

利用 ^{137}Cs 示踪技术研究滇池流域土壤侵蚀^{*}

张明礼¹ 杨浩^{1†} 高明¹ 杨九东¹ 刘晓海²

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046)

(2 云南省环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要 核素示踪技术研究作为一种新的土壤侵蚀研究方法, 已经在土壤侵蚀研究中获得了极大应用, 并在土壤侵蚀的沉积、侵蚀、运移研究上取得许多成果。采用放射性核素作为土壤示踪剂, 可以很好地进行流域尺度的范围研究, 且可靠性比较高, 省时省力。云贵高原在处于我国的西南地区, 是我国南方水土流失严重的地区之一。本文应用 ^{137}Cs 示踪技术, 研究了云南省滇池流域土壤侵蚀的强度分异规律: 坡地不同地貌部位的土壤侵蚀速率是坡中部 > 坡下部 > 坡上部; 不同土地利用类型和方式下的土壤平均侵蚀速率是耕地 > 非耕地。研究表明, 整个流域平均土壤侵蚀速率为 $1.280 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 属于轻度侵蚀, 地貌部位、坡度以及土地利用方式是影响土壤侵蚀的主要因素。

关键词 ^{137}Cs ; 土壤侵蚀; 滇池流域

中图分类号 S157.1; TL99 **文献标识码** A

云贵高原处于我国西南地区, 是我国南方水土流失严重的地区之一。云南境内的滇东高原是云贵高原的一部分, 其上的滇池流域地貌单元由滇池水域、环滇池淤积平原、台地丘陵及中低山构成。由于土壤瘠薄, 抗蚀抗冲能力弱, 使得土壤易受水力冲刷。土壤侵蚀给云南的“母亲湖”滇池生态环境带来极大负面影响。不仅使滇池周围土壤退化, 滇池水质变差, 影响人们的生产和生活; 而且滇池流域的生态系统遭到很大破坏。因此, 有必要了解近些年来滇池流域的土壤侵蚀状况。研究的目的在于一方面探讨影响土壤侵蚀的主要因子; 另一方面可较准确估算滇池流域土壤侵蚀的速率, 为滇池生态环境的治理以及水土保持生态环境建设提供依据。虽然有关滇池流域土壤侵蚀的研究较多^[1, 2], 但大多的土壤侵蚀研究以传统方法研究为主, 缺乏较长时间的资料积累, 仅通过短时间的测定, 无法准确估算中长期 (约 50 a) 的平均土壤侵蚀速率。

目前, 有关土壤侵蚀的测定方法主要可以分为三类: 一是野外侵蚀小区测定法: 该方法费用昂贵, 劳动强度大, 难以应用于土壤侵蚀的大范围空间变化及土壤迁移的空间分配研究。二是遥感与 GIS 结

合的室内外判读法: 常采用某地区或流域的航片进行调查, 对于航片中的小河和溪谷则进行现场调查, 以计算土壤侵蚀量, 但误差较大。三是示踪法: 该法克服了侵蚀小区测定法和遥感与 GIS 判读法的不足之处, 运用该法可以对土壤侵蚀的空间变化、沉积土壤不同层次的形成年代、土壤迁移的空间分配进行研究, 并估算中长期 (约 50 a) 的土壤侵蚀量。其中, 以 ^{137}Cs 为示踪剂的研究和应用最为广泛和深入^[3~8]。

^{137}Cs 示踪技术由于能较为准确地估算出土壤中长期侵蚀速率而被广泛用于世界许多的国家和地区^[9~13]。 ^{137}Cs 是一种人工放射性核素, 大气核试验和核泄漏事故使得相当数量的 ^{137}Cs 被释放到大气中, 经干湿沉降于地表后被土壤颗粒牢固吸附, 此后 ^{137}Cs 只随土壤颗粒发生迁移, 因而通过分析 ^{137}Cs 在土壤剖面中的分异, 即可判别采样点是受侵蚀还是发生沉积。Owens^[14] 获得了北半球从 1954 ~ 1990 年 ^{137}Cs 的年沉降分量。 ^{137}Cs 示踪法具有花费少、测量简单的特点, 在缺乏中长期土壤侵蚀观测资料的地区能够较好地估算自核试验以来平均土壤侵蚀状况。

本研究用 ^{137}Cs 示踪法估算了滇池流域近 50 年

* 国家自然科学基金项目 (40473052, 40873071) 与高等学校博士学科点专项科研基金联合资助

† 通讯作者: 杨浩, 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: issasnj@163.com

作者简介: 张明礼 (1976 ~), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与生态效益。E-mail: geozhm1@163.com

收稿日期: 2007 - 04 - 18; 收到修改稿日期: 2007 - 06 - 12

来的土壤年平均净流失量以及土壤侵蚀与地表植被状况、地形坡度与地貌部位的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于昆明市呈贡县洛羊镇果林水库岸边水海子片区,属低纬度高原平坝地区,地势平缓,海拔 1 800~2 000 m 左右,以滇池为中心汇流而成的滇池流域属亚热带湿润季风气候,年平均气温 14.7℃,年日照数 2 200 h,无霜期 285 d,年降雨量 1 006 mm,降雨集中,雨季降雨量占全年雨量 80%以上,辖区内多为丘陵、河谷、平缓山地。成土母岩为玄武岩、石灰岩、砂岩和页岩,形成的土壤以红壤、紫色土和水稻土为主。自然植被由滇青冈、高山栲等常绿阔叶林、云南松、滇油松等针叶林及灌丛草地、旱田植被、水田植被、水生植被组成。

1.2 样品采集与分析

2006年9月在果林水库东岸边采样。样点的布置以线代面,从山坡高处向低处采样;同时在一定范围的海拔高度和坡度内,又沿平行于山脚线的方向水平采样(见图1)。采样充分考虑到土地利用方式以及山坡的坡度,依据一定的间隔采集土样,部分土壤采集全样;剖面采样的分层间隔为 6 cm,采样深至 36 cm 到 66 cm 不等的距离。本次采集土壤全样 39 个,剖面分层土样 4 个,每层间隔为 6 cm。

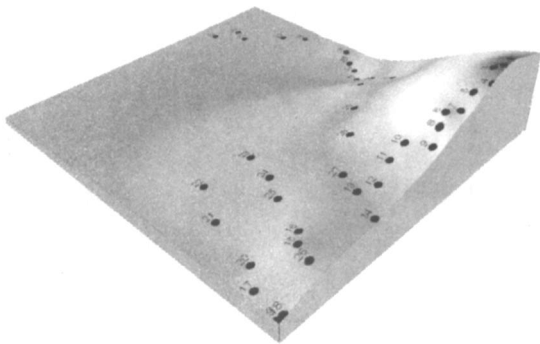


图 1 采样位置模拟地形

Fig. 1 Simulated landform map of the sampling sites

土壤样品经风干研磨后过 20 目筛,放在 105℃ 的烘箱中烘至恒重,用 0.01 g 精度的天平称取约 300 g 土壤于塑料容器中,采用美国 ORTEC 公司生

产的配有多通道分析仪的高纯锗谱仪进行测试。该谱仪主要指标:在 ^{60}Co 1.33 MeV 处,谱仪的测量系统能量分辨率 2.25 keV,峰康比大于 60,相对探测效率为 66%。 ^{137}Cs 的含量根据 662 keV 射线的全峰面积求得。

1.3 背景值的确定

确定区域 ^{137}Cs 背景值是应用 ^{137}Cs 示踪法估算土壤侵蚀的关键。背景值的确定有两种方法:一是在以未扰动的、且基本未发生侵蚀与沉积的地点采样,直接测量 ^{137}Cs 含量作为背景值;二是在同一流域内,若气象条件均一, ^{137}Cs 的空间分布也是均匀的,因此可直接引用记录的背景值。本研究区域处在云南昆明附近,本课题组已测得该区域的背景值为 906 Bq m^{-2} [15],齐永青等 [16] 的实测结果为 $1 269 \text{ Bq m}^{-2}$,而根据 Walling 等 [17] 的全球模拟,该地区的 ^{137}Cs 背景值为 860 Bq m^{-2} 。故本研究将 ^{137}Cs 含量 906 Bq m^{-2} 作为研究区域 ^{137}Cs 背景值,认为比较可靠。

1.4 土壤侵蚀的计算方法

所采集的土壤样品中,主要分为两大类:耕地和非耕地,且均为红壤。由于人类活动的干扰作用,耕地中的 ^{137}Cs 呈均匀分布状态,在非耕地中呈指数分布状态,计算公式也相应的不同。

1.4.1 耕作土壤侵蚀量的计算 由于人类的耕作活动,使得土壤耕层中 ^{137}Cs 呈均匀分布状态,分布深度为约 20 cm 左右。利用杨浩等 [6] 建立的农业耕作土壤的侵蚀速率定量模型,计算土壤的侵蚀速率。该模型假设 ^{137}Cs 在耕层中得到充分的混合而变得均匀,充分考虑 ^{137}Cs 的年沉降分量、耕层厚度,以及 ^{137}Cs 的衰变常数和采样年份的影响,根据质量平衡模型推导而成。与其他的耕作土壤模型相比,该模型考虑因素多,具有较高的准确性。计算模型为:

$$\frac{(C_R - C_E)}{C_R} = 100 - 100 \left[\left(R_1 X^N + R_2 X^{N-1} + R_3 X^{N-2} + \dots + R_N X \right) / W_N \right] \quad (1)$$

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

$$X = (1 - h/H) k \quad (3)$$

$$E_R = h \times D \times 10 000 \quad (4)$$

式中, C_R 为土壤中 ^{137}Cs 的背景值 (Bq m^{-2}), C_E 为土壤中实测值 (Bq m^{-2}), W_N 为系数, R_i 为自 1954 年以来每年的沉降量,可根据 Owens [13] 计算的表中查到, k 为 ^{137}Cs 的衰变常数 (0.977); h 为土壤年侵蚀厚度 (m), H 为犁耕层深度 (m), E_R 为土壤年侵蚀量 ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), D 为土壤容重 (kg m^{-3}), X 为侵蚀常数。

1.4.2 非耕作地土壤侵蚀计算 大多数的环境下,¹³⁷Cs在未扰动稳定土壤剖面中的深度分布是随着深度逐渐减小,Zhang等^[18]基于许多研究者所报告的非耕作土壤剖面¹³⁷Cs的指数分布形式,给出¹³⁷Cs剖面分布函数表达式为:

$$A(x) = A_{ref}(1 - e^{-x}) \quad (5)$$

式中, x 为土壤深度(cm), $A(x)$ 在深度 x 以上¹³⁷Cs的总量($Bq\ m^{-2}$), A_{ref} 为¹³⁷Cs深度分布的剖面指数(cm^{-1}),本研究中其值为 $0.27\ cm^{-1}$ 。

假设¹³⁷Cs沉降主要发生在1963年,且¹³⁷Cs在土壤剖面中的深度分布不受时间的影响,侵蚀点的年侵蚀厚度 h 可以用下式计算:

$$h = -\frac{1}{(t - 1963)} \ln\left[1 - \frac{X}{100}\right] \quad (6)$$

式中, h 为土壤侵蚀速率($cm\ a^{-1}$); t 为采样时年份, X 为相对背景值减少的百分比($(A_{ref} - A) / A_{ref} \times 100$)。然后再根据式(4)求出土壤的侵蚀速率。

1.4.3 土壤沉积量的计算 本研究采用Lowance等^[19]的沉积模型来估算土壤沉积量。Lowance运用自己的公式和通用流失方程以及别的研究者在同一地区的研究结果相比较,发现模型计算有较高的准确度。模型为:

$$Cs = Q/M = C_i \times D \times h_i / \quad (7)$$

$$D \times h_i = C_i \times h_i / H$$

$$Cl = Q - C_{ref} = D \times h \times Cs \quad (8)$$

$$hr = h/t = h/(T - 1954) \quad (9)$$

式中, h 和 hr 分别为沉积总厚度和年均沉积厚度(mm), h_i 为剖面各层厚度(mm); C_s 为沉积剖面¹³⁷Cs平均质量浓度($Bq\ kg^{-1}$), C_i 为每层的¹³⁷Cs质量浓度($Bq\ kg^{-1}$); Q 为剖面中¹³⁷Cs总量($Bq\ m^{-2}$),亦即实测¹³⁷Cs总量; M 为剖面单位面积土壤总质量($kg\ m^{-2}$), C_{ref} 为当地¹³⁷Cs背景值($Bq\ m^{-2}$), T 为采样年份。由式(9)求出 hr 后,再由式(4)便可求出年均沉积速率。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面¹³⁷Cs分布状况

根据¹³⁷Cs剖面活度的变化,可以看出土壤侵蚀速率与沉积速率在不同地点差异较大。本研究选取点P1、P31、P43、P35分层采样(见图2),前3个点为非耕地采样点,后1个为耕地采样点,分别对应于图2a、图2b、图2c、图2d,它们的相对位置是:采样

点P1处在坡上部,P31点处在坡中部,P43、P35处在山坡下部(见图1)。¹³⁷Cs剖面分布的活度如图2,其中图2a与2c表示采样点土壤沉积,图2b与2d表示采样点为土壤侵蚀。图2a总含量¹³⁷Cs略高于背景值 $906\ Bq\ m^{-2}$,达到 $1\ 016\ Bq\ m^{-2}$,这可能是坡的上部总体平缓,局部微地貌凹陷导致的小范围内土壤沉积。图2b为次生灌木林地的剖面采样,剖面¹³⁷Cs分布呈指数趋势,土壤侵蚀在4个剖面中最为严重,达到 $2\ 595\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。采样点P43在果林水库岸边约500m处,是一片沼泽地,地面长有5~30cm的青草,面积约 $0.7\ km^2$,图2c为该点¹³⁷Cs的剖面分布图。所含¹³⁷Cs总量远远高于背景值,达到 $2\ 319\ Bq\ m^{-2}$ 。从图中可看出沼泽地中¹³⁷Cs分布较深;在剖面分层采样的过程中,地表以下60cm深处就有地下水溢出。该剖面是一个非耕地沉积剖面图,图中明显看到从地表向下24~30cm处出现一个¹³⁷Cs含量高带,剖面24cm深度向上¹³⁷Cs含量总体呈降低趋势,可能是表层侵蚀导致流域内林地和农耕地等表层土壤¹³⁷Cs含量减少的缘故,据此推知土壤沉积速率为 $0.46\ cm\ a^{-1}$ 。图2d是耕作土壤中¹³⁷Cs的剖面分布图,与其他3个点相比,在表层30cm之内¹³⁷Cs分布较为均匀。在耕层深度内土壤中的¹³⁷Cs呈现的均匀状态,判断是犁耕作用的搅动,使得犁耕层内土壤混合所致。从¹³⁷Cs剖面浓度来看,坡的不同地貌部位¹³⁷Cs的平均值不一样,坡中部的含量最少,其次是坡的上部,最多的是坡的下部。对照¹³⁷Cs的背景值,这说明坡中部侵蚀量最大,坡下部有部分沉积。

2.2 不同土地利用方式下的土壤侵蚀速率

2.2.1 农耕地土壤侵蚀 在采样区,部分采样点上由于桃树等果林地里套种了玉米、蔬菜等,也划归为耕地。从表1中看出,农耕地的侵蚀速率大。旱地的平均侵蚀模数为 $1\ 734\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$,水田的侵蚀模数为 $1\ 122\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ 。水稻田地块较小,处在旱耕地与水库之间,自坡上而下的地表径流流经稻田时,会带走较多土壤颗粒,使水稻田侵蚀速率偏大。同为旱地,多数种植经济作物的耕地土壤侵蚀速率大于种植粮食作物的耕地,疑为经济作物的耕作频次高,翻耕厉害,土壤更加疏松,导致土壤侵蚀模数大。坡面P37点采样位置在果树林,但果林地里又套种玉米,土壤每年翻耕数次,使侵蚀速率达到了 $8\ 164\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$;而坡底部的P41、P42采样点,虽种植有经济作物,但是由于地势相对很低,且靠近果林水库岸边,为坡前冲积带,表现为土壤沉积。

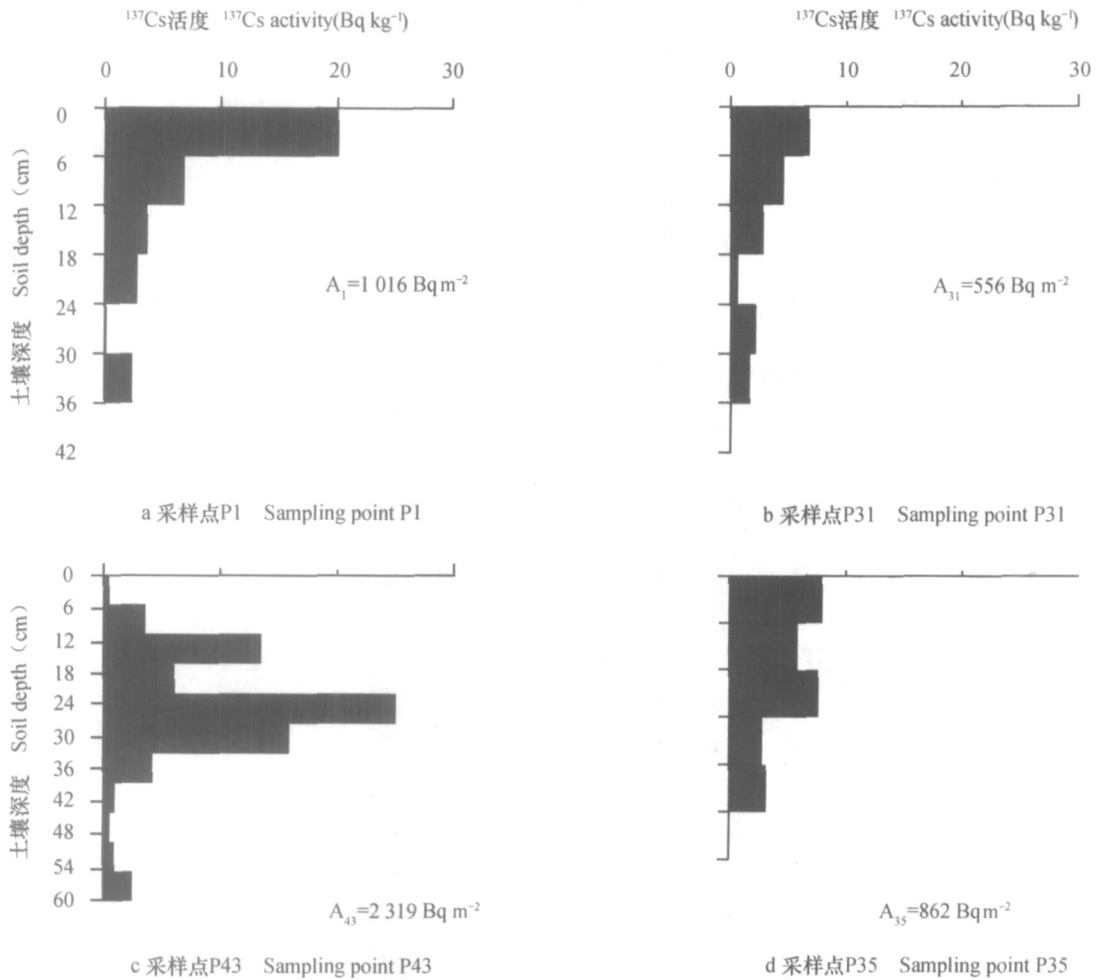


图 2 ¹³⁷Cs在土壤中的剖面分布

Fig. 2 ¹³⁷Cs distribution in the soil profiles for the eroding and depositional sites in Dianchi Valley

点 P42 沉积较为严重, 每年的平均沉积量为 $1\ 440\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ 。总体上看, 旱地的侵蚀速率大于水田, 果林与园地的土壤, 由于每年果林地的翻耕数次进行施肥, 套种玉米、蔬菜等, 其侵蚀速率明显偏大。这说明, 耕作措施与耕作方法的差异, 加上流水侵蚀的作用, 会影响到土壤侵蚀的速率差异, 李洪勋等^[20]也得到类似的研究结果。

2.2.2 非耕地土壤侵蚀速率 采样是从尖山山顶向下顺坡而采, 开始采集的样品主要为非耕地。从表 2 中我们看出, 土壤侵蚀的速率悬殊较大。其中 P27 点的蒿草丛达到 $2\ 746\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 侵蚀量较小的为 $17\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 采样点 P18 位于水库边的沼泽地出现土壤沉积, 土壤沉积速率 $8\ 235\ \text{km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ 。同为林地, 由于地形坡度的影响, 侵蚀速率也明显不同。图 3 表示非耕地中土壤侵蚀与坡度的关系图, 图中选择的样点大致在一条直线上, 由图上可

以看出, 土壤侵蚀的速率变化趋势总体上与坡度变化一致。再如, 灌木林地采样点 P5 的地形坡度约为 10.6° ; 采样点 P7 的地形坡度约为 6.3° (具体位置见图 1), 但采样点 P5 的土壤侵蚀速率是采样点 P7 的 12.9 倍。值得提出的是, 点 P17 采样位置为冲沟沟口的洪积层, 地面倾斜, 成份主要为不规则的棱角状岩泥、砂岩砾 (粒径 $2\sim 10\ \text{cm}$) 组成, 缺乏粒径细小的泥沙, 故可以推断该处是沟口下切到一定深度后, 由于水流的侧蚀, 沟口变宽, 沟口的加宽使得水流流速放慢, 进而较大粒径的砂砾岩等首先在沟口附近沉积。点 P29 发育稀疏的栎树, 地面为较少的灌木杂草, 表层土壤侵蚀殆尽, 只看到地面有碳酸盐岩风化红土, 可见侵蚀相当剧烈。上述两点由于长期的侵蚀, 土壤中已检测不到 ¹³⁷Cs, 该法无法准确估计其侵蚀量的大小, 根据以往的计算经验, 加上实地观测后, 认为该采样点应属于剧烈侵

表 1 滇池流域农耕地¹³⁷Cs含量及土壤侵蚀速率Table 1 The ¹³⁷Cs inventory and soil erosion rate in the cultivated land in Dianchi catchment

采样点 Sampling point	土地类型 Land type	作物种类 Type of crop	¹³⁷ Cs面积活度 ¹³⁷ Cs inventory (Bq m ⁻²)	采样点坡度 Slope gradient of sampling points(°)	土壤侵蚀速率 Soil erosion rate (t km ⁻² a ⁻¹)
P33	旱地 Dry land	粮食作物(玉米) Food crop (corn)	494	2.9	- 2 968
P35	旱地 Dry land	粮食作物(玉米) Food crop (corn)	862	2.5	- 61
P38	旱地 Dry land	粮食作物(玉米) Food crop (corn)	816	1.9	- 242
P32	旱地 Dry land	经济作物(瓜菜) Cash crop (melon and vegetable)	773	0.5	- 507
P34	旱地 Dry land	经济作物(果林) Cash crop (fruits)	500	2.8	- 2 794
P36	旱地 Dry land	经济作物(果林) Cash crop (fruits)	558	2.1	- 2 317
P37	旱地 Dry land	经济作物(果林与玉米) Cash crop (fruits and corn)	195	2.6	- 8 164
P41	旱地 Dry land	经济作物(辣椒) Cash crop (capsicum)	908	0	8
P42	旱地 Dry land	经济作物(桃树) Cash crop (peach)	1 408	0.4	1 440
P40	水田 Paddy field	粮食作物(水稻) Food crop (paddy)	670	0.3	- 1 122

注: -号代表土壤侵蚀 Note: - means soil erosion

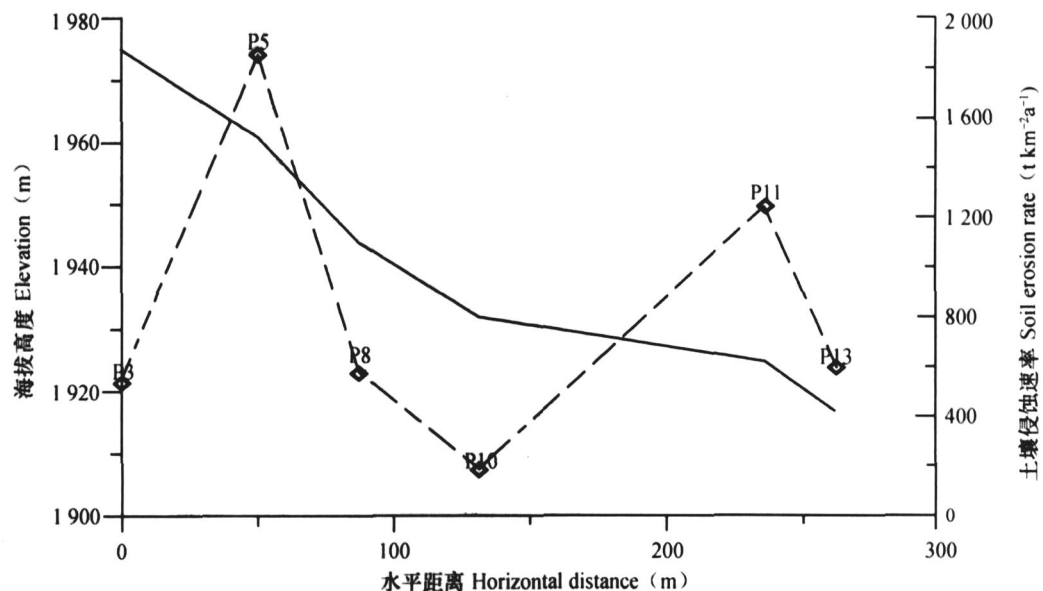


图 3 非耕作土壤侵蚀速率(---)与地形坡度(—)的关系

Fig. 3 Relationship between soil erosion rate(---) and slope of the landform(—)

表 2 滇池流域非农耕地土壤¹³⁷Cs含量及土壤侵蚀速率Table 2 The ¹³⁷Cs inventory and soil erosion rate in the uncultivated in Dianchi catchment

采样点 Sampling points	土地利用类型 Type of land use	¹³⁷ Cs面积活度 ¹³⁷ Cs inventory (Bq m ⁻²)	采样点坡度 Slope gradient of sampling point(°)	土壤侵蚀速率 Soil erosion rate (t km ⁻² a ⁻¹)
P1	次生林地 Second forestry	1 016	1.1	62
P2	次生林地 Second forestry	540	8.2	- 535
P3	次生林地 Second forestry	274	10.4	- 1 235
P4	灌木林地 Shrubbery	218	10.2	- 1 472
P5	密灌林地 Dense shrubbery	151	10.6	- 1 852
P6	密灌林地 Dense shrubbery	711	8.8	- 250
P7	密灌林地 Dense shrubbery	789	6.3	- 143
P8	密灌林地 Dense shrubbery	520	12.1	- 574
P9	密灌林地 Dense shrubbery	601	8.1	- 424
P10	密灌林地 Dense shrubbery	759	12.4	- 183
P11	乔木林地 Arbor forestland	272	10.7	- 1 242
P12	灌木林地 Shrubbery	775	8.7	- 162
P13	杂草地 Weedy land	508	6.0	- 597
P14	草地 Grass land	422	5.0	- 790
P15	松林 Pine forestland	429	4.9	- 772
P16	密松林地 Dense pine	609	3.6	- 410
P17	野芦苇地 Wild reed land	0	2.7	> - 15 000
P18	水草地 Swamp	1 769	2.9	1 970
P19	湖岸淤泥地 Lakeshore silt land	809	1.4	- 117
P20	湖岸淤泥地 Lakeshore silt land	662	1.5	- 325
P21	低灌草丛 Low shrubbery	238	1.1	- 1 382
P22	松林 Pine forestland	801	2.4	- 128
P23	蒿草丛 Womwood groves	307	4.9	- 1 119
P24	桉树林地 Eucalypt forestland	892	3.5	- 17
P25	蒿草丛 Womwood groves	645	4.6	- 352
P26	松林 Pine forestland	666	3.7	- 319
P27	蒿草丛 Womwood groves	64	4.8	- 2 746
P28	乔木林地 Arbor forestland	558	4.6	- 502
P29	林地 Forestry	0	4.9	> - 15 000
P30	疏林地 Sparse forestland	642	3.8	- 356
P31	次生灌木 Second shrubbery	556	3.2	- 506
P39	草地 Weedy land	841	0	- 80
P43	沼泽地 Swamp	2 319	0	8 235

注: -号代表土壤侵蚀 Note: - means soil erosion

蚀,侵蚀速率大于 15 000 t km⁻² a⁻¹。

若分别计算耕地与非耕地的土壤侵蚀速率,耕地的平均土壤侵蚀速率为 1 673 t km⁻² a⁻¹,非耕地土壤的平均侵蚀速率为 1 161 t km⁻² a⁻¹。从图 1和

表 4可以看出,非耕地在该坡地的不同部位上均有分布,而耕作地全部集中在地势相对平坦的山坡下部。同处在坡下部的耕地和非耕地,土壤侵蚀的平均速率分别为 1 673 t km⁻² a⁻¹和 854 t km⁻² a⁻¹,土

表 3 基于¹³⁷Cs技术所估算的土壤侵蚀等级类别Table 3 Grades of soil erosion estimated with the aid of¹³⁷Cs technique

侵蚀类型 Erosion types	微度侵蚀 Micro-degree erosion ($<1\ 000\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$)	轻度侵蚀 Slight erosion ($1\ 000\sim 2\ 500\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$)	中度以上侵蚀 Moderate erosion ($>2\ 500\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$)
侵蚀点个数 Numbers of sampling soil	24	8	11
所占侵蚀点的百分比 Percentage of erosion points (%)	55.8	18.6	25.6

表 4 不同地形部位采样点的土壤平均侵蚀速率(含剖面采样点)

Table 4 Average soil erosion rate of sampling sites at different landforms positions (including profiles)

采样点位置 Sampling site	采样点坡度 Slope gradient	样点数 Numbers of sampling	土地属性 Soil attribute	侵蚀速率 Erosion rate ($\text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$)
山坡上部 Upper slope	$5^\circ < 15^\circ$	13	非耕地 Uncultivated land	- 666
山坡中部 Middle slope	$3^\circ < 5^\circ$	12	非耕地 Uncultivated land	- 1 907
山坡下部 Lower and foot slope	3°	18	10个耕地点, 8个非耕地点 10 cultivated points and 8 uncultivated points	- 1 309 (耕地 - 1 673, 非耕地 - 853)

注: -号代表土壤侵蚀 Note: - means soil erosion

壤侵蚀的平均速率耕地 > 非耕地。在坡度相对一致的坡下部, 由于耕作频次较高导致耕地土壤相对疏松, 使得耕地侵蚀速率大于非耕地侵蚀速率。可以看出, 土地利用状况的差异会直接影响到土壤侵蚀速率的大小。

2.3 土壤侵蚀的等级类别

依照水利部制定的土壤侵蚀分类分级标准^[21], 对土壤侵蚀强度进行了分类, 得出各种侵蚀强度在所有研究侵蚀土壤中所占的比例, 结果见表 3。从表中可看出, 在研究区域的侵蚀点中, 有超过 1/2 采样点属微度侵蚀等级, 但也有 25.6% 的采样区域属于中度以上侵蚀。流域内所有土壤侵蚀点的平均侵蚀速率为 $1\ 665\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 若考虑沉积点在内, 土壤净侵蚀模数为 $1\ 280\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 区域总体上属于轻度侵蚀。从采样点的地貌部位来看(表 4), 山坡上部的平均土壤侵蚀模数为 $666\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 山坡中部为 $1\ 907\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 山坡下部为 $1\ 309\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ 。从山坡上部到下部坡度总体上逐渐变小, 土壤侵蚀的速率却是由小到大, 山坡底部又变小, 且大于山坡上部的侵蚀模数, 即: 坡中部 > 坡下部 > 坡上部。在坡度变化相对平缓的情况下, 中部土壤侵蚀量最大。原因是该地降雨集中, 80% 集中在雨季, 降雨期间坡地上部坡面径流较小, 上坡的雨水冲刷

较轻; 坡面中部, 植被稀疏, 加之降雨形成的径流量和流速增加, 坡面冲刷力增大, 部分区域基岩已裸露; 在坡下部, 由于坡度变缓, 水流的辐散导致流速减小, 尽管径流量较大, 但其携带泥沙的能力降低, 坡下部发生部分土壤沉积, 相对于坡中部而言, 土壤侵蚀速率较小。由此可以看出, 坡位是影响土壤侵蚀的重要因素, 坡地中下部是该流域土壤侵蚀治理的主要区域。

与已有研究相比, 侵蚀模数和张燕等^[15]的计算结果类似。张燕仅采样地样点计算耕地侵蚀量, 变化从 $224\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ (菜地) ~ $3\ 456\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ (园地), 而本研究计算的耕地侵蚀的平均速率为 $1\ 673\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$, 计算结果可信, 并且进一步研究了非耕地土壤平均侵蚀速率、山坡的部位与土壤侵蚀的关系。

3 讨论

1) 山坡不同部位的土壤侵蚀速率大小顺序是: 坡中部 > 坡下部 > 坡上部, 坡位是影响土壤侵蚀的重要因素。土地利用方式上看, 非耕地(林地和撂荒地)的侵蚀速率小于耕地的侵蚀速率。同一种利用方式下, 由于耕作措施与耕作方法的差异, 也会

直接影响到土壤侵蚀速率的大小。总之,地貌部位与地形坡度大小、土地利用状况、耕作措施与方法是影响当地土壤侵蚀速率的重要因素。

2) 从土壤侵蚀模数来看,区域整体上属于轻度侵蚀。土壤平均侵蚀速率为 $1\ 280\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$,其中耕地的平均土壤侵蚀速率为 $1\ 673\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$,非耕地土壤平均侵蚀模数为 $1\ 161\ \text{t km}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ 。虽然是轻度侵蚀,但是随着土壤侵蚀的进行,土壤表层的养分也大量流失,给当地的生态环境带来直接的危害:滇池土壤淤积,土壤中的有机质、化肥以及农药等物质也直接随土壤流入滇池,导致水体富营养化和水质变差。若泥沙等碎屑沉积物沉积速率大于湖底的沉降速度,则湖盆便走向衰亡,会严重影响当地居民的生活。当地有关部门须进一步采取防护措施,降低滇池底部淤泥增加量;抑制滇池流域土壤退化的速度,促进农业的可持续发展。

从研究结果来看,需要进一步探讨的是坡度与地貌不同部位(坡上、坡中、坡下)土壤侵蚀速率的定量关系以及减少水土流失的最佳农业发展模式。在不同地区,要结合当地的气候条件以及地形地貌,因地制宜,采取合理措施减少土壤侵蚀的速率。

参考文献

- [1] 王震洪,吴学灿,李英南. 滇池流域荒地植被恢复工程控制面源污染生态机理. 环境科学, 2006, 27(1): 37~42. Wang Z H, Wu X C, Li Y N. Ecological mechanisms of the effects of vegetation restoration on the controls of non-point source pollution on barren tableland in Dianchi watershed of China (In Chinese). Environmental Science, 2006, 27(1): 37~42
- [2] 李建国,刀红英,张亮,等. 滇池流域水土流失监测. 水土保持研究, 2004, 11(2): 75~77. Li J G, Dao H Y, Zhang L, et al. Soil and water loss monitoring in the Dianchi watershed (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(2): 75~77
- [3] Theodoropoulos S P, Florou H, Walling D E, et al. Soil erosion and deposition rates in a cultivated catchment area in central Greece, estimated using the ^{137}Cs technique, Soil & Tillage Research, 2003, 69: 153~162
- [4] 李仁英,杨浩,唐翔宇,等. 黄土高原地区 ^{137}Cs 的分布及其影响因子研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 628~631. Li R Y, Yang H, Tang X Y, et al. Effects of geographical factors on the distribution of ^{137}Cs in the Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 628~631
- [5] Yang H, Chang Q, Du M Y, et al. Quantitative model of soil erosion rates using ^{137}Cs for uncultivated soil. Soil Science, 1998, 163(3): 248~257
- [6] 杨浩,杜明远,赵其国,等. 利用 ^{137}Cs 示踪农业耕作土壤侵蚀速率的定量模型. 土壤学报, 2000, 37(3): 296~304. Yang H, Du M Y, Zhao Q G, et al. Quantitative model to estimate soil erosion rates using caesium-137 for cultivated soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 296~304
- [7] Quine T A, Walling D E, Chakela N Q, et al. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: Evidence from Caesium-137 measurements. Catena, 1999, 36: 115~142
- [8] Felipe Z. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: Recent advances and future developments. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 3~13
- [9] Hacıyakupoglu S, Ertek T A, Walling D E, et al. Using caesium-137 measurements to investigate soil erosion rates in western Istanbul (NW Turkey). Catena, 2005, 64: 222~231
- [10] Walling D E, He Q, Whelan P A. Using ^{137}Cs measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 27~43
- [11] 张信宝,赫吉特 D L,沃林 D E. ^{137}Cs 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究. 地球化学, 1991, 3: 212~218. Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential to use ^{137}Cs to estimate the rates of soil erosion in the Loess Plateau of China (In Chinese). Geochemica, 1991, 3: 212~218
- [12] Doering C, Akber R, Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soils in Southeast Queensland, Australia. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 87: 135~147
- [13] 李仁英,杨浩,赵晓光,等. ^{137}Cs 在黄土高原地区土壤侵蚀示踪中的应用研究. 土壤, 2004, 36(1): 96~98. Li R Y, Yang H, Zhao X G, et al. Application of ^{137}Cs technique to study of soil erosion on Loess Plateau region (In Chinese). Soils, 2004, 36(1): 96~98
- [14] 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. Hydrological Sciences, 1997, 42: 405~423
- [15] 张燕,彭补拙,陈捷. ^{137}Cs 示踪法估算滇池流域土壤侵蚀. 核农学报, 2005, 19(2): 125~128. Zhang Y, Peng B Z, Chen J. Evaluating soil erosion rate in the Dianchi Lake basin using ^{137}Cs tracing method (In Chinese). Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2005, 19(2): 125~128
- [16] 齐永青,张信宝,贺秀斌,等. 中国 ^{137}Cs 本底值区域分布研究. 核技术, 2006, 29(1): 42~50. Qi Y Q, Zhang X B, He X B, et al. ^{137}Cs reference inventories distribution pattern in China (In Chinese). Nuclear Techniques, 2006, 29(1): 42~50
- [17] Walling D E, He Q. Final Report on IAEA Technical Contract 10361/RO-R1. University of Exeter, 2000. 1~11
- [18] 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. Hydrol Sci J., 1990, 35: 267~276
- [19] Lowance R, Sherwood M, Clarence L. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using caesium-137 activity. Soil

- Water Conservation, 1988 (2): 195 ~ 199
- [20] 李洪勋, 吴伯志. 用径流小区法研究不同耕作措施对土壤侵蚀的影响. 土壤, 2006, 38 (1): 81 ~ 85. Li H X, Wu B Z. Effects of cultivation management on soil erosion (In Chinese). Soils, 2006, 38 (1): 81 ~ 85
- [21] 水利部水土保持司 主编. 土壤侵蚀分类分级标准. http://www.chinawater.net.cn/guifan/new_show_03.asp?id=184. Department of Water and Soil Conservation of Water Resource Ministry, P R China. The Standard Classes of and Grades of Soil Erosion http://www.chinawater.net.cn/guifan/new_show_03.asp?id=184

STUDY ON SOIL EROSION IN DIANCHI CATCHMENT USING ¹³⁷Cs TRACER

Zhang Mingli¹ Yang Hao^{1†} Gao Ming¹ Yang Jiudong¹ Liu Xiaohai²

(1 College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

(2 Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China)

Abstract An experiment was carried out in Dianchi catchment, a severely eroded region, in Kunming, Yunnan Province, Southwest China. In the experiment, the technique of ¹³⁷Cs tracer is introduced as a new approach to the study of soil erosion, though it has already been extensively used in this field the world over and yield numerous fruits in the study on deposition, erosion and transportation of silts in the process of soil erosion. The method of using ¹³⁷Cs as soil tracer makes it feasible to study soil erosion on the catchment scale, moreover, it is reliable and time-and labor-saving. The Yun-Gui Plateau, squatting in Southwest China, is one of the most severely eroded regions in the southern part of the country. Owing to lack of historic data, it is hard to predict the mid-long term (ca. 50 a) mean soil erosion rate, just by measuring for a short term. In this experiment the technique was used to study distribution of soil erosion intensity in the Dianchi Catchment. Results show that soil erosion rate along a slope followed a decreasing order of mid-slope > lower-slope > upper slope; and among the lands different in land use, cultivated land > uncultivated land. The research also revealed that the average soil erosion rate in the catchment was 1 280 t km⁻² a⁻¹, and in the category of light erosion. Position in the landform, slope and land use pattern are major factors affecting soil erosion.

Key words ¹³⁷Cs; Soil erosion; Dianchi catchment