

文章编号:1001-1498(2011)02-0239-08

粤北石漠化地区土壤侵蚀的¹³⁷Cs法研究

张素红¹, 李 森², 吴 波^{1*}, 严 平³, 魏兴琥²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 佛山大学资源与环境科学研究所, 广东 佛山 528000;

3. 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心, 中国沙漠研究中心, 北京 100875)

摘要:据2005年10月的野外调查及对TM卫星影像解译分析结果,研究了粤北不同程度的石漠化地区、不同利用类型土地的¹³⁷Cs区域分布以及土壤侵蚀速率特征。结果表明:粤北石漠化地区土壤¹³⁷Cs活度的平均值为(6.54±0.57) Bq·kg⁻¹,土壤中¹³⁷Cs水平随石漠化程度增加有先降低然后升高的趋势,表明在重度石漠化阶段,过高的基岩裸露率导致其周围土壤对¹³⁷Cs的集中吸附,¹³⁷Cs在某些沉积小环境内逐渐富集。研究区¹³⁷Cs背景值为(1 433.60±131.40) Bq·m⁻²,低于北半球的平均值,¹³⁷Cs剖面分布基本符合指数分布,最高值出现在2~4 cm深度范围内。在轻度、中度石漠化地区,非耕作土壤侵蚀速率的平均值分别为1 369.0、1 833.5 t·km⁻²·a⁻¹;耕作土壤侵蚀速率远高于非耕作土壤,坡度对土壤侵蚀影响非常明显。

关键词:石漠化;¹³⁷Cs法;背景值;侵蚀速率;粤北

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

Study of Soil Erosion Using ¹³⁷Cs Method in Rocky Desertification Region of Northern Guangdong

ZHANG Su-hong¹, LI Sen², WU Bo¹, YAN Ping³, WEI Xing-hu²

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration,

Beijing 100091, China; 2. Institute of Resource and Environment Science, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China;

3. MOE Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control at Beijing Normal University;

China Center of Desert Research, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil erosion is a main factor determining the cesium-137 (¹³⁷Cs) content and its redistribution in soil. Based on the field investigation in October, 2005 and the interpretation and analysis of TM images, this paper discussed the distribution of ¹³⁷Cs in karst mountainous region in northern Guangdong, the soil erosion rate and erosion characters in rocky desertification land of different degrees. The ¹³⁷Cs activity in soils in rocky desertification region of northern Guangdong averages (6.54±0.57) Bq·kg⁻¹, and the ¹³⁷Cs level in soils tends to decrease at first and then increase with the increase of the degree of rocky desertification, which shows that in severe rocky desertification stage, the soil particles around the bare rock adsorb the ¹³⁷Cs collectively and the ¹³⁷Cs is gradually enriched in depressions. The ¹³⁷Cs reference inventory in the study region is (1 433.60±131.40) Bq·m⁻², which is lower than the mean value of northern hemisphere. The ¹³⁷Cs distribution in soil profile roughly conforms to an exponential distribution pattern, and the highest point appears in the range of 2–4 cm deep. The mean erosion rates of non-cultivated soil at slight and moderate rocky desertification land are 1 369.0 and 1 833.5 t·km⁻²·a⁻¹ respectively.

收稿日期:2008-12-10 修回日期:2010-05-20

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAC03A10)及国家自然科学基金项目(30471421)共同资助

作者简介:张素红(1971—),女,新疆哈密人,博士后,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:ffren126@126.com

*通讯作者:吴波(1968—),男,吉林抚松人,博士,研究员,主要从事景观生态学与荒漠化过程等研究。E-mail:wubo@caf.ac.cn

The erosion rate of cultivated soil is much higher than that of non-cultivated soil, and is much affected by slope.

Key Words: rocky desertification; ^{137}Cs method; ^{137}Cs reference inventory; soil erosion rate; Northern Guangdong

石漠化是热带、亚热带湿润地区岩溶极其发育的环境背景下持续水土流失的最终结果,表现为植被退化,土壤严重侵蚀甚至丧失,基岩大面积裸露,地表呈现类似荒漠化的景观^[1-2],已成为我国主要环境问题之一。由于岩溶地区成土速度慢,土层薄,土壤层与母岩间缺乏过渡层,易于流失且很难恢复,土壤流失造成的生态危害远高于黄土地区,因此岩溶山区被列为我国四大生态环境脆弱区之一。石漠化本质上说是由于喀斯特地区的成土速率远小于水土流失的速率而造成的土地生产力退化过程,影响水土流失的因素也就是影响石漠化过程的因素。碳酸盐岩的性质直接影响了土层厚度和土壤在地表的分布方式,是石漠化发生的背景条件,土壤性质、坡度、降水量以及人为干扰也是影响石漠化土地分布的主要因素。粤北石漠化区域处于北江源头及上游水源涵养区,土壤以石灰土为主。因为石灰土中有机质平均含量一般高于红壤与黄壤^[3],所以更多被开垦为耕地。不合理的人为活动破坏植被与土壤,导致土壤流失,水土资源短缺,并间接影响珠江流域的生态环境。研究区耕作模式粗放,作物产量较低,为满足日益增加的人口的需要,导致陡坡开荒加剧,对土壤破坏更加严重。中外学者对石漠化的研究主要集中在石漠化的概念与内涵、石漠化的成因、影响及石漠化区域的环境治理与生态重建等方面^[1-4],近几年的研究重点偏重于石漠化发展对于植被动态、土壤理化性质的影响及岩溶生态系统的土壤特性研究^[5-7]。对土壤侵蚀速率的测算一般采用侵蚀针法、长期定点观测等方法,放射元素示踪方法逐渐引入到土壤侵蚀研究中^[8-10]。

^{137}Cs 示踪法是近些年来应用范围较广的一种方法。 ^{137}Cs 是非自然存在的核试验的产物,被大气环流携带至全球范围内沉降,半衰期30.2年。被土壤颗粒和有机物吸附后, ^{137}Cs 基本不会被植物吸收或因淋溶流失,其在土壤中含量的变化通常仅伴随土壤侵蚀和沉积活动发生,因此被认为是良好的土壤侵蚀示踪元素^[11]。在众多的土壤侵蚀研究方法中, ^{137}Cs 示踪法因量化程度高、研究费用低、结果比较可靠,在国内外得到广泛的应用。很多学者根据 ^{137}Cs 的损失量或堆积量,对不同地区土壤侵蚀或沉积速度进行了定量分析^[12-17],并建立了分别针对非耕作土壤和耕作土壤的侵蚀速率进行估算的多种

模型^[11,18-20]。本文拟采用 ^{137}Cs 示踪法估算粤北岩溶山区土壤侵蚀速率,在对石漠化土地分布最广的广东阳山、英德、连州、乳源4县市野外考察的基础上,结合遥感影像分析结果,首先确定 ^{137}Cs 背景值采样点,取层样和全样确定研究区背景值,并按照石漠化程度的差异选取8个采样点取样测定土壤中 ^{137}Cs 含量,分析耕作区、石漠化程度不同的非耕作区的土壤 ^{137}Cs 分布差异以及土壤侵蚀速率特征,为研究粤北岩溶山区石漠化发展特征提供依据。

1 研究区概况

粤北岩溶山区属南岭山地的一部分,位于 $111^{\circ}55' \sim 114^{\circ}44' \text{ E}$, $23^{\circ}26' \sim 25^{\circ}31' \text{ N}$ 之间,碳酸盐岩地层分布广泛。气候类型为亚热带季风气候,雨热同期,降水丰沛。年均气温 $19.0 \sim 21.0^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1400 \sim 1800 \text{ mm}$,多年平均降水量 1556.4 mm ,雨季4—9月,雨季降水量占全年的80%左右。主要植被类型为石灰岩植被:火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) L.)、绣线菊(*Spiraea blumei* G. Don)、牡荆(*Vitex negundo* Linn)、欆木(*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliv.)群落。群落以喜钙植物为主,灌木种类较多,乔木种类较少。土层薄,土壤分布不连续,被岩石分割,土体显得破碎,不利于耕作。地表水极易流失,降水虽多但地表仍干旱缺水。

据野外调查及对TM卫星影像解译分析结果,粤北岩溶山区的阳山、英德、连州、乳源4县(市)岩溶分布面积大约占全区总面积的34.43%,约 4809.8 km^2 ^[21];石漠化土地面积达 1016.78 km^2 (2004年),占4县岩溶区总面积的21.14%,其中极重度、重度、中度和轻度石漠化土地的面积分别占0.85%、20.49%、41.47%和37.19%,是我国西南土地石漠化的主要区域之一。

2 研究方法

2.1 样品采集

按照 ^{137}Cs 背景值的取样要求。本研究的背景值取样点定在阳山县东山乡石井林场以东5 km的一处无人为扰动的迹象的台地上,海拔702 m,地形起伏较小,终年有草被覆盖,盖度70%~80%,属典型石灰岩草地,土壤厚度30~70 cm。于平坦处挖一土壤剖面,在0~30 cm深度范围内,每2 cm分层

取样,共取15个层样;并在邻近处用土钻(截面积43.10 cm²)每10 cm取样,取3层(0~30 cm深度范围)土壤混合,共取全样5个重复。

根据研究区卫星影像的解译结果,2005年10月选择英德市岩背乡、阳山县东山乡和连州市龙潭镇进行野外调查和采样。根据不同的植被覆盖率、岩石裸露程度选择可代表不同退化程度石漠化土地的6个样点(轻度、中度、重度石漠化土地各2个样点)和农田的2个样点做详细调查,记录各样点位置、海拔、坡度、植被类型等基本信息。除基岩性质、土壤、坡度、降水量及人为干扰等因素之外,坡向对石漠化发展的影响不明显,因此在样点选择及采样时没有考虑坡向因素。

为满足30 cm的取样深度,¹³⁷Cs取样点需选在土壤较深厚的地方。在基岩裸露率高、土体破碎的重度石漠化区域,采样点选在较局部地势平缓的地形部位。每一样点用土钻随机取30 cm深度内土壤混合全样3个重复,并在采样点附近随机设3个2 m×2 m样方,在每个样方的四顶点、中心点及顶点到中心点连线的中点处用钢钎测定9个点的土壤厚度,计算样方内土壤平均厚度;量算样方内每块裸露岩石的面积,通过裸露岩石所占百分比计算样方的土被覆盖率;在每个样方内随机取表层土样(0~5 cm,3个重复)送实验室测定土壤养分、土壤密度、含水量、pH值。所有¹³⁷Cs样品经自然风干后过1 mm筛,取细样300 g左右送往四川大学物理系核物理实验室,用γ谱仪(美国坎培拉公司(ORTEC)生产的高纯锗(Ge)探测器,样品测试时间15 000 s)进行¹³⁷Cs活度测定,探测下限为0.66 Bq·kg⁻¹。

2.2 ¹³⁷Cs背景值计算

¹³⁷Cs背景值是研究区土壤侵蚀或沉积速率估算的基础,它代表着研究区域保存下来非蚀非积条件下的¹³⁷Cs沉降总量。未扰动土壤剖面中的¹³⁷Cs深度分布可归纳为指数型、尖峰型和递减型3种,其中尖峰型的剖面分布是近年来频繁发现的¹³⁷Cs分布形式^[17,22],峰值出现在2~4 cm层位而不是地表0~2 cm层位,可能是近几十年来¹³⁷Cs在重力作用下长期缓慢扩散、迁移的结果,其函数型与指数分布相似,是最适合现今的¹³⁷Cs深度分布^[17,23]。石井林场¹³⁷Cs剖面分布呈尖峰型(图1)。¹³⁷Cs的缓慢下渗对其总量的变化不会产生显著影响^[12],因此本文按¹³⁷Cs深度分布的回归分析结果将本区背景值剖面分布函数简化为指数分布型:

$$C_s = f(z) = a \cdot e^{-bz} = 11.8285 \cdot e^{-0.1121z} \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9089$$

式中: z 为采样深度, C_s 代表某个深度 z 中的¹³⁷Cs活度(即体积浓度,Bq·kg⁻¹)。

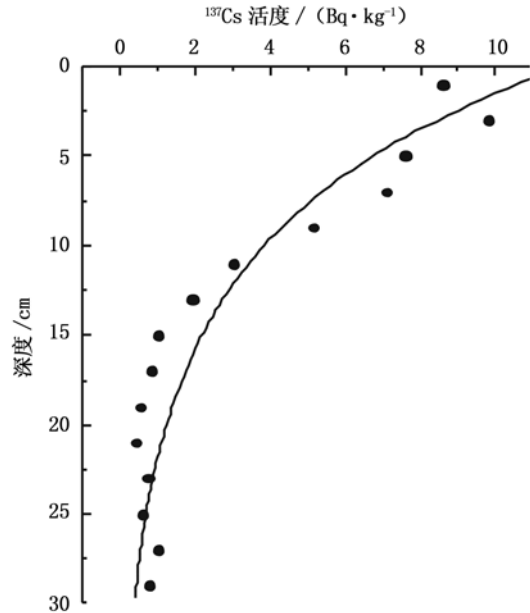


图1 粤北背景值区域¹³⁷Cs剖面分布与回归曲线

采用 Walling 等^[19]1990年提出的公式,按层样和全样分别计算土壤中¹³⁷Cs面积浓度(CPI)(¹³⁷Cs Point Inventory,也称为¹³⁷Cs总量,Bq·m⁻²)。

$$\text{层样: } CPI = \sum_{i=1}^n C_i \cdot Bd_i \cdot D_i \cdot 10^3 \quad (2)$$

$$\text{全样: } CPI = C_i \cdot W/S \quad (3)$$

式(2)(3)中:CPI为样点的¹³⁷Cs面积浓度(Bq·m⁻²); C_i 为 i 采样层¹³⁷Cs活度(Bq·kg⁻¹); Bd_i 为 i 采样层的土壤密度; D_i 为 i 采样层的深度(m); i 为采样层序号; n 为采样层数; W 为过筛后的细粒样品质量(kg); S 为取样器横截面积(m²)。

2.3 研究区¹³⁷Cs再分配形式

通过各个样点¹³⁷Cs面积浓度与背景值比较,用(4)式分析各样点¹³⁷Cs再分配特征^[23]:

$$CPR = \frac{CPI - CRI}{CRI} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中:CPR为样点¹³⁷Cs面积浓度的变化率;CPI为样点¹³⁷Cs面积浓度(Bq·m⁻²);CRI为区域¹³⁷Cs背景值(Bq·m⁻²)。CPR为负值表示¹³⁷Cs流失,正值表示¹³⁷Cs富集。

2.4 土壤侵蚀速率估算

2.4.1 非耕作土壤侵蚀速率估算 非耕作土壤

中 ^{137}Cs 的输入和输出满足物质平衡规律^[23]:

$$CPI = CRI + \sum_{i=1}^n D_i - \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

式中: CPI 为样点的 ^{137}Cs 面积浓度, CRI 为背景值, $\sum D_i$ 为 n 年间土壤沉积引起的 ^{137}Cs 输入, $\sum E_i$ 为土壤侵蚀引起的 ^{137}Cs 流失。

在土壤侵蚀严重的区域,暂时忽略土壤沉积引起的 ^{137}Cs 输入, $\sum D_i = 0$ 。土壤中 ^{137}Cs 损失量为土壤侵蚀引起的 ^{137}Cs 输出:

$$\Delta C = CRI - CPI = \sum_{i=1}^n E_i = \int_0^h Df(z) dz \quad (6)$$

将(1)式代入(6)式中并整理得到样点总侵蚀厚度的计算公式为:

$$h = -\frac{1}{b} \ln\left(1 - \frac{\Delta C \cdot b}{a \cdot D}\right) \quad (7)$$

则样点多年平均侵蚀速率为:

$$E_R = \frac{D \cdot h}{T} = -\frac{D}{b \cdot T} \ln\left(1 - \frac{\Delta C \cdot b}{a \cdot D}\right) \quad (8)$$

T 值为采样年与沉积峰值年份的差值,我国的研究中普遍将1963年看作 ^{137}Cs 沉积峰值的起始年,本文中采用 $T = 2005$ 年 - 1963年 = 42年。

2.4.2 耕作土侵蚀速率估算 比例模型是针对耕作土壤提出的侵蚀速度估算模型,假设 ^{137}Cs 在耕作层内均匀分布,土壤侵蚀量与 ^{137}Cs 损失量呈正比例关系。耕作活动造成土壤剖面中 ^{137}Cs 混合,趋于均匀分布于耕作层深度范围内。植物从土壤和水中吸收 ^{137}Cs 的量很少,作物收割对土壤中 ^{137}Cs 含量的影响可以忽略。表层耕作土侵蚀被翻耕起来的不含

^{137}Cs 的底土所补偿,因此土壤侵蚀造成 ^{137}Cs 总量减少,但分布深度不变^[11-12]。则耕作土壤侵蚀速率为:

$$E_R = 10\,000 \cdot \frac{D \cdot H \cdot CPR}{T} \quad (9)$$

式中: D 为土壤密度; H 为耕作层深度,根据对粤北农田采样点的调查,深度约为0.20 m; CPR 为采样点 ^{137}Cs 损失率(%), T 为采样年与沉积峰值年份的差值。

3 结果与分析

3.1 研究区背景值特征

根据公式(2)、(3)分别计算得出背景值采样点土壤中 ^{137}Cs 面积浓度的平均值,层样为 $(1\,403.26 \pm 142.29) \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$,全样为 $(1\,463.94 \pm 120.51) \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。考虑到误差因素,全样与层样的结果接近,因此此处土壤中 ^{137}Cs 面积浓度可以作为区域的 ^{137}Cs 背景值。粤北岩溶山区的背景值取二者的平均值 $(1\,433.60 \pm 131.40) \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

北半球 ^{137}Cs 背景值随纬度降低及距核试验中心的距离增大而逐渐降低^[12,24],平均值约为 $2\,500 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。我国 ^{137}Cs 背景值多在 $1\,000 \sim 3\,000 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间^[12,24-26],由于区域降水量的差异和 ^{137}Cs 沉降的不同决定了我国的 ^{137}Cs 背景值分布具有由北向南、由东向西逐渐降低的格局^[23]。从表1看出:粤北岩溶山区 ^{137}Cs 背景值远低于北半球平均值,但在我国南方 ^{137}Cs 背景值范围之内,大致满足随纬度降低而逐渐降低的趋势。

表1 我国南方部分地区 ^{137}Cs 背景值

地名	北纬(N)	土壤类型	降水量/mm	测定年份	^{137}Cs 背景值/($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)	资料来源
广东阳山	24.3°	石灰土	1 556.4	2005	$(1\,433.6 \pm 131.4)$	本文
台湾埔里	24.2°	-	2 000.0	2000	1 600.0	[26]
台湾鸳鸯湖	24.6°	-	4 000.0	2000	1 130.0	[26]
云南元谋	25.7°	变性土	613.8	2002	620.9	[27]
福建沙县	26.5°	-	-	1996	4 023.0	[28]
江西余江	28.2°	红壤	1 795.0	2005	1 298.0	[24]
浙江龙游	28.9°	水稻土	1 620.0	2005	1 068.0	[24]
四川南充	30.8°	紫色土	1 000.0	2002	2 035.8	[27]
湖北秭归	31.0°	紫色土	1 048.0	2002	2 377.2	[24]
重庆开县	31.2°	紫色土	1 200.0	2002	1 924.6	[27]
江苏吴县	31.3°	红黄土	1 050.0	2000	2 400.0	[26],[29]
江苏宜兴	31.4°	黄红壤	1 385.8	2001	2 200.0	[26],[30]

注:“-”表示文献中无该项资料。

3.2 研究区土壤¹³⁷Cs活度的分布特征

研究区非耕作土的¹³⁷Cs活度为(5.55 ± 0.54) ~ (17.48 ± 1.04) Bq · kg⁻¹, 变率很大, 平均活度为

(6.54 ± 0.57) Bq · kg⁻¹; 加之20多年来¹³⁷Cs的自然衰变, 粤北地区土壤中¹³⁷Cs含量要高于我国南方地区(25°N以南)的平均含量。

表2 粤北采样点¹³⁷Cs分布特征及土壤侵蚀速率

土地利用类型	采样地点	石漠化程度	地表状况	¹³⁷ Cs含量		¹³⁷ Cs变化率/%	总侵蚀厚度/cm	土壤侵蚀速率/(t · km ⁻² · a ⁻¹)
				平均活度/(Bq · kg ⁻¹)	面积浓度/(Bq · m ⁻²)			
非耕作土	岩背	轻度	自然草坡, 裸岩率 > 30%, 植被覆盖度 > 50%。	7.63 ± 0.60	731.34 ± 58.75	-48.99	5.54	1 418.0
		中度	自然草坡, 裸岩率 > 40%。	5.55 ± 0.54	526.95 ± 50.28	-63.24	6.55	1 831.7
		重度	裸岩率 > 60%, 植被覆盖度约 30% ~ 40%。	17.48 ± 1.04	1 737.4 ± 102.46	21.19	-	-
	东山	轻度	裸岩率 > 30%, 植被覆盖度 60%。	9.41 ± 0.68	779.68 ± 56.32	-45.61	5.04	1 320.0
		中度	裸岩率 > 50%, 植被覆盖度约 40% ~ 50%。	6.42 ± 0.59	525.57 ± 47.24	-63.34	7.37	1 835.3
		重度	植被覆盖度约 30% ~ 40%, 坡度 15° ~ 18°。	13.61 ± 0.88	1 181.64 ± 77.65	-17.58	-	-
耕作土	岩背	非石漠化	平坦农田, 位于峰林洼地内, 基岩出露率高; 作物为玉米、木薯、豆类等。	7.12 ± 0.93	688.09 ± 88.65	-52.00	10.40	2 997.4
	龙潭	非石漠化	坡耕地, 作物为玉米、木薯、辣椒等, 平均坡度 15°。	3.46 ± 0.36	260.80 ± 31.50	-81.81	16.36	4 968.3
平均				6.54 ± 0.57	595.0 ± 51.57	-43.92	8.54	

注: 耕作土侵蚀速率按比例模型计算, 非耕作土按物质平衡模型计算, “-”表示未计算该项; ¹³⁷Cs变化率负值表示¹³⁷Cs流失, 正值表示¹³⁷Cs富集。

就非耕作土样点而言, 因¹³⁷Cs被土壤中的粘粒和有机质强烈吸附难以置换, 化学运移量及生物运移量都很小, 土壤中¹³⁷Cs的含量主要随土壤颗粒的物理运动而发生改变^[32-33]。表3显示: 土壤中¹³⁷Cs活度与面积浓度均与土壤有机质含量的相关性非常高。在不同石漠化程度区域土壤中, ¹³⁷Cs水平的差异是土壤侵蚀差异的结果。与轻度石漠化地区相比, 中度石漠化地区土壤中的¹³⁷Cs含量降低, 而重度石漠化地区¹³⁷Cs含量又升高(图2)。

表2表明: 在石漠化发展初期, ¹³⁷Cs含量随着土壤侵蚀量的增大而逐渐降低; 高度石漠化阶段后, 岩石裸露率升高, 土被覆盖度逐渐降低, 可供侵蚀的土壤不足, 土壤侵蚀量逐渐减少, ¹³⁷Cs随着土壤颗粒运移至平坦低洼处沉积并逐渐富集。受¹³⁷Cs采样深度要求的限制, 采样点通常选在土壤厚度较大的坡脚或低洼处等易于接收沉积的部位, 因而测得的¹³⁷Cs水平反而高。重度石漠化样点土壤的有机质含量比其他样点高(表4), 也进一步证明采样点

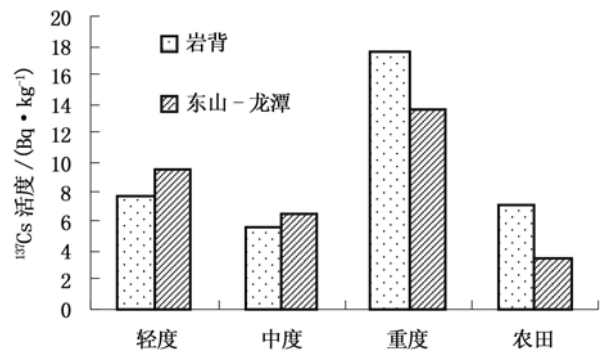


图2 粤北不同采样点¹³⁷Cs活度的变化

处于土壤沉积的环境, 有机质在此富集。

耕作土壤中的¹³⁷Cs在深度分布上较为均匀^[12], 加之土壤厚度稍大, 结构疏松, 极易被侵蚀, ¹³⁷Cs含量较低。表2表明: 土壤中¹³⁷Cs含量的降低速度与农田所在处的地形、地貌有关。坡耕地的¹³⁷Cs含量随土壤侵蚀的加剧而迅速降低, 因而土壤中¹³⁷Cs活度比位于沉积区洼地中的农田低。

表3 ^{137}Cs 含量与土壤理化性质的相关性

^{137}Cs 含量指标	坡度	土壤厚度	裸岩率	有机质	含水量	土壤密度
^{137}Cs 活度	0.152	-0.634	0.655	0.966**	-0.391	-0.776*
^{137}Cs 面积浓度	0.068	-0.583	0.599	0.965**	-0.282	-0.782*

注: * $P=0.05$; ** $P=0.01$

表4 不同利用类型土壤的理化性质

土地利用类型	采样地点	石漠化程度	坡度 /°	土壤厚度 /cm	裸岩率 /%	土壤密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有机质 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值	含水量 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
非耕作土	岩背	轻度	9.0	14.97	25.67	1.076	30.000	6.25	306.9
		中度	11.5	13.23	33.60	1.174	26.485	6.21	258.3
		重度	14.3	9.35	45.54	0.934	66.540	6.91	192.9
	东山	轻度	22.5	11.26	20.41	1.101	30.445	8.02	176.3
		中度	12.3	9.52	33.43	1.046	21.260	6.85	168.9
		重度	13.1	10.29	75.34	1.104	51.115	6.81	144.3
耕作土	岩背	非石漠化	3.0	20.69	21.38	1.210	19.505	6.44	247.1
	龙潭	非石漠化	16.4	21.42	21.67	1.275	17.620	6.78	202.6

3.3 石漠化地区土壤侵蚀速率

表2表明:石漠化区域土壤中 ^{137}Cs 面积浓度的变化与 ^{137}Cs 活度变化规律较为一致。粤北 ^{137}Cs 的变化率平均为-43.92%,仅岩背乡重度样点表现为 ^{137}Cs 沉积,其余各个样点均显示 ^{137}Cs 流失严重。东山乡重度石漠化样点的 ^{137}Cs 面积浓度高于轻度与中度样点,该点的土壤运移是侵蚀和沉积活动共同作用的结果,无法表征土壤侵蚀快慢,因此本文未计算这两处重度样点的土壤侵蚀或沉积速率。

非耕作土壤侵蚀速率为 $1\ 320.0 \sim 1\ 835.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均侵蚀速率约为 $1\ 601.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;1963年以来,土壤总侵蚀厚度达 $5.04 \sim 7.37 \text{ cm}$,年均侵蚀厚度 0.20 cm 。按国家土壤侵蚀分级标准来看,仅属于轻度侵蚀范围,但对于土壤资源非常缺乏的喀斯特地区来说,土壤绝对侵蚀量普遍较低,这一侵蚀速率已属严重。

耕作区土壤厚度较大,土壤侵蚀来源充足,加之人为活动扰动土层,耕作土壤侵蚀速率均高于石漠化区域非耕作土壤侵蚀速率。本区域峰丛洼地内农田侵蚀模数为 $2\ 997.4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,1963年以来的土壤总侵蚀厚度 10.40 cm ,而坡耕地的侵蚀模数高达 $4\ 968.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,是非耕作土壤侵蚀速率的 $1.8 \sim 3.5$ 倍,土壤总侵蚀厚度 16.36 cm ,土壤流失严重。坡度是耕作区土壤侵蚀速率增大的主要因素之一。

喀斯特地区因成土速度慢、土壤厚度小,土壤允许流失量低,允许土壤侵蚀量在 $46 \sim 68 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[34-37],粤北石漠化地区土壤流失量已远超

过最高允许侵蚀量,土壤生产力下降严重,成为制约当地经济发展、生态环境改善的主要因素。

4 结论与讨论

(1) 本项研究测得的粤北岩溶山区 ^{137}Cs 背景值为 $1\ 433.6 \pm 131.4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$,低于北半球的平均值,是由于所处的纬度位置较低、距离核试验中心区域位置较远的缘故。该结果与我国南方各地的 ^{137}Cs 背景值比较接近,在我国南方 ^{137}Cs 背景值变化范围之内,表明其能代表粤北岩溶山区的 ^{137}Cs 背景值。

(2) 研究区范围内土壤中 ^{137}Cs 活度的平均值为 $6.54 \pm 0.57 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$,受土壤侵蚀与沉积活动的影响,不同地区 ^{137}Cs 含量差异很大。与黄土区等其它区域不同,石漠化地区受土壤分布条件限制,土壤中 ^{137}Cs 的活度分布不具有“侵蚀越剧烈,活度越低”的趋势。在石漠化发展初期,随着土壤侵蚀加重, ^{137}Cs 活度降低。当石漠化发展的高级阶段,由于基岩裸露度过高,重度石漠化地区土壤集中吸附了裸露基岩区域沉降的 ^{137}Cs ,导致其 ^{137}Cs 含量过高,超过了轻度与中度石漠化地区土壤。

(3) 东山乡与岩背乡两地的非耕作土壤样点比较结果显示,土壤侵蚀速率估算结果较为接近,轻度石漠化地区土壤平均侵蚀速率约 $1\ 369.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,中度石漠化地区侵蚀速率增大,平均约 $1\ 833.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。随着石漠化程度加重,植被覆盖度降低,在土被覆盖度较高的情况下,土壤侵蚀加剧。在石漠化发展后期,土壤流失严重,基岩普遍

裸露,土壤侵蚀源减少,土壤侵蚀量降低甚至在某些负地形小区域表现为沉积。根据野外样方调查资料,粤北岩溶山区土壤平均厚度约 11.8 ~ 38.6 cm,土壤资源缺乏。本研究测得的研究区土壤总侵蚀厚度在 5.04 ~ 16.36 cm 之间,平均 8.54 cm,年均侵蚀厚度 0.20 cm。由于喀斯特地区成土速度极其缓慢,因此持续的土壤侵蚀是石漠化地区面临的最严重的环境问题。

(4)耕作区由于人类长期耕作活动的影响,土壤厚度普遍较大,侵蚀源充足,土壤侵蚀速率远高于非耕作区,达 $2\ 997.4\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,坡耕地侵蚀速率更高达 $4\ 968.3\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,坡度对土壤侵蚀的影响非常明显。在喀斯特地区,有较高的土被覆盖度和较低的植被覆盖率的区域土壤侵蚀威胁大,而人为扰动是加速土壤侵蚀的主要驱动力。粤北岩溶山区处于亚热带湿润气候区,在土壤资源充足的前提下,植被在适宜的水热条件下易于恢复,因此保护土壤应是石漠化治理的首要步骤,尤其要控制坡耕地的面积。

喀斯特地区土壤分布不均匀,很难找到土壤连续分布的坡地。本研究所选的坡地都是非均质坡地,土壤面积、土壤厚度、基岩裸露率差异较大。因此,本研究虽然揭示了该地区的土壤侵蚀特征,但地表组成的异质性一定程度上影响了土壤侵蚀速率估算结果的精确性。

¹³⁷Cs法是较好的土壤侵蚀研究方法,应用领域比较广泛,但应用于石漠化地区时,应注意:(1)喀斯特地区地表异质性强,土壤分布不连续,采样点应选择土壤厚度较大、地面较为平坦的地点,避免选在可能出现沉积的负地形内;(2)由于石漠化地区普遍存在着土壤对¹³⁷Cs的集中吸附现象,测得的土壤侵蚀速率数据可能略有偏高;(3)重度石漠化地区,过高的基岩裸露率会导致其周围土壤中¹³⁷Cs含量过高,影响土壤侵蚀速率的估算。

参考文献:

[1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105
 [2] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 关于喀斯特石漠化和石漠化概念的讨论[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 689-695
 [3] 周德全, 王世杰, 张殿发. 关于喀斯特石漠化研究问题的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 127-132
 [4] 李林立, 况明生. 我国西南岩溶地区土地石漠化及对策[J]. 国土开发与整治, 2002, 12(9): 61-64
 [5] 李阳兵, 王世杰, 王济. 岩溶生态系统的土壤特性及其今后研

究方向[J]. 中国岩溶, 2006, 25(4): 285-289
 [6] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 185-189
 [7] 涂成龙, 何腾兵, 林昌虎, 等. 贵州西部喀斯特石漠化地区草地土壤有机质和氮素变异特征初步研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 50-53
 [8] 李元寿, 王根绪, 王军德, 等. ¹³⁷Cs示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 114-121
 [9] 张明礼, 杨浩, 高明, 等. 利用¹³⁷Cs示踪技术研究滇池流域土壤侵蚀[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1017-1025
 [10] 吴永红, 张虎林, 寇权, 等. 基于GIS与¹³⁷Cs技术的土壤侵蚀微观研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 40-42
 [11] 张信宝, D L 赫吉特, D E 沃林. ¹³⁷Cs法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究[J]. 地球化学, 1991(3): 212-218
 [12] 严平, 董光荣, 张信宝, 等. 青海共和盆地土壤风蚀的¹³⁷Cs法研究II——¹³⁷Cs背景值与风蚀速率测定[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 391-397
 [13] 阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(4): 499-506
 [14] 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
 [15] Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout caesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1990, (19): 215-233
 [16] Walling D E, Quine T A. Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation [M]// Handbook for the Application of the Caesium-137 Technique [M]. Department of Geography, University of Exeter, Exeter, 1993: 15-34
 [17] Yang H, Chang Q, Du M Y, et al. Quantitative model of soil erosion rates using ¹³⁷Cs for uncultivated soil [J]. Soil Science, 1998, 163(3): 248-256
 [18] Mitchell J K, Bubenzer G D, McHenry J R, et al. Soil loss estimation from fallout caesium-137 measurements [M]// Debit M, Garbles. Assessment of Erosion. Chichester (UK): John Wiley & Sons, 1980: 393-401
 [19] Walling D E, Quine H. Improved models for estimating soil erosion rates from caesium-137 measurements [J]. Journal of Environment Quality, 1999, 28(2): 611-622
 [20] Zhang X B, Quine T A, Walling D E. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shaanxi Province, China: An investigation using ¹³⁷Cs and rill measurements [J]. Hydro Processes, 1998, 12: 171-189
 [21] 张素红, 李森, 王金华, 等. 近30年来粤北岩溶山区石漠化土地景观动态分析[J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 761-767
 [22] Chappell A. Modeling the spatial variation of processes in redistribution of soil: digital models and ¹³⁷Cs in the southwest Niger [J]. Geomorphology, 1996, 17: 249-261
 [23] 严平. ¹³⁷Cs法在土壤风蚀研究中的应用[D]. 兰州: 中国科学院, 1999: 27-30

- [24] Tang X Y, Yang H, Du MY, *et al.* Identification of ^{137}Cs reference sites in Southeastern China [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 468 - 476
- [25] Yan P, Dong Z B, Dong G R, *et al.* Preliminary results of using ^{137}Cs to study wind erosion in the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Journal of arid environments*, 2001, 47: 443 - 452
- [26] 齐永青, 张信宝, 贺秀斌, 等. 中国 ^{137}Cs 本底值区域分布研究[J]. *核技术*, 2006, 29(1): 42 - 50
- [27] 王玉宽, 文安邦, 张信宝. 长江上游重点水土流失区坡耕地土壤侵蚀的 ^{137}Cs 法研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 77 - 80
- [28] 濮励杰, 包浩生, Higgitt D L. 土地退化方法应用初步研究 - 以闽西沙县东溪流域为例[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 55 - 61
- [29] 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初步估算[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 13 - 15
- [30] 张 燕, 张 洪, 彭补拙, 等. 不同土地利用方式下农地土壤侵蚀与养分流失[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 23 - 27, 31
- [31] 朱永懿, 杨俊诚, 陈景坚. 中国对 ^{137}Cs 在农业环境中行为的研究进展[J]. *中国核科技报告*, 1997(00): 1 - 7
- [32] 齐孟文, 王 琳. 土壤侵蚀 ^{137}Cs 测定的示踪法原理及常用模型[J]. *中国水土保持*, 2004(7): 16 - 17
- [33] 严 平, 高尚玉, 董光荣. 土壤颗粒组成影响 ^{137}Cs 含量的初步实验结果[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 150 - 153
- [34] 韦启璠. 我国南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径[J]. *水土保持研究*, 1996, 24(2): 42 - 47
- [35] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀[J]. *山地研究*, 1989, 7(4): 255 - 259
- [36] 陈廉杰. 森林土壤允许流失量的研究[J]. *水土保持学报*, 1993, 7(1): 18 - 22
- [37] 陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特征的分析研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 13(4): 31 - 36