本底值(表 1)。以上估计是通过野外寻找未扰动样地测定其 ^{137}Cs 含量来获得。但是, 对于一个很难找到适宜参照点的区域, 一个近似的本底值估计是非常有用的。为了验证热核爆炸源 ^{137}Cs 本底值模型的正确性, 根据全国部分水土流失区的研究结果, 将模型预测值和实测值进行对比。由表 2 可知, 太湖流域、雅鲁藏布江中游地区以及青藏高原南部地区模型的模拟值和实测值较为接近, 而青海共和盆地、陕北黄土高原、青藏高原中北部地区的模拟值和预测值有较大差距, 可能的原因是这 3 个区域靠近中国西北核试验基地, 受 ^{137}Cs 干沉降影响强烈。离核试验基地越远, 模型预测的结果越接近实测值。另外, 由于 ^{137}Cs 本底模型未考虑前苏联切尔诺贝利核泄漏事故, 其计算值可能低于实际值, 这在表 2 中也

有所体现。根据研究区多年平均降水量资料,利用热核爆炸源 ^{137}Cs 本底值模型预测的研究区 ^{137}Cs 本底值为 $2318.4\text{Bq}/\text{m}^2$,预测值与实测值比较接近。虽然太湖流域降水量大于东北黑土区,但黑土区的模拟值和实测值均大于太湖流域($2148\text{Bq}/\text{m}^2$ 和 $2200\text{Bq}/\text{m}^2$)。在北纬 50° 以内, ^{137}Cs 沉降量随纬度的增加而增加, ^{137}Cs 沉降量虽然和降雨有关,但是两者的相关性不是常数,而是随时间和空间的变化而变化。黑土区远离西北核试验基地,模型预测的结果有一定参考意义,因此将研究区 ^{137}Cs 本底值定为 $2376.81\text{Bq}/\text{m}^2$ 是比较合理的。

表 1 研究区 ^{137}Cs 背景值Table 1 The ^{137}Cs reference inventory of our study area

土壤深度(cm) Soil depth	^{137}Cs 面积活度 ^{137}Cs area activities (Bq/m^2)							
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
0~5	532.28	424.8	396	442.08	478.92	381.42	545.03	380.25
5~10	499.35	501.12	433.44	507.68	459.81	430.56	615.23	422.18
10~15	456.8	473.76	433.44	496.8	460.98	378.3	519.68	391.95
15~20	407.55	501.12	393.92	430.56	423.43	377.92	179.93	440.7
20~25	399.75	400.32	231.84	311.04	393.9	417.7	0	327.6
25~30	97.5	109.44	0	216	162.31	215.8	0	0
30~35	0	0	0	95.04	0	0	0	0

表 2 全国部分地区 ^{137}Cs 背景值的实测值和预测值对比^[12~18]Table 2 Comparison between surveying value and predicted one of ^{137}Cs reference inventory in some areas^[12~18]

研究区域 Study area	地理位置 Geographical position	年平均降水量(mm) Annual precipitation	取样年份 Year	实测值(Bq/m^2) Surveying value		预测值(Bq/m^2) Predicted value
				Surveying value	Predicted value	
太湖流域上游(浙江安吉县西苕溪)	N $30^\circ 23' \sim 30^\circ 52'$ E $119^\circ 14' \sim 119^\circ 53'$	1200	2002	2148 ± 120.7	2006.53	
太湖流域(江苏省宜兴市湖滏镇)	N $31^\circ 07' \sim 31^\circ 37'$ E $119^\circ 31' \sim 120^\circ 03'$	1385.8	2001	2200	1953.33	
雅鲁藏布江中游地区	N $28^\circ 20' \sim 31^\circ 20'$ E $87^\circ 00' \sim 92^\circ 35'$	300~600	1999	830.6~1114.0	566.57~1650.72	
青海共和盆地贵南牧场	N $35^\circ 44' \sim 35^\circ 45'$ E $100^\circ 58' \sim 101^\circ$	370	2000	2319	1194.41	
黄土高原安塞纸坊沟麦地沟小流域	N $36^\circ 51'$ E $109^\circ 19$	541.2	1998	2266	1473.89	
陕北延安市南燕沟流域	N $36^\circ 20' \sim 36^\circ 32'$ E $109^\circ 20' \sim 109^\circ 35'$	536.9	2001	2250	1394.36	
青藏高原南部地区	N $28^\circ 33' \sim 29^\circ 19'$ E $87^\circ 31' \sim 89^\circ 17'$	319~422.3	1998	982.11	922.75	
青藏高原中北部地区	N $34^\circ 54' \sim 36^\circ 25'$ E $92^\circ 47' \sim 94^\circ 55'$	38.8~264.8	1998	2376.04	871.66	

2.2 ^{137}Cs 面积活度分布与土壤侵蚀速率的计算

由图 2 可以看出, ^{137}Cs 空间分布主要受地形垂直分异因素控制,大致从西北向东南先减小后逐渐增大,中坡位(坡肩和坡背)含量最低,分别为 $1052.7 \pm 381.67\text{Bq}/\text{m}^2$ 和 $1347.16 \pm 299.56\text{Bq}/\text{m}^2$; 坡顶次之,平均为 $1772.2 \pm 374.1\text{Bq}/\text{m}^2$; 坡麓和坡足含量最高,分别为 $2568 \pm 583.52\text{Bq}/\text{m}^2$ 和 $3451.2 \pm 2226.21\text{Bq}/\text{m}^2$ 。另外,3 个断面坡足部位 ^{137}Cs 含量的标准差较大,主要由于微地形变化影响 ^{137}Cs 的空间分异。坡足位于集水盆地的出水口,3 个断面坡足采样点相对高程差异最大,断面 3 的坡足 ^{137}Cs 含量低于背景值,表现为侵蚀状态,而断面 1 和断面 2 高于背景值,土壤则表现为明显的沉积。

根据 MBM₃ 模型计算各地貌部位土壤再分布速率(表 3)。整个研究区土壤再分布速率介于 $-79.78 \sim 52.56\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间。坡顶侵蚀微弱,平均侵蚀速率为 $12.11\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 坡肩侵蚀最严重,平均侵蚀速率为 $33.56\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 坡背次之,平均为 $21.67\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 坡麓和坡足表现出明显的沉积,平均沉积速率为 $-4.93\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $-24.61\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。由于研究区地形坡度较小($1.1^\circ \sim 3.5^\circ$),耕作侵蚀所占比例较小。黑土区低缓的漫岗地不同于黄土高原坡度较大的丘陵地形,那里耕作侵蚀往往占有很大的比例^[19]。按照吉林黑土的土壤侵蚀分类分级标准^[11],将研究区土壤侵蚀程度划分为沉积($<0\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、轻度($0 \sim 15\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、中度($15 \sim 50\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、强度($>50\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)4 个侵蚀强度级别。由图 3 可知,全区大部分处于中度侵蚀、轻度侵蚀及无侵蚀状态,分别占全区面积的 46.39% 和 37.27%,土壤沉积面积占全区面积的 15.62%,强度侵蚀仅占全区总面积的 0.7%。

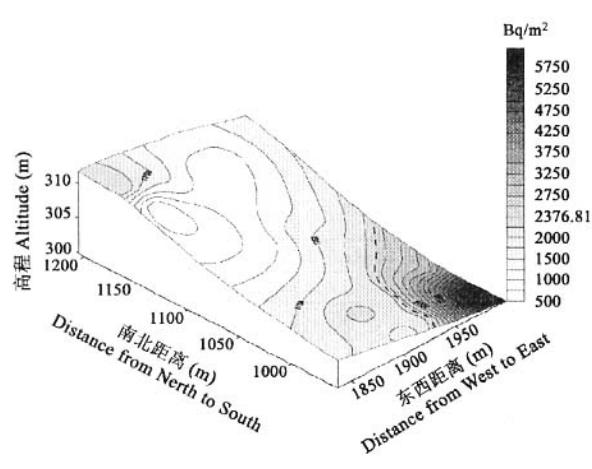
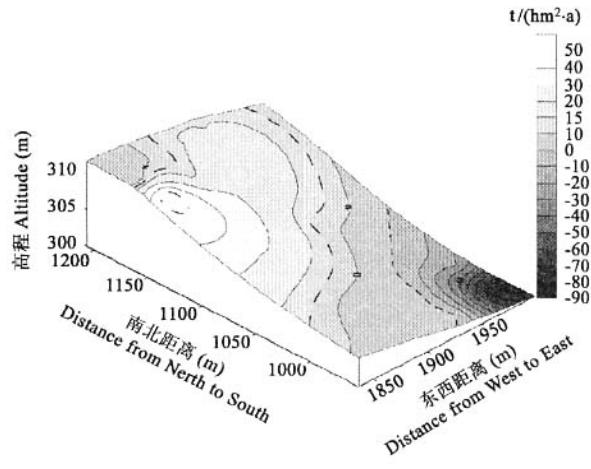
图2 研究区¹³⁷Cs含量分布Fig. 2 The distribution of ¹³⁷Cs inventory in the study area

图3 研究区土壤再分布速率分级

Fig. 3 Classification of soil redistribution rate in the study area

表3 模型输入以及土壤再分布速率的计算

Table 3 Input of data and calculation of soil redistribution rate by the model

坡位 Slope positions	¹³⁷ Cs 含量(Bq/m ²) ¹³⁷ Cs inventory	输入坡度(°) Input slope angle	输出坡度(°) Output slope angle	块段长度(m) Length	土壤再分布速率(t/(hm ² ·a)) [*] Soil redistribution rate		
					R _t	R _w	Net rate
T3-4	2147.1	-0.09	3.69	31.6	1.48	0.00	6.24
T3-3	646.2	3.69	3.07	47.5	-0.03	52.59	52.56
T3-2	1110.3	3.07	1.83	104.5	-0.02	28.68	28.66
T3-1	2361	1.83	2.35	65.9	0.02	0.22	0.24
T3-0	1936.2	2.35	0.84	29.1	-0.11	7.35	7.25
T2-4	1770.6	2.52	3.53	32.3	0.06	10.51	10.57
T2-3	1403.4	3.53	3.65	47.4	0.00	19.34	19.35
T2-2	1247.28	3.65	1.59	104.9	-0.04	24.00	23.96
T2-1	2116.2	1.59	1.87	64.1	0.01	4.07	4.08
T2-0	2410.2	1.87	2.13	27.5	0.02	-1.33	-1.31
T1-4	1398.9	2.28	3.42	33.4	0.07	19.45	19.52
T1-3	1108.5	3.42	3.23	47.9	-0.01	28.77	28.76
T1-2	1683.9	3.23	2.08	105.4	-0.02	12.40	12.38
T1-1	3226.8	2.08	0.99	62.8	-0.04	-19.08	-19.12
T1-0	6007.2	0.99	0.10	27.6	0.00	-79.78	-79.78

* R_t 为耕作侵蚀速率 R_t is tillage erosion rate; R_w 为水蚀速率 R_w is water erosion rate; Net rate 为净侵蚀速率 Net rate is net erosion rate; 正值代表侵蚀, 负值代表沉积 positive means erosion and negative means deposition

2.3 参数敏感性分析

因为¹³⁷Cs沉降通量 I(t)由热核试验的历史决定,¹³⁷Cs含量与模型预测的土壤再分布速率之间的关系只受到参数 γ、H、d 和 p 的影响。参数 γ 是指耕作活动之前耕作土壤上的¹³⁷Cs年沉降量易受侵蚀的比例,γ 值取决于本地降水分配和耕作时间。如果高强度降水事件在耕作之前不久发生,短时间内产生的地表径流迁移已富集在土壤表面的¹³⁷Cs,此时,γ 值近似等于 1.0 (γ_{\max})。如果降水的现象在¹³⁷Cs混入耕层之后立即发生,降水发生前累积在土壤表面的¹³⁷Cs混入耕层,仅在此次降水中沉降的¹³⁷Cs易被迁移,此时,γ 值等于产生地表径流的降水量与年总降水量之比。一般 γ 值介于 γ_{\min} 到 1.0 之间,如果每年多于一次耕作活动,γ 值的估计需要考虑每次耕作时的降水模式。参数 H 表示¹³⁷Cs沉降在整个土壤剖面初始分布的质量深度(kg/m²),对

于特定地段的土壤需要一个试验来测定 H 值。根据 He 等人^[20]研究,认为 H 值等于 $4.0\text{kg}/\text{m}^2$,本研究也采用此值进行计算。 d 为耕作层土壤重量(kg/m^2),根据 ^{137}Cs 是剖面分布格局,耕层厚度一般不超过 20cm ,研究区耕层土壤容重在 $0.95\sim1.35\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,根据 Walling 等^[7]介绍的方法,研究区耕作层土壤重量 d 值介于 $190\sim270\text{kg}/\text{m}^2$ 之间。 P 为颗粒校正因子,即沉积土壤与侵蚀迁移土壤的 ^{137}Cs 活度之比,由于 ^{137}Cs 易吸附在颗粒粒径较小、易迁移的土壤颗粒表面,侵蚀地段一般大于 1.0 ,而沉积地段小于 1.0 。

图 4 表明不同的参数取值对模型的预测结果有不同的敏感性。模型预测的侵蚀速率与耕层质量深度 d 、张驰深度 H 正相关,而与参数 γ 和 P 反相关。并且,参数 d 的变化比参数 H 的变化对模型预测的结果更为敏感。当 ^{137}Cs 损失率为 30% 时,参数 d 增加 42% ,侵蚀速率将增加 33.58% ;而 H 增加 1 倍,土壤侵蚀速率仅增加 8.28% 。模型对参数 γ 和 p 也比较敏感,其中参数 p 的敏感性比参数 γ 稍强。参数 γ 增加 1 倍,侵蚀速率将降低 15.86% ,当 p 增加 20% 时,侵蚀速率降低 16.63% 。综上,准确估计这些参数,尤其是参数 d 和 p ,对获取可靠的侵蚀速率是至关重要的。

References:

- [1] Yu D, Shen B, Xie J. Damages caused by soil and water erosion and their controlling approaches in the black earth area in Northeast China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, **12**(2): 25~34.
- [2] Lu J. Phaeozem degradation and sustainable agriculture in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(2): 53~56.
- [3] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Dedrad. Rehab.*, 1990, **35**: 267~276.
- [4] Collins A L, Walling D E, Sichingabula H M, et al. Using ^{137}Cs measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the Upper Kalya River basin, southern Zambia. *Geoderma*, 2001, **104**: 299~323.
- [5] Li M, Li M. Study on characteristics of soil and water loss in Hu Meng Black soil hill area under different land use. *Water and soil Conservation in China*, 2000, **10**: 23~25.
- [6] YANG X, Zhang X, Fang H. Erosion Losses of Black soil Under Different Management in Jilin. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, **34**(5): 389~392.
- [7] Walling D E, He Q. Models for converting ^{137}Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and undisturbed soils (including software for model implementation) Report to IAEA. Univ. of Exeter, Exeter, UK, 2001.
- [8] Walling D E, He Q. The global distribution of bomb-derived ^{137}Cs reference inventories. *Final Report on IAEA Technical Contract 10361/RO-R1*, University of Exeter, 2000.
- [9] Cao H, Yang H, Tang X, et al. Primary estimates on soil loss amounts in Yangtze Delta region using ^{137}Cs technique. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(1): 13~16.
- [10] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Assessment of eroded material and soil organic carbon redistribution by using fly ash as a time marker at a sloping field in black soil region. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **41**(1): 16~23.
- [11] Soil and Fertilizer Station of Jilin. *Soils of Jilin*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998. 513~525.
- [12] Jin P H, Pu L J, Wang J L, et al. Preliminary study on using ^{137}Cs tracer method to estimate soil erosion of typical area: a case study on Xitaoxi drainage area at up stream of Taihu lake basin. *Journal of Natural Resources*, 2004, **19**(1): 47~54.
- [13] Zhang Y, Yang H, Jin F, et al. Soil erosion and its ecological impacts in Yixing tea plantation. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(6): 815~821.
- [14] Wen A B, Zhang X B, Liu S Z, et al. Soil erosion rate using ^{137}Cs technique in the middle Yalungtsangpo. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **14**(4): 47~50.
- [15] Zhang C L, Zou X Y, Dong G R, et al. Characteristics of ^{137}Cs deposition in soils of dry grassland areas. *Bulletin of Chinese Sciences*, 2002, **47**(3): 221~225.
- [16] Yang M Y, Tian J L, Liu P L. Soil erosion special distribution patterns of different slopes by using ^{137}Cs tracer. *Acta Agricultuae*

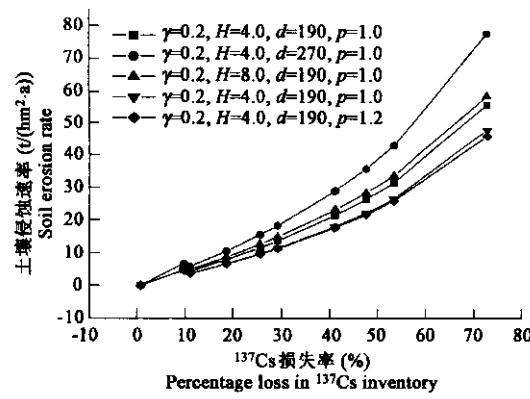


图 4 不同参数取值下模型计算土壤侵蚀速率与 ^{137}Cs 损失量之间的关系

Fig. 4 Relations between percentage loss of ^{137}Cs and predicted erosion rate by MBM₃ for different values of the various parameters

Nucleatae Sinica, 1999, **13**(6): 368~372.

- [17] Wang X Y, Li L Q, Yang M Y, et al. Spatial distribution of soil erosion on different utilization soils in Yangou watershed by using ^{137}Cs tracer. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(2): 74~76, 113.
- [18] Yang P, Dong G R, Zhang X B, et al. Preliminary measurements of wind erosion on Qinghai and Tibetan altiplano by ^{137}Cs technique. *Bulletin of Chinese Sciences*, 2000, **45**(2): 199~204.
- [19] Wang Z L, Shao M A, Lei T W. Spatial patterns of tillage erosion and its contribution to total erosion in loess region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1328~1335.
- [20] He Q, Walling D E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Appl. Radiat. Isotopes.*, 1997, **48**: 677~690.

参考文献:

- [1] 于丹, 沈波, 谢军. 东北黑土区水土流失危害及其防治途径. *水土保持通报*, 1992, **12**(2): 25~34.
- [2] 陆继龙. 我国黑土的退化问题及可持续农业. *水土保持学报*, 2001, **15**(2): 53~56.
- [5] 李明贵, 李明品. 呼盟黑丘陵区不同土地利用水土流失特征研究. *中国水土保持*, 2000, **10**: 23~25.
- [6] 杨学明, 张晓平, 方华军. 不同管理方式下农田黑土流失量. *土壤通报*, 2003, **34**(5): 389~392.
- [9] 曹慧, 杨浩, 唐翔宇, 等. ^{137}Cs 技术对长江三角洲丘陵区小流域土壤侵蚀的初步估算. *水土保持学报*, 2001, **15**(1): 13~16.
- [10] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 利用燃煤飞灰作为时间标记物评价坡耕地黑土侵蚀物质和有机碳的再分配. *土壤学报*, 2005, **41**(1): 16~23.
- [11] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998. 513~525.
- [12] 金平华, 濮励杰, 王金磊, 等. ^{137}Cs 法用于典型流域土壤侵蚀的初步研究——以太湖流域上游西苕溪流域为例. *自然资源学报*, 2004, **19**(1): 47~54.
- [13] 张燕, 杨浩, 金峰, 等. 宜兴茶园土壤侵蚀及生态影响. *土壤学报*, 2003, **40**(6): 815~821.
- [14] 文安邦, 张信宝, 刘淑珍, 等. 雅鲁藏布江中游地区土壤蚀的 ^{137}Cs 示踪法研究. *水土保持学报*, 2000, **14**(4): 47~50.
- [15] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 干草原地区土壤 ^{137}Cs 沉积特征. *科学通报*, 2002, **47**(3): 221~225.
- [16] 杨明义, 田均良, 刘普灵. ^{137}Cs 测定法研究不同坡面土壤侵蚀空间的分布特征. *核农学报*, 1999, **13**(6): 368~372.
- [17] 王晓燕, 李立青, 杨明义, 等. 小流域不同土地利用方式土壤侵蚀分异的 ^{137}Cs 示踪研究. *水土保持学报*, 2003, **17**(2): 74~76, 113.
- [18] 严平, 董光荣, 张信宝, 等. ^{137}Cs 法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果. *科学通报*, 2000, **45**(2): 199~204.
- [19] 王占礼, 邵明安, 雷廷武. 黄土区耕作侵蚀及其对总土壤侵蚀贡献的空间格局. *生态学报*, 2003, **23**(7): 1328~1335.