

岩溶坡地土壤侵蚀强度的 ^{137}Cs 法研究

张治伟^{1,2}, 傅瓦利^{1*}, 张洪¹, 夏凯生¹, 朱章雄^{1,2}

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715 2. 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 在重庆南部南川市境内, 按不同侵蚀强度取 ^{137}Cs 样品, 用于研究岩溶坡地不同侵蚀程度的土壤侵蚀强度与特征。结果表明, 林草地侵蚀速率变化范围 $49.3\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})\sim 230.5\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 平均侵蚀速率 $112.5\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$; 缓坡耕地侵蚀速率变化范围 $190.3\sim 1138.4\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 平均 $565.5\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$; 陡坡耕地的侵蚀速率变化范围为 $452.0\sim 3759.4\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 平均 $2264.8\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。与黄土高原和紫色土区相比, 岩溶区侵蚀速率较小。

关键词: 岩溶区; 不同侵蚀强度; ^{137}Cs 法研究

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

我国岩溶区面积 $344\times 10^4\text{ km}^2$, 其中裸露型岩溶区 $90.7\times 10^4\text{ km}^2$, 是岩溶大国。岩溶区广泛分布的是碳酸盐岩, 其酸不溶物含量低, 一般在10%以下, 甚至不到1%^[1]。由于碳酸盐岩以化学溶蚀为主, 90%以上的物质溶于水而被带走, 留下的成土物质较少, 从而导致岩溶区成土速度慢, 大部分土层浅且不连续。如果再叠加人类对土壤、土地资源的不合理利用, 将导致水土流失加剧, 加剧岩溶生境的脆弱性, 这也是部分岩溶区石漠化加剧的重要原因。近十多年来, 我国在黄土高原、长江上游、西藏和江南丘陵红壤区等开展的 ^{137}Cs 法示踪土壤侵蚀的研究, 获得了大量的数据。作为脆弱生态区的西南岩溶区开展的工作还极有限, 仅见到白占国、万国江两位学者作了核素在岩溶环境中的分布、迁移特征及其与环境关系方面的报道^[2,3], 而岩溶区核素示踪土壤侵蚀速率的定量研究未见报道。开展西南岩溶坡地土壤侵蚀速率及侵蚀产沙规律研究十分迫切和必要。本研究以岩溶坡地不同侵蚀类型为研究对象, 开展 ^{137}Cs 法示踪土壤侵蚀强度的初步研究, 以

揭示岩溶坡地不同侵蚀类型土壤侵蚀强度及特征, 这将对岩溶脆弱生态区经济建设和石漠化综合治理具有重要的指导与实践意义。

1 实验方法与研究区概况

本研究以 ^{137}Cs 示踪土壤侵蚀的原理和方法, 开展岩溶区不同侵蚀强度条件下土壤侵蚀速率及特征研究。 ^{137}Cs 主要是20世纪50年代中期到70年代末核试验产生的人工放射性同位素, 其半衰期为30.2 a^[4]。 ^{137}Cs 主要随降雨降落到地面, 而后迅速被土壤颗粒吸附, 一般不发生淋溶流失, 也不会为植物所吸收, ^{137}Cs 在土壤中的再分配主要由土壤侵蚀和堆积所确定^[5]。 ^{137}Cs 核示踪技术已经广泛应用于侵蚀速率、泥沙来源和滩地沉积速率研究, ^{137}Cs 示踪土壤侵蚀是定性与定量的结合。

本研究在重庆南川市东部的东胜和三泉镇取样, 这里是云贵高原向四川盆地的过渡地带, 属于乌江下游支流大溪河流域的龙岩江小流域, 年均降雨

收稿日期 (Received date): 2006-12-13; 改回日期 (Accepted): 2007-03-01。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40672165); 重庆市科委软科学项目“石漠化与重庆岩溶地区农村经济发展关系研究 (40600206)”。[National Science Foundation of China No. 40672165; Science and Technique Committee Foundation of Chongqing “Study on the relationship between Rock desertification and the country's economic development in Chongqing municipality, No. 40600206”]

作者简介 (Biography): 张治伟, (1974-), 男, 硕士生, 主要研究方向为岩溶环境学。[Zhang Zhiwei (1974-), male, graduate student. Specialized in the science of karst environment. E-mail: zflyzzw@swu.edu.cn.]

* 通讯作者: 傅瓦利, 教授, 从事土壤地理学与土壤侵蚀研究。[Communication author: FuWali Professor. Specialized in pedogeography and soil e-

量 > 1 200 mm。区内岩溶地貌发育, 碳酸盐岩层主要分布在寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系地层中, 岩溶丘陵和岩溶低山广布, 山间发育岩溶洼地和岩溶盆地, 局部地区石漠化严重^[6], 是西南典型亚热带岩溶区。

¹³⁷Cs 示踪土壤侵蚀 需要同时采集全样和分层样 (分层样剖面同时测定了部分理化性质以研

究 ¹³⁷Cs 的剖面分布特征, 表 1), 本研究全样由内径 8 cm 的取样筒垂直打入地面, 非耕地取样深度 30~35 cm, 耕地取样深度 35 cm, 有堆积的剖面加深取样, 取样筒拔除后取出筒内全部土壤。分层样品由内径 11 cm 可以拆分的取样筒垂直打入地下, 取样器拔出后每 5 cm 截取一个分层样品。

表 1 本底值剖面和剖面 10 基本性状

Table 1 Basic features for the referenced soil profile and the tenth profile

剖面	剖面类型	土层	土深 (cm)	颜色	有机质 (g /kg)	粘粒 (g /kg)	容重 (g /cm ³)
本底剖面	无干扰草地	A	0~ 10	浅黑至黑色	102. 26	152. 9	-
		AB	10~ 25	黄色	52. 15	202. 4	-
		B	25~ 70	黄色	38. 73	224. 3	-
剖面 10	旱地堆	A	0~ 26	黄色	21. 25	384. 4	1. 11
	积剖面	B	26~ 60	黄色	16. 58	405. 7	1. 60
	(地块下部)	C	60~ 150	黄色	7. 95	437. 8	1. 66

为了研究不同侵蚀程度土壤侵蚀速率及特征, 我们分马尾松灌丛林地、草坡、缓坡旱地和陡坡旱地四大侵蚀类型取样, 取样时记录土地类型、坡度、耕层深度, 取环刀样品测定土壤容重。取全样和分层样品共 29 个, 其中林草地 3 个, 缓坡旱地和陡坡旱地各 5 个, 其余为分层样品。样品经过风干研磨, 过 2 mm 筛, 称重, 送四川大学物理系用 γ 能谱仪测定, 测试重量一般不少于 250 g。

2 结果与讨论

2.1 岩溶区土壤 ¹³⁷Cs 区域本底值调查

本底值是一个地区单位面积沉降的 ¹³⁷Cs 总量, 一般在既无侵蚀又无堆积的平坦林草地取样, 本底值的准确与否直接关系到土壤侵蚀量计算的准确性。本研究本底值样品在研究区一块较为平坦的草地上取得, 该草地周围较开阔, 老乡介绍该草地自解放以来未受到扰动。同时采集全样和分层样品, 全样取样深度 35 cm, 分层样品自表层向下每 5 cm 取一个样品, 取到 30 cm。经测试和计算, 本底值为 1 948. 1 Bq/m²。与文安邦等人 2001 年测试计算的四川南充和重庆开县 ¹³⁷Cs 本底值 2 035. 8 Bq/m²、1 924. 6 Bq/m²^[7] 以及根据 Lu1998 年在重庆长寿梯田取样测得的 ¹³⁷Cs 本底值折算的 2004 年本底值

1 884. 6 Bq/m² 基本接近^[8]。

2.2 耕地与非耕地 ¹³⁷Cs 剖面分布特征

从本底值附近非耕地分层样品的测试结果来看 (图 1), ¹³⁷Cs 含量集中于土壤表层, 剖面 ¹³⁷Cs 含量 69. 8% 分布于土壤表层 0~ 5 cm 范围内, 84. 6% 的 ¹³⁷Cs 含量分布于 0~ 10 cm 范围内, 自表层向下迅速减少, 符合前人报道的关于非农耕地 ¹³⁷Cs 剖面分布随深度的指数变化规律^[9 10], 其拟合方程为 Y = 46. 874e^{-0. 12x}, 说明该草地用来作为区域本底值剖面是可靠的。另外, 剖面 ¹³⁷Cs 分布深度达 30 cm 左右, 可能与 ¹³⁷Cs 的迁移及剖面下部粘粒含量高有关, B 和 AB 层粘粒含量远高于 A 层 (见表 1)。

图 2 为一个农耕地的 ¹³⁷Cs 剖面分布示意图, 该取样剖面位于一块坡耕地下部。首先可以看出该剖面 ¹³⁷Cs 分布深度已经远大于犁耕层深度, 表明该剖面存在堆积, 从土层深度来看, 剖面土深达 150 cm, 也可以表征该剖面的堆积 (表见 1)。其次 ¹³⁷Cs 相对均匀地分布于剖面内, 尤其在 0~ 20 cm 的犁耕层内相差甚小, 符合前人报道的农耕地 ¹³⁷Cs 剖面均匀分布特征^[11]。再次, 剖面 ¹³⁷Cs 含量的峰值出现在 20~ 30 cm 的土层中, 说明 20~ 30 cm 处的土层应为堆积前和 ¹³⁷Cs 沉降期间的土层, 该层位由于接受 ¹³⁷Cs 的沉降而具有较高的 ¹³⁷Cs 质量活度。该层以上则接受地块上部表层和次表层土壤堆积, 因混合了后期堆积的 ¹³⁷Cs 浓度较低的次表层及犁耕作

用带来的底层土壤,所以混合均匀后耕层内的 ^{137}Cs 质量活度略低于20 cm以下堆积期前的土壤层。

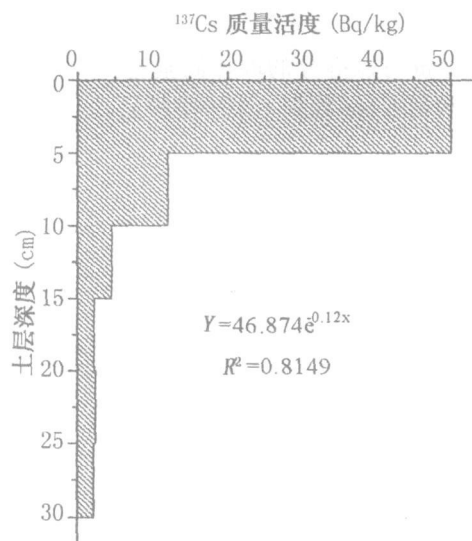


图 1 本底值剖面 ^{137}Cs 深度分布

Fig. 1 Depth distribution of ^{137}Cs content in the referenced soil profile

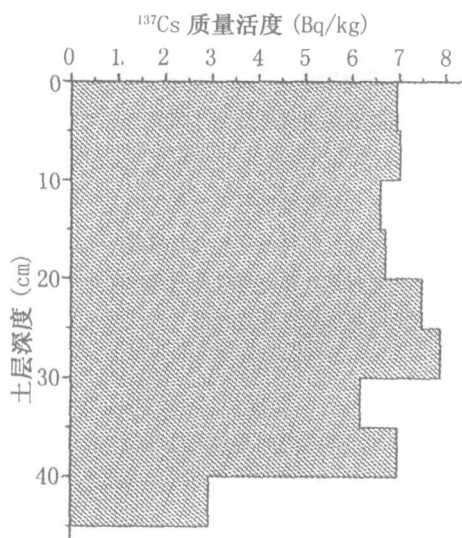


图 2 剖面 10 的 ^{137}Cs 深度分布特征

Fig. 2 Distributive feature of ^{137}Cs content in the layers of the tenth profile

2.3 农耕地侵蚀速率的计算

我国已在黄土高原和长江上游开展了十多年的 ^{137}Cs 法示踪土壤侵蚀试验研究^[7,8,12],已有研究指出,中科院水利部成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员建立的农耕地侵蚀量计算模型不仅简单易用,而且精确度相对较高^[13]。本研究采用该模型计算岩溶坡耕地土壤点侵蚀量^[17],该模型为

$$X = A_e \times (1 - h/H)^{N-1963} \quad (1)$$

式中 X 为 ^{137}Cs 面积活度 (Bq/m^2); A_e 为 ^{137}Cs 有效本底值 (Bq/m^2), $A_e = A_0 \times (1 - R)$, A_0 为 ^{137}Cs 本底值 (Bq/m^2), R 为径流系数; h 为土壤年流失厚度 (cm); H 为犁耕层深度 (cm), N 为取样年份。

2.4 非耕地侵蚀速率的计算

非耕地土壤点侵蚀量采用张信宝建立的公式^[14]

$$X = A_0 \times e^{-\lambda h} \quad (2)$$

式中 λ 为 ^{137}Cs 的深度分布衰减系数,根据分层土壤剖面的 ^{137}Cs 深度分布特征求算; h 为1963年以来土壤流失总厚度 (cm), X 、 A_0 含义同式 (1)。

2.5 土壤侵蚀强度及土壤侵蚀特点

2.5.1 不同侵蚀程度土壤的侵蚀速率

不同土地类型侵蚀强度不同,可将研究区分为四大侵蚀土地类型,各类型取样情况、平均坡度、 ^{137}Cs 平均面积活度及平均侵蚀速率计算结果见表2。两个马尾松灌丛林地剖面,一个覆盖度高, ^{137}Cs 面积活度大,为 $1\,474.6\text{ Bq}/\text{m}^2$,其相应侵蚀速率仅 $57.9\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;另一个是马尾松疏林地,面积活度值偏低,为 $668.8\text{ Bq}/\text{m}^2$,相应的侵蚀速率为 $230.5\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。草坡地的 ^{137}Cs 面积活度值也很高,达 $1\,557.0\text{ Bq}/\text{m}^2$ 。林草地剖面平均 ^{137}Cs 面积活度 $1\,233.5\text{ Bq}/\text{m}^2$,占当地 ^{137}Cs 本底值的63.32%,林草地平均侵蚀速率 $112.56\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,林草地侵蚀轻微。

由表2可以看出,耕地中缓坡地与陡坡地的侵蚀状况差异大,平均坡度 11.2° 的缓坡地 ^{137}Cs 面积活度变化范围 $1\,090.6 \sim 1\,869.8\text{ Bq}/\text{m}^2$,平均面积活度 $1\,391.5\text{ Bq}/\text{m}^2$,相应的土壤平均侵蚀模数 $565.5\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;平均坡度 25.4° 的陡坡地 ^{137}Cs 面积活度变化范围 $540.5 \sim 1\,244.9\text{ Bq}/\text{m}^2$,平均面积活度 $854.9\text{ Bq}/\text{m}^2$,相应的平均侵蚀模数 $2\,264.8\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。陡坡地 ^{137}Cs 平均面积活仅相当于缓坡地的61.4%,陡坡地平均侵蚀速率为缓坡耕地的4倍多。

2.5.2 土壤侵蚀强度

坡度 $7 \sim 38^\circ$ 的坡耕地10个点侵蚀模数介于 $190.3 \sim 3\,759.4\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间,侵蚀模数远小于三峡库区紫色土坡耕地(平均坡度 $14^\circ \sim 29^\circ$)报道的断面加权平均侵蚀模数 $3\,464 \sim 9\,854\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[8]和黄土高原地区坡耕地(平均坡度 $19^\circ \sim 29^\circ$)报道的 $4\,856.6 \sim 8\,409.4\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[15],更小于李仁英等人2004年在黄土高原报道的两坡耕地断

面平均侵蚀模数 14 280 t/(km² · a) 和 13 520 t/(km² · a) ^[9]。相对于黄土高原和川中丘陵紫色土区来说, 岩溶区平均侵蚀速率较低。

表 3参照水利部和中科院遥感所 1997年侵蚀强度的分级标准 ^[16]对研究区的侵蚀强度进行划分, 按此标准则岩溶坡耕地的侵蚀模数较小, 分属于微

度侵蚀、轻度侵蚀和中度侵蚀, 无强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀剖面。这一方面可能与石灰土质地粘重, 抗蚀性强有关。另一方面还与侵蚀方式不同有关, 石灰岩土壤以表层侵蚀为主, 而黄土高原地区除表层侵蚀外, 深层侵蚀 (沟蚀) 还占重要比重。

表 2 取样情况及土壤侵蚀速率

Table 2 Basic features of sampling profiles and its erosion rates

土地类型	剖面数	平均坡度 (°)	¹³⁷ Cs面积活度	¹³⁷ Cs平均	土壤侵蚀速率	土壤平均
			变化范围 (Bq/m ²)	面积活度 (Bq/m ²)	变化范围 t/(km ² · a)	侵蚀速率 t/(km ² · a)
马尾松灌木	2	12. 5	668. 8~ 1 474. 6	1 071. 7	57. 9~ 230. 5	144. 2
草坡	1	15. 0	1 557. 0	1 557. 0	49. 3	49. 3
缓坡旱耕地	5	11. 2	1 090. 6~ 1 869. 8	1 391. 5	190. 3~ 1 138. 4	565. 5
陡坡旱耕地	5	25. 4	540. 5~ 1 244. 9	854. 9	452. 0~ 3 759. 4	2 264. 8

表 3 参照水利部和中科院遥感所标准 ^[16]的研究区石灰岩土壤侵蚀分级 [t/(km² · a)]

Table 3 Classes of soil erosion in the research area based on the criterion of the Ministry of water resources P. R. CHINA [t/(km² · a)]

分级标准	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
	< 1 000	1 000~ 2 500	2 500~ 5 000	5 000~ 8 000	8 000~ 15 000	> 15 000
剖面数	9	1	3	0	0	0
占总剖面数 (%)	69. 2	7. 69	23. 07	0	0	0

表 4 参照陈晓平在岩溶区的分级标准 ^[17]进行的土壤侵蚀强度分级 [t/(km² · a)]

Table 4 Classes of soil erosion in research area based on the Chen Xiaoping's criterion used in karst region [t/(km² · a)]

分级标准	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
	< 46	46~ 230	230~ 460	460~ 700	700~ 1 300	> 1 300
剖面数	0	3	3	1	3	3
占总剖面数 (%)	0	23. 07	23. 07	7. 69	23. 07	23. 07

为了与岩溶区进行对比, 表 4采用陈晓平在云南西畴岩溶区土壤侵蚀研究中用过的分级标准对各研究剖面进行分级 ^[17]。由表 2和表 4可见, 林草地和坡度较小的坡耕地以轻度和中度侵蚀为主, 坡度较大的坡耕地则出现强度到剧烈侵蚀。由于岩溶区容许流失的土量小, 照搬黄土高原和紫色土区的标准是不合理的, 运用陈晓平的分级标准可能更适合于岩溶区。对岩溶区土壤侵蚀强度的分级还有待于进一步探讨。

2. 5. 3 取样剖面线平均加权侵蚀模数

本研究采用地形剖面法布点共研究了三个岩溶坡地四条取样断面线的侵蚀与堆积情况, 利用式 (1) 和式 (2)计算得到点的侵蚀速率, 再由样点之间的距

离加权平均求得各断面平均侵蚀速率模数 (表 5)。

表 5 取样剖面的断面加权平均侵蚀模数

Table 5 The average erosion rates of the sampling lines

剖面线	利用方式	坡长 (m)	平均坡度 (°)	剖面数	断面加权平均速率模数 [t/(km ² · a)]
1	坡耕地	75	19	4	279. 7
2	上部马尾松林地, 下部耕地	150	24	3	1 545. 9
3- a	坡耕地	40	15	3	435. 5
3- b	坡耕地	40	17	3	1 260. 8

由表 5可见, 断面平均侵蚀速率与平均坡度具有一定相关性, 剖面 1和剖面 3- a因底部出现堆积

而使平均侵蚀速率模数较小。坡度对侵蚀的影响在同一坡地表现更为明显,即一般情况下,随着坡度的增大,侵蚀速率增大,坡度与侵蚀速率相关性($R^2 = 0.594$) (图 3)。可见坡度是影响侵蚀强度的重要因素,这与王晓燕和文安邦等人分别在黄土高原和长江上游的研究结论基本一致^[14 18]。

2.5.4 岩溶区土壤侵蚀的特点

表 6对研究区土壤侵蚀速率与前人报道的岩溶区成土速率作了对比。王世杰等 1999 年计算的湘西和贵州 5个石灰土剖面形成 1 m 厚的土层需 28 ~ 788 ka^[19],即相当于年均成土厚度为 0.001 2~ 0.035 mm。由表 6可见我们研究的剖面中,有 1个高覆盖度的草地的年均侵蚀厚度为 0.033 mm,略低于王世杰等计算的成土速率的最高值 0.035 mm/a,表明按现有成土速率和侵蚀速率仍然有土层不断增厚的可能。加上部分岩溶区碳酸盐岩与非可溶岩互层产出,使成土速率成倍提高,从而使岩溶区局部堆积几米甚至十几米厚的土层,这是岩溶区侵蚀沉积的特点之一。

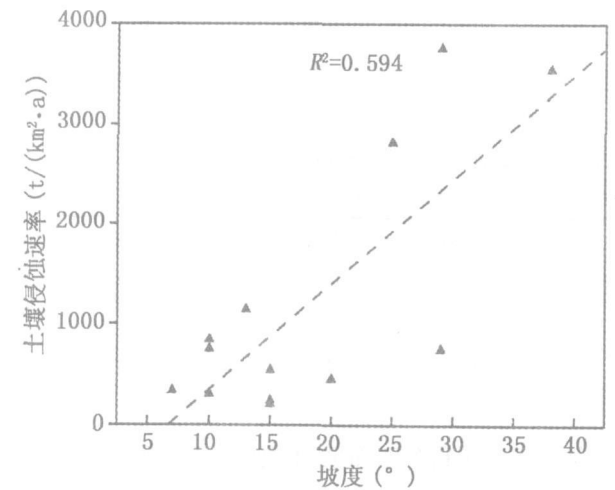


图 3 侵蚀速率与坡度关系

Fig 3 Correlative analysis between gradient and soil erosion rates

另外,从本研究来看,岩溶坡耕地上中部以侵蚀为主,中部往往侵蚀最强烈,上中部搬运下来的土壤在坡地底部会发生局部堆积,表明坡地垦殖尤其陡坡开垦造成岩溶石山化的同时也常在低洼地发生土层增厚的过程。

由表 6可见林草地开垦为耕地后,侵蚀速率普遍增高,坡耕地年均侵蚀厚度为林草地平均年侵蚀厚度的 1.8~ 42倍,坡耕地 10个点年均侵蚀厚度普遍大于王世杰等计算的成土厚度。同时碳酸盐岩酸

不溶物含量低,化学溶蚀后残留成土物质少,成土速度缓慢,容许流失的土壤物质少,岩溶区土壤侵蚀的危害性是极大的。

表 6 岩溶区成土速率与侵蚀速率的对比

Table 6 Contrast between soil erosion rates and soil fom rates in karst region

王世杰等计算的湘西和贵州 5剖面成土速率 ^[19]	本研究所计算的土壤侵蚀速率 (mm/a)		
	林地	草地	坡耕地
28~ 788 ka/m 即 0.001 2~ 0.035 mm/a	0.041~ 0.159	0.033	0.14~ 3.2

3 结语

本文所研究的岩溶区不同侵蚀类型中,3个林草地剖面平均侵蚀速率为 112.5 t/(km²·a),10个坡耕地剖面的土壤侵蚀速率在 190.3~ 3 759.4 t/(km²·a)之间。坡耕地年均侵蚀厚度为林草地平均年侵蚀厚度的 1.8~ 42倍。

岩溶坡耕地上中部侵蚀速率较大,并与坡度正相关,陡坡垦殖造成坡体上中部土壤流失,加剧石漠化发展。

与黄土高原和紫色土区对比,岩溶区侵蚀强度较小。

致谢:本研究得到中科院水利部成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员的帮助和指导,在此表示衷心地感谢。

参考文献 (References)

[1] Yuan Daoxian, Cai Guihong The Science of Karst Environment [M]. Chongqing Chongqing Press, 1988. 24~ 30[袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆出版社,1988.24~ 30]

[2] Bai Zhanguo, Wan Xi Wan Guojiang et al. Geochemical speciation of ⁷Be, ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra and ²²⁸Ra in soils of the karst region southwestem China and their erosion trace[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(4): 407~ 411[白占国,万曦,万国江,等.岩溶山区表土中⁷Be, ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra和²²⁸Ra的地球化学相分配及其侵蚀示踪意义[J].环境科学学报,1997,17(4): 407~ 411]

[3] Bai Zhanguo, Wan Guo-jiang. A Comparative Study on Distribution of ⁷Be and ¹³⁷Cs in the surface soils in the westem Yunnan and the central Guizhou Provinces[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(1): 43~ 48 [白占国,万国江.滇西和黔中表土中⁷Be与¹³⁷Cs分布特征对比研究[J].地理科学,2002,22(1): 43~ 48]

[4] Costanza Di Stefano, Vito Ferro, Paolo Portà et al. Testing a spatially distributed sediment delivery model (SEDD) in a forested basin

- by cesium- 137 technique[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(3): 148~157
- [5] Xinbao Zhang, Desmond E Walling. Characterizing Land Surface Erosion from Cesium- 137 Profiles in lake and reservoir sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(2): 514~523
- [6] Zhang Zhiwei, Yuan Dao-Xian, Fu Wu-li *et al.* Study on the distributive characteristics of soil acidity and its influencing factors in jinjomountain area Chongqing[J]. *Carshgica Sinica*, 2006, 25(1): 67~72[张治伟, 袁道先, 傅瓦利, 等. 重庆金佛山地区土壤酸度分布特点及影响因素研究 [J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 67~72]
- [7] Wen Anbang, Zhang Xinbao, Wang Yukuan, *et al.* A study on soil erosion rates of the purple slope cultivated land using Caesium- 137 technique in the upper of the Yangtze River[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(Suppl) 56~59[文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 长江上游紫色土坡耕地土壤侵蚀 ^{137}Cs 示踪法研究 [J]. 山地学报, 2001, 19(增刊): 56~59]
- [8] Wen Anbang, Qi Yongqing, Wang Yangchun, *et al.* Study on erosion and sedimentation in Yangtze Three Gorge Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 33~36[文安邦, 齐永青, 汪阳春, 等. 三峡地区侵蚀泥沙的 ^{137}Cs 法研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 33~36]
- [9] Li Ren-ying, Yang Hao, Zhao Xiao-guang, *et al.* Application of ^{137}Cs Technique to study of soil erosion on loess plateau region[J]. *Soils*, 2004, 36(1): 96~98[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 [J]. 土壤, 2004, 36(1): 96~98]
- [10] Zheng Yongchun, Wang Shijie. Several models for converting ^{137}Cs measurements to estimating soil erosion rates and reliability of hypothesis[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 600~605[郑永春, 王世杰. ^{137}Cs 技术定量侵蚀速率常用模型及其讨论 [J]. 山地学报, 2002, 20(5): 600~605]
- [11] Yang Hao, Du Mingyuan, Zhao Qiguo, *et al.* Quantitative model considering surface enrichment to estimate soil erosion rates using ^{137}Cs [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3): 42~48[杨浩, 杜明远, 赵其国, 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, 5(3): 42~48]
- [12] Wen Anbang, Zhang Xinbao, Zhang Yiyun, *et al.* Soil erosion and sediment transportation on the loess hill and slope land[J]. *Mountain Research*, 1995, 13(2): 85~90[文安邦, 张信宝, 张一云, 等. 黄土岗坡耕地土壤侵蚀与泥沙输移 [J]. 山地研究(现山地学报), 1995, 13(2): 85~90]
- [13] Wang Xiaoyan, Li Liqing, Yang Mingyi, *et al.* Spatial distribution of soil erosion on different utilization soils in Yangou Watershed by Using ^{137}Cs tracer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 74~76 [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 [J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 74~76]
- [14] Wen Anbang, Zhang Xinbao, Wang Yukuan, *et al.* Study on soil erosion rates using ^{137}Cs technique in upper Yangtze River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6): 1~3[文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 长江上游 ^{137}Cs 法土壤侵蚀量研究 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 1~3]
- [15] Zhang Xinbao, Feng Mingyi, Wen Anbang. Study on soil erosion rate and the origin of mud and sand in loess plateau by cesium- 137 technique[J]. *SWCC*, 2002, (7): 25 [张信宝, 冯明义, 文安邦. 黄土高原土壤侵蚀速率和泥沙来源的 ^{137}Cs 示踪法研究 [J]. 中国水土保持, 2002, (7): 25]
- [16] Yuan Jianping. Preliminary study on grade scale of soil erosion intensity[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(6): 54~57 [袁建平. 土壤侵蚀强度分级标准适用性初探 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(6): 54~57]
- [17] Chen Xiaoping. Research on characteristics of soil erosion in karst mountainous region environment [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(4): 31~36[陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 31~36]
- [18] Wang Xiaoyan, Tian Junliang, Liu Puling, *et al.* Study on relationships between slope gradient and soil loss using ^{137}Cs tracer [J]. *Acta Agriculurae Nucleare Sinica*, 2004, 18(5): 390~393 [王晓燕, 田均良, 刘普灵, 等. ^{137}Cs 示踪法研究坡度与土壤流失的关系 [J]. 核农学报, 2004, 18(5): 390~393]
- [19] Wang Shijie, Ji Hongbing, Ouyang Zhiyuan, *et al.* Preliminary study on carbonate rock weathering and soil formation [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(5): 441~449[王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究 [J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5): 441~449]

Study on Soil Erosion of Different Degrees in Karst Region by Using Cesium⁻¹³⁷ Technique

ZHANG Zhiwei^{1, 2}, FU W ali¹, ZHANG H ong¹, X I A Kaisheng¹, ZHU Zh angx iong^{1, 2}

(1. College of Geographic Science, Southwest University, Chongqing 400715 China; 2. Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin 541004 China)

Abstract Chose soil samples according to different degrees of soil erosion in karst slope to study the soil erosion rates, soil erosion intensity and its characteristics by using cesium⁻¹³⁷ technique in Nanchuan county, Chongqing. It is showed that the erosion rates of woodland and grassland range from 49.3 t/(km²·a) to 230.5 t/(km²·a), its mean value is 112.56 t/(km²·a); the erosion rates of cultivated profiles associated with relatively small slopes range from 190.3 to 1138.4 t/(km²·a), its mean value is 565.5 t/(km²·a). Nevertheless the erosion rates of cultivated land with large slopes change from 452.0 t/(km²·a) to 3759.4 t/(km²·a), its mean value is 2264.8 t/(km²·a). Our research shows that the average thickness eroded in cultivated profiles in one year is 1.8 to 42 times as the woodland and grassland. Positive correlation exists between soil erosion rates and gradients. In addition, soil erosion rates on upside and middle sector are bigger than that of lower section in karst slopes, farming at steep slope must be responsible mostly for the increase of soil erosion rates and the development of the rock desertification. Contrast to purple land and loess plateau, the soil erosion rates in karst region is small, but it's very dangerous because of the slow speed of weathering and pedogenesis of carbonate rock.

Key words karst region, different soil erosion degree, Cesium⁻¹³⁷ technique

封面照片: 川西高原稻城河上游河谷地貌

稻城河位于四川省甘孜藏族自治州稻城县境内, 处于青藏高原东部——川西高原山原区, 发源于横断山脉北段沙鲁里山(主峰格聂峰, 海拔 6204 m)的东坡, 为金沙江左岸支流水洛河的上游, 河流海拔多在 3000 m 以上。照片处河面高程约 3700 m, 河谷开阔, 河床宽浅, 河滩地发育, 呈典型的高原河流地貌景观。

(山水)