

^{137}Cs 示踪研究小流域土壤侵蚀与沉积空间分布特征*

杨明义 田均良 刘普灵 韦红波 李雅琦

中国科学院、水利部水土保持研究所,西北农林科技大学,杨凌 712100

摘要 通过在 0.17 km^2 面积的小流域 198 个点、525 个样品表层土壤中 ^{137}Cs 含量的分析、研究,结果表明:不同地貌部位 ^{137}Cs 含量有明显分异,为 ^{137}Cs 法定量研究土壤侵蚀与沉积提供了科学依据; ^{137}Cs 含量升高的部位多出现在沟缘线附近和沟口附近;小流域土壤侵蚀强度从梁峁顶向沟坡逐渐增大,这是黄土高原广大水土流失区自然状态的或初步治理的小流域侵蚀强度空间变化的基本特征。

关键词 ^{137}Cs 土壤侵蚀 小流域 空间分布特征

黄土高原千沟万壑,每个小流域都是独立的产水产沙单元,以小流域为单元进行土壤侵蚀空间变化的定量研究,对探索土壤侵蚀规律和评价流域治理效益有重要意义,并可为流域治理措施的合理配置提供科学依据。传统研究方法在研究小流域不同地貌部位土壤侵蚀和沉积空间分布特征时难以提供完善的科学信息,径流小区虽被广泛应用,但其研究结果适用于更大空间尺度的研究单元还有待完善。

自从 60 年代初 Menzel^[1]研究了关于土壤侵蚀和放射性核素沉降运移的关系以来,核分析技术在土壤侵蚀研究中的应用蓬勃发展起来。核分析技术以其简单、快速,量化程度高,不需要特殊野外设施,适合各种地貌类型,特别是在较大时空尺度土壤侵蚀的空间分布规律的研究中受到高度的重视。随着科技的发展,在土壤侵蚀研究中可应用的土壤核素也逐渐多起来,应用最广泛技术较完善的是 ^{137}Cs 示踪技术。 ^{137}Cs 是核裂变的一种产物,它随降水沉降到地面,和土壤颗粒紧密结合,难以被水淋溶,植物吸收也很少,主要随土壤颗粒的移动发生再分布。通过测定 ^{137}Cs 在地表水平断面和垂直剖面上的空间分布,可测定流域不同部位土壤侵蚀和沉积速率。近年来 ^{137}Cs 示踪技术多用来研究农耕地坡面的侵蚀速率以及侵蚀分布空间分布特征^[2~4],而对大范围的研究小流域土壤侵蚀与沉积空间分布特征的工作尚不多见。

1 小流域概况

为减少降水量的差异对 ^{137}Cs 输入量的影响,所选小流域的面积要小,但要有代表性,并尽可能包含多种典型的地貌类型和土地利用方式,本工作通过野外广泛考察和室内预分析,选择

2000-05-10 收稿,2000-05-26 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号:49571048)及中国科学院资源环境局“九五”重点项目(批准号:KZ952-J1-211)资助

安塞纸坊沟流域的一个小支沟为麦地沟为采样区。麦地沟位于纸坊沟流域的上游,属典型的丘陵沟壑区,面积约 0.17 km^2 ,以沟缘线为界可分为沟谷地和沟间地两大地貌单元,坡陡沟深,海拔高程 $1190 \sim 1305 \text{ m}$;沟间地已被全部开垦成农地,主要种植豆类、谷子等农作物。土壤为黄绵土,质地疏松。沟谷地因土壤侵蚀出现黄土裸露,沟口附近沟坡和梁坡上有部分红粘土出现;沟缘线以下的沟西坡长有刺槐林,种植历史约有 $15 \sim 16 \text{ a}$,沟东坡则几乎为裸地,有柠条等零星生长。主沟沟头坡度变化较大,跌水坑较多,有的深达 8 m ;沟口附近有部分淤积,有的地方有基岩显露。

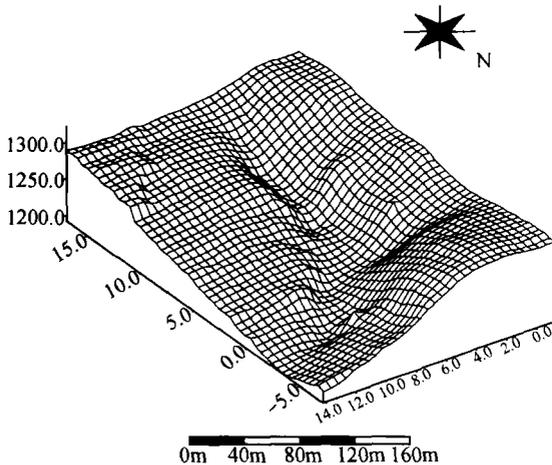


图 1 小流域地形三维图

2 采样点布设及样品分析

样点布设覆盖了小流域所有的地貌单元,在能满足需要的情况下对样点个数进行控制。在典型的微地貌变化较大的单元坡面上采用直线布设,以线控制面;在坡面坡度变化不大,易于控制的情况下则采用网格点布设。样点采集是用土钻垂直打入地面,分主剖面点、一般点和补充点 3 种方式采集。主剖面点的采集是每 5 cm 间隔取一个样,主要研究 ^{137}Cs 剖面分布变化;一般点是每 10 cm 取一个样;补充点不分层,直接取 30 cm 剖面样混合。根据实际情况,小流域地形如图 1 所示。不同地貌单元采样点

数见表 1。

表 1 不同地貌部位采样点分布图

剖面类型	沟间地				沟谷地	
	崩顶	崩坡	梁顶	梁坡	沟坡	沟底
主剖面点	5	9	5	6	4	2
一般点	4	15	5	7	36	15
补充点	2	41	3	5	26	9
合计	11	65	13	17	66	26
总计	106				92	

为了平滑相邻土壤剖面间 ^{137}Cs 分异现象,减小取样误差,每一样品在确定的样点周围,在 1 m 边长等边三角形顶点取 3 个点,均匀混合这 3 个点相同层次的样即代表三角形中心样点该层的样。样品经风干、磨细,过 40 目筛,装入特别的干净塑料盒中待测。每一样品量控制在 500 g 左右。样品测定利用美国 MCA 软件,用 ORTEC 公司生产的 8192 道低本底 γ 能谱仪进行测定,在 661.6 keV 处测定 ^{137}Cs 全峰面积,测量时间为 28800 s , γ 能谱仪的绝对探测效率为 0.0078 。

3 土壤侵蚀数学模型

3.1 农耕地侵蚀量 ^{137}Cs 计算模型

在农耕地中,由于耕层土壤不断被混合、搅动, ^{137}Cs 在犁耕层中呈均匀分布。利用 ^{137}Cs 法

计算农耕地侵蚀量的公式很多,周维芝¹⁾在前人的基础上考虑了 ^{137}Cs 的大量尘降期和无尘降期后所提出 ^{137}Cs 法计算农耕地侵蚀量数学模型似更合理,用下述公式表示

$$X_n = \frac{X_0}{15} \cdot (1 - \lambda\%)^{n-70} \cdot \frac{(1 - \lambda\%) - (1 - \lambda\%)^{16}}{1 - (1 - \lambda\%)}, \quad (1)$$

式中 X_n 为第 n 年测得的土壤 ^{137}Cs 含量 (Bq/m^2), X_0 为 ^{137}Cs 的输入本底值 (Bq/m^2), $\lambda\%$ 为某一点年均 ^{137}Cs 流失百分比.

$$M = 10000 \cdot H \cdot D \cdot \lambda\%, \quad (2)$$

式中 M 为侵蚀模数 ($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$), H 为犁耕层的深度 (cm), D 为土壤容重 ($1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$), $\lambda\% = h/H$, h 是耕层流失厚度 (cm).

3.2 未扰动土壤侵蚀量计算模型

在未扰动土壤中由于 ^{137}Cs 聚集在表层,且在土壤剖面中分布随深度增加呈指数降低^[3,5,6],农耕地 ^{137}Cs 法估算未扰动土壤侵蚀量的公式已不适合,Yang^[7]将 ^{137}Cs 在剖面中的分布函数引入模型,其公式有

$$Y = 100 - [R_1(1 - \lambda)^{29} + R_2(1 - \lambda)^{28} + \dots + R_{29}(1 - \lambda)] \cdot (1 - \lambda)^{M-1982},$$

$$Rt = 100 \cdot r_t \quad (M \geq 1982), \quad (3)$$

式中 Y 为某一点 ^{137}Cs 总的流失百分数, r_t 为第 t 年 ^{137}Cs 尘降量占总输入量的分数 ($\%$), λ 为某一点年平均 ^{137}Cs 流失百分比, M 为采样时的年份.

$$\int_0^h a e^{-bH} dH = \frac{a}{b} (1 - e^{-hb}), \quad h = -\frac{1}{b} \ln\left(1 - \frac{b\lambda C_R}{aD}\right),$$

$$E_R = -\frac{10000D}{b} \ln\left(1 - \frac{b\lambda C_R}{aD}\right), \quad (4)$$

式中 h 为土壤流失厚度 (cm), C_R 为 ^{137}Cs 本底值 (Bq/m^2), D 为土壤容重 ($1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$), E_R 为侵蚀模数 ($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$), H 为采样深度 (cm).

对麦地沟流域未扰动土壤剖面 ^{137}Cs 含量与土壤深度的关系进行统计分析,得 a, b 值分别为 35.2 和 -0.23.

3.3 沉积土壤侵蚀量计算模型

^{137}Cs 含量大于本底值的点位,表明这些点位沉积显著,其净侵蚀量即为该点的沉积量. Lowance^[8]在用 ^{137}Cs 法估算农林系统沉积时提出以下公式

$$\text{总沉积量}(t) = (C - Z) \cdot A / W_d,$$

式中 C 为沉积区 ^{137}Cs 含量 (Bq/m^2), Z 为 ^{137}Cs 本底值 (Bq/m^2), A 为沉积区面积, W_d 为沉积区平均 ^{137}Cs 重量浓度 (Bq/kg).

他给出的每年的沉积量 S 由以下公式表示

$$S = \frac{C - Z}{(N - 1954) \times W_d} \times 10^3 (\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}), \quad (5)$$

式中 N 为采样时年份.

1) 周维芝. ^{137}Cs 法研究不同地貌类型土壤侵蚀强度分异. 中国科学院、水利部水土保持研究所硕士研究生毕业论文, 1996

4 结果分析与讨论

由表 2 可以看出不同地貌部位由于坡度、坡长、水保措施等因素的影响, ^{137}Cs 含量在不同地貌部位发生了明显的分异. 不同地貌部位 ^{137}Cs 含量为 $0 \sim 3849.2 \text{ Bq/m}^2$, 变化很大; 即使同一地貌类型中, ^{137}Cs 含量也有明显分异. 沟底的 ^{137}Cs 分异系数达到 1.05, 沟坡的达到 1.03, 说明沟底、沟坡侵蚀和沉积现象变化大; 梁顶和崩顶的 ^{137}Cs 分异较小, 但分异系数也达到了 0.44; 从整个流域 ^{137}Cs 分异看, 其分异系数达到了 0.85, 说明 ^{137}Cs 随土壤颗粒移动再分布现象明显, 这一结果为 ^{137}Cs 法研究土壤侵蚀与沉积提供了科学依据.

表 2 不同地貌部位 ^{137}Cs 含量统计表

地貌部位	沟底	沟坡	梁顶	梁崩坡	崩顶	全流域
样本数	21	59	14	94	10	198
最小值 (Bq/m^2)	67.1	0	327.6	0	708.7	0
最大值 (Bq/m^2)	3849.2	3428.3	1410.2	3461.2	2706.7	3849.2
全距 (Bq/m^2)	3782.1	3428.3	1082.6	3461.2	1998	3849.2
标准差	144.9	92.8	91.0	62.3	197.2	52.2
标准偏差	739	753.9	340.6	619.7	623.7	743
变异系数	1.05	1.03	0.44	0.79	0.44	0.85
中位数 (Bq/m^2)	590	470.7	721.4	698.3	1144	688.3

4.1 小流域 ^{137}Cs 空间分布特征

将小流域各点的 ^{137}Cs 含量制成等值线图与小流域地形图进行比较(图 2), 可以看出: ^{137}Cs 空间分布主要受小流域梁崩沟壑地形垂直分异因素控制, 总体上从沟间地到沟谷地, ^{137}Cs 含量逐渐减少; 在主沟底, 沟头 ^{137}Cs 含量比沟中游高, 说明中游侵蚀剧烈. 实地观察时也可清楚发现, 沟中游下切侵蚀作用强烈, 有明显的下切沟; 而沟口附近 ^{137}Cs 含量升高表明有沉积现象. 从图中也可以看出, 小流域不少地貌部位 ^{137}Cs 含量有奇异点出现, 说明微地貌的变化影响着 ^{137}Cs 分异. 另外, ^{137}Cs 含量明显升高的部位多出现在沟缘线附近, 说明沟缘线处崩坡地是水流挟沙弱或部分泥沙沉降的部位.

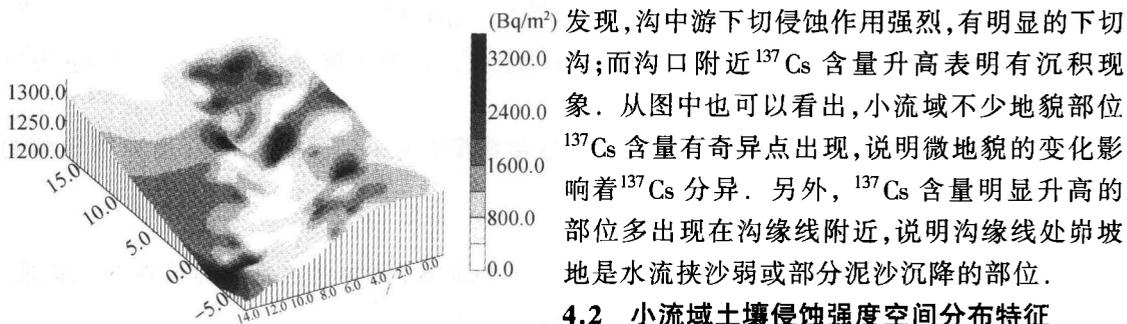


图 2 小流域 ^{137}Cs 含量分布图

4.2 小流域土壤侵蚀强度空间分布特征

根据麦地沟小流域各采样点侵蚀量计算结果, 作出土壤侵蚀强度分级等值线地形图, 由图 3 可以看出, 土壤侵蚀强度的空间变化主要受梁崩沟壑地形垂直分异因素的控制, 从分水岭到主沟底, 侵蚀强度分布越来越大, 其中 < 3 级 ($2500 \sim 5000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$) 侵蚀强度的分布主要在崩顶、崩坡上部和梁顶上; 而 4 级 ($5000 \sim 7500 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$) 则主要分布在崩坡的中部、下部; 5 级 ($7500 \sim 10000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$) 主要分布在沟坡上部; 6 级 ($10000 \sim 15000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$) 主要分布在沟坡中部; 7 级 ($15000 \sim 20000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$) 和 8 级 ($> 20000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$) 则主要分布在沟坡下部.

从沟底侵蚀强度分布看, 主沟上游侵蚀强度主要是 5 级和 6 级, 而中游侵蚀强度大, 主要是 6 级和 7 级, 沟口附近侵蚀强度变小, 主要是 < 3 级. 说明上游侵蚀强烈, 随着汇流的增大,

中游侵蚀剧烈,到沟口附近,水流挟沙力降低,出现沉积。

总的看来,小流域土壤侵蚀强度是从梁峁顶向沟坡逐渐增大的。这是黄土高原广大水土流失区自然状态的或初步治理的小流域侵蚀强度空间变化的基本特征。

5 结论

(1) ^{137}Cs 在小流域不同地貌部位含量明显分异,通过对不同地貌 ^{137}Cs 含量分异研究表明 ^{137}Cs 分异可如实反映侵蚀强度分布,为侵蚀强度的定量研究提供了科学依据。

(2) ^{137}Cs 含量在不同地貌单元分布不同,不少地貌部位 ^{137}Cs 含量有奇异点出现,含量升高的部位多出现在沟缘线附近和沟口附近。

(3) 小流域侵蚀强度空间分布主要受小流域梁峁沟壑地形垂直分异因素所控制,是黄土高原广大水土流失区自然状态的或初步治理的小流域侵蚀强度空间变化的基本特征。

(4) ^{137}Cs 技术测定的是净土壤侵蚀量,可提供更为真实的侵蚀、产沙及沉积信息,能用于较详细描述侵蚀与沉积空间分布,虽计算侵蚀量与沉积量有待完善,但可较准确表达相对侵蚀量的变化与分布趋势,和其他方法相比,这是 ^{137}Cs 技术鲜明的特点。

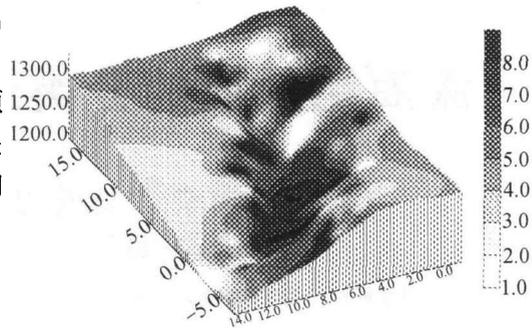


图 3 小流域侵蚀强度分级分布图

参 考 文 献

- 1 Menzel R G. Transport of ^{90}Sr in runoff. *Science*, 1960, 131: 499
- 2 Walling D E, et al. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degrad Rehab*, 1990, 2: 161
- 3 Walling D E, et al. Improved models for estimating soil erosion rates from caesium-137 measurements. *J Environ Qual*, 1999, 28: 611
- 4 Zhang X, et al. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shaanxi Province, China: An investigation using ^{137}Cs and rill measurements. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 171
- 5 Beck H L. Environmental gamma radiation from deposited fission products 1960—1964. *Health Phys*, 1966, 12: 313
- 6 Ritchie J C, et al. The distribution of ^{137}Cs in the upper 10 cm of soil under different cover types in northern Mississippi. *Health Phys*, 1972, 22: 197
- 7 Yang H, et al. Quantitative model for estimating soil erosion rates using ^{137}Cs . *Pedosphere*, 1998, 8: 211
- 8 Lowance R, et al. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using caesium-137 activity. *J Soil Water Conservation*, 1988, 2: 195