

# 岩溶峰丛洼地不同环境水土流失差异及防治研究 ——以广西果化岩溶生态研究基地为例

罗为群<sup>1,2)</sup>, 张辉旭<sup>3)</sup>, 蒋忠诚<sup>1,2)\*</sup>, 金克谟<sup>3)</sup>, 李衍青<sup>1,2)</sup>, 王志广<sup>1)</sup>

1)中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;

2)国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西桂林 541004; 3)中国地质科学院, 北京 100037

**摘要:** 与碎屑岩地区相比, 特殊的岩溶水文地质结构, 导致岩溶区存在不同的水土流失过程和特点, 尤以峰丛洼地地区最具代表性。通过广西平果县果化岩溶峰丛洼地土壤地表侵蚀和地下漏失的调查研究显示: 洼地不同地貌部位水土流失差异较大, 从山峰、垭口、山坡、山麓到洼地底部, 土壤地下漏失模数分别为 49.09 t/(km<sup>2</sup>·a)、212.06 t/(km<sup>2</sup>·a)、727.71 t/(km<sup>2</sup>·a)、1104.03 t/(km<sup>2</sup>·a)、909.11 t/(km<sup>2</sup>·a), 分别占该点年均总土壤侵蚀模数的 92.43%、96.24%、78.57%、70.88%和 38.68%; 不同土地利用方式下的土壤侵蚀存在差异, 其土壤侵蚀模数大小依次为坡耕地>苦丁茶地>苏木林地>灌草坡>牧草地。通过对该地区水土流失防治及石漠化综合治理, 山峰主要涵养水源林、山坡主要发展生态产业防治水土漏失、洼地修建排水系统工程得到良好的效果, 治理区土壤侵蚀模数从 2003 年到 2010 年下降了 65%。

**关键词:** 水土流失; 土壤漏失; 岩溶峰丛洼地; 土地利用; 岩溶生态; 广西

**中图分类号:** P931.5; X143 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2014.04.09

## The Difference in Soil Erosion in Different Environments of Karst Peak-cluster Depression and the Study of Soil Erosion Prevention: A Case Study of Guohua Karst Ecological Experimental Site, Guangxi

LUO Wei-qun<sup>1,2)</sup>, ZHANG Hui-xu<sup>3)</sup>, JIANG Zhong-cheng<sup>1,2)\*</sup>,  
JIN Ke-mo<sup>3)</sup>, LI Yan-qing<sup>1,2)</sup>, WANG Zhi-guang<sup>1)</sup>

1) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;

2) Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of Land and Resources, Guilin, Guangxi 541004;

3) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

**Abstract:** In the special karst ground water system, there exist different processes and features of water and soil loss in karst mountains. Especially in karst peak cluster depression, much more water and soil are lost from the leakage of karst fissures than from the surface flow. Some monitoring stations of water and soil loss were built in Guohua karst ecological experimental site, Pingguo County, Guangxi, with the purpose of investigating the difference between the surface soil erosion and the soil leakage in different environments of the karst peak-cluster depression. The monitoring results reveal the most remarkable differences in different geomorphologic positions. From peak, paddle, hill slope, hill foot to the bottom of depression, the mean annual soil leakage loss moduli are 49.09 t/(km<sup>2</sup>·a), 212.06 t/(km<sup>2</sup>·a), 727.71 t/(km<sup>2</sup>·a), 1104.03 t/(km<sup>2</sup>·a) and 909.11 t/(km<sup>2</sup>·a) respectively, which possess 92.43%, 96.24%, 78.57%, 70.88% and 38.68% of the total mean soil loss moduli in the points

本文由国家科技支撑计划课题(编号: 2011BAC09B02)、国土资源部公益性行业专项(编号: 201211086-01-02)、水利部公益性行业专项(编号: 201101019)和广西科技开发项目(编号: 桂科攻 1140002-3-1)联合资助。

收稿日期: 2013-06-11; 改回日期: 2014-04-24。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 罗为群, 男, 1980年生。助理研究员, 博士研究生。从事岩溶生态与石漠化治理研究。通讯地址: 541004, 广西桂林市七星路 50 号。电话: 0773-5810558。E-mail: oyrllwq@karst.ac.cn。

\*通讯作者: 蒋忠诚, 男, 1962年生。研究员, 博士生导师。长期从事岩溶研究。通讯地址: 541004, 广西桂林市七星路 50 号。电话: 0773-5837342。E-mail: zhjiang@karst.ac.cn。

respectively. There are five kinds of main land uses in the karst peak-cluster depression, i.e., slope farmland, young secondary forest, kuding tea garden, grass land, and brush and grass land. In the slope farmland, there is not only the biggest soil erosion modulus but also a annual increase tendency. The soil erosion modulus has an annual decrease tendency in the other four lands, and the lowest value is in the grass land. Therefore, the prevention of soil erosion should be based on different measures in different geomorphologic positions of the peak cluster depression. In the peak, the water source forest should be mainly developed. In the hill slope, the attention should be paid to the eco-production and the decrease of the soil leakage. And in the depression, the water drainage system should be the key engineering. With the harnessing of rocky desertification and the rehabilitation of the ecology in Guohua karst ecological experimental site, the mean water and soil loss modulus of the karst peak cluster depression decreased by about 65% from 2003 to 2010.

**Key words:** water and soil loss; soil leakage; karst peak-cluster depression; land use; karst ecological; Guangxi

近年来,许多学者对岩溶区水土流失过程及特征进行了一些研究,发现与非岩溶区存在较大的不同(蒋忠诚等,2008)。由于岩溶区表层带溶蚀孔隙、裂隙、管道等发育,土壤地下漏失现象普遍存在(张信宝等,2007;唐益群等,2008;罗为群等,2008),其中以岩溶峰丛洼地土壤地下漏失最为严重(曹建华等,2008),这在一定程度上限制了传统土壤侵蚀研究方法在岩溶区域的应用。本文以广西平果县果化岩溶生态研究基地为例,通过定期监测土壤动态变化及地表侵蚀和地下漏失量,分析揭示岩溶峰丛洼地不同地貌部位和不同土地利用方式下的水土流失差异;并以此为基础,探索岩溶区石漠化及水土流失综合防治对策和措施,为我国西南石漠化综合治理提供科学依据和技术途径。

研究区位于广西平果县果化镇龙何屯,介于北纬 $23^{\circ}22'30''$ — $23^{\circ}24'32''$ 、东经 $107^{\circ}22'30''$ — $107^{\circ}24'47''$ 之间(图1),为典型的岩溶峰丛洼地,地层主要为石炭系上统,岩石主要为纯石灰岩。区内峰丛山体岩溶发育强烈,地表、近地表的溶沟、溶槽、溶孔、溶穴、溶痕及石芽等发育,厚度大多3~5 m,局部6.5~9.0 m,构成表层岩溶带,成为水循环的重要调蓄带(蒋忠诚等,1999)。洼地有较多落水洞、竖井、天窗、岩溶裂隙,是降雨坡面产流的主要排水点。

治理以前,区域内森林被严重破坏,石漠化及水土流失严重,旱涝灾害频繁,森林覆盖率小于1%,植被结构简单,以次生灌草为主,土地利用类型主要为耕地和灌草坡。2001年以来,在研究区实施了“十五”国家科技攻关课题“岩溶峰丛洼地生态重建技术与示范”和“十一五”国家科技支撑计划课题“喀斯特峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究”等项目,建立了平果石漠化综合治理示范区和岩溶生态研究基地,面积约 $10\text{ km}^2$ (蒋忠诚等,2009),土地利用结构不断改善。本研究主要在研究基地核心区龙何上峰丛洼地开展(图1)。

## 1 研究方法

### 1.1 野外调查监测方法

根据龙何上峰丛洼地系统地形地貌、土地利用情况、土壤分布、水文地质条件、岩溶发育强度等野外调查资料,将龙何上峰丛洼地系统划分成32个土地单元,在每个土地单元内选择代表性的样方,洼地按 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 、缓坡地按 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 、陡坡地按 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ,测量坡度、土层厚度、土被覆盖率、植被覆盖度、表层带裂隙度、裸岩率等主要参数。通过6次重复测量,取平均值。

根据研究区土壤分布的特点,采用埋桩法、划痕迹法,坡面径流泥沙分析法和沉沙池法监测土壤侵蚀(龙俐等,2005;张洪江等,2000)。

2006年4月,在每个土地单元的代表性样方内埋设木桩6个,并采用油漆在岩土交接处划痕迹30处,共约200个木桩监测点和930个划痕监测点,以后每年4月进行回收测量,估算每1年度不同地貌部位、不同土地利用方式的年平均土壤侵蚀厚度,监测结果取多年(2006—2010年)平均值见表1。再根据土壤容重、土被覆盖率计算出埋桩与划痕法土壤侵蚀模数。

同时,选择2个自然汇水坡面径流场和2个小流域水土流失观测站,采用坡面径流泥沙分析法和沉沙池法相结合的方法(李智广等,2005),估算不同地貌部位和不同土地利用方式由地表径流产生的土壤侵蚀模数(张信宝等,2006),输移比取0.75(文安邦等,2003;彭建等,2001)。我们将划痕法土壤侵蚀模数作为坡面土壤总侵蚀模数,径流法土壤侵蚀模数作为地表土壤侵蚀模数,两者差值即为地下土壤侵蚀模数。

依据自然分水岭,建立石漠化综合治理区和石漠化未治理区2个小流域水土流失监测站,分坡耕地、退耕苏木林地、退耕牧草地、退耕苦丁茶地、灌草坡5个土地利用类型区建成5个水土流失径流

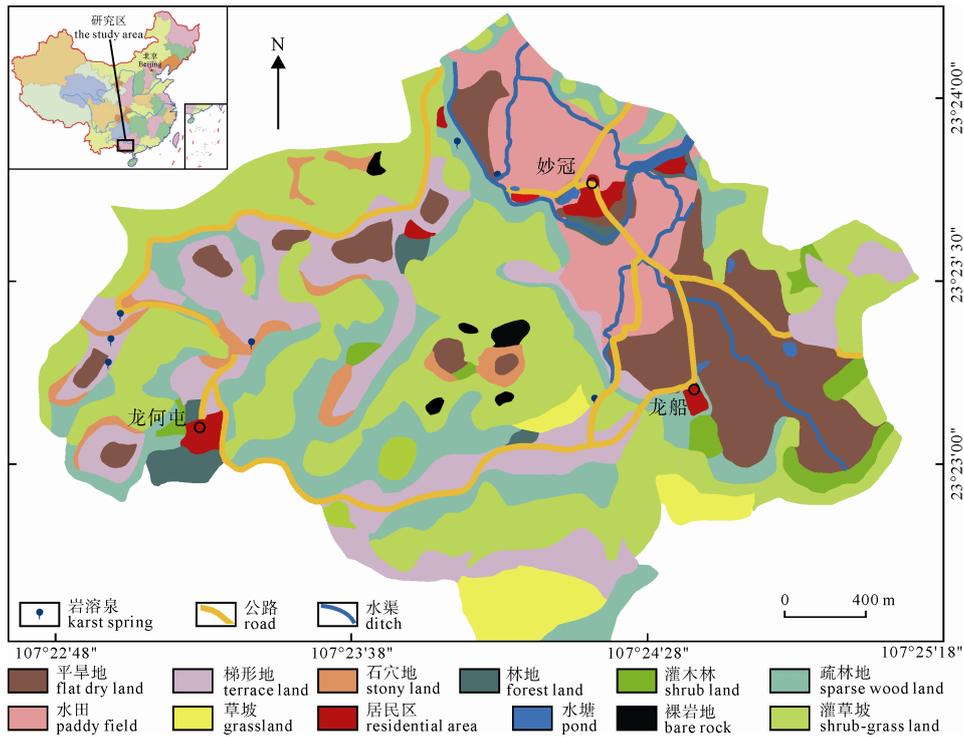


图 1 果化岩溶生态研究基地土地利用类型和位置分布  
Fig. 1 Distribution of land types and location of the Guohua karst ecological experimental site

小区监测站。从 2008 年开始, 动态监测石漠化治理后不同土地利用方式的地表水土流失强度。

### 1.2 土壤样品采集

岩溶区土壤异质性分布引起  $^{137}\text{Cs}$  沉降分布的异质性, 因此, 土样采集采取混合样法 (Brown, 1981; Collins, 2001), 每层样品 3 个样点混合。2010 年 11 月, 沿着坡面从峰坡到洼地底布设采样剖面带, 沿坡面每隔一定距离, 采集土壤剖面分层样。2011 年 8 月补充采集不同土地利用方式土壤剖面分层样。岩溶石山区坡地土壤异质性强, 而且土层较薄, 土壤剖面分层样采集往往找不到标准的取样土块。在采集土壤剖面分层样时根据实际情况, 用卷尺量取 30 cm × 10 cm、20 cm × 20 cm、10 cm × 10 cm 的样块, 然后用刮刀刮取土壤剖面分层样 (Felipe, 2003; 冯腾, 2011)。表层采集 0~2 cm 厚度, 以下各层依次按 5 cm 分层厚度采样, 坡面土壤采样深度直到基岩面, 土壤层较厚的洼地底的采样深度为 120 cm。采用环刀取样测定土壤容重。每个地貌部位或土地类型采集 3~5 个代表点, 每层土壤样混匀, 除大颗粒砾石, 用四分法取 1 kg 左右土样带回, 用作  $^{137}\text{Cs}$  测试分析, 共采集土样 210 个。研究区  $^{137}\text{Cs}$  本底值样品采自龙何屯村后植被保护较好的山腰一块较为平坦的灌草地 (Lowrance, 1988; Collins, 2001; 郑永春, 2002)。据访问, 该处 40 多年未受到扰动, 采样深度直到岩面, 土壤平均厚度为 25 cm。

### 1.3 同位素分析方法

野外采集的土壤样品, 经风干、研磨、过筛和称量后封装待用。 $^{137}\text{Cs}$  样品送核工业北京地质研究院分析测试研究中心, 用 ORREC GMX50 型高纯锗  $\gamma$  能谱仪测定  $^{137}\text{Cs}$  比活度, 每次测量时间 50000 s, 样品重量约 500 g, 测试误差  $\pm 5\%$ 。土样经测试得到样品的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度, 采用以下公式计算出土壤剖面  $^{137}\text{Cs}$  的面积活度 (张笑楠, 2009; 冯腾, 2011):

$$\text{CPI} = \sum_{i=1}^n C_i \times B d_i \times D_i$$

式中, CPI 表示样点的  $^{137}\text{Cs}$  面积活度 ( $\text{mBq}/\text{cm}^2$ ),  $i$  为采样层序号,  $n$  为采样层数,  $C_i$  为采样层的  $^{137}\text{Cs}$  质量活度 ( $\text{mBq}/\text{g}$ ),  $B d_i$  为  $i$  采样层的土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $D_i$  为  $i$  采样层的深度 ( $\text{cm}$ )。

## 2 不同环境土壤侵蚀差异

### 2.1 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤侵蚀差异

由表 1 可知, 从峰坡到坡麓部位, 灌草坡平均土壤侵蚀厚度分别为 0.47 cm/a、0.65 cm/a、0.46 cm/a、0.53 cm/a, 土壤抗侵蚀年限由小于 10 年增加到 30~40 年, 土壤总侵蚀模数分别为 53.11  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、220.35  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、494.38  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、1048.08  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 其中地表土壤侵蚀分别占 7.56%、3.76%、24.28%、23.80%, 地下土壤侵蚀分别占 92.44%、96.24%、75.72%、76.20%。地下侵蚀的相对贡献率和平均土壤侵蚀厚度以陡坡最高,

缓坡部位最小,总体上沿坡面向下逐渐减少,地下侵蚀相对贡献率与土壤侵蚀厚度正相关。

耕地主要分布在缓坡、坡麓和洼地底部,自缓坡到洼地底部,耕地平均土壤侵蚀厚度分别为 0.94 cm/a、0.76 cm/a、0.32 cm/a,土壤抗侵蚀年限由 10~15 年增加到大于 100 年,土壤总侵蚀模数分别为 1327.75 t/(km<sup>2</sup>·a)、2149.83 t/(km<sup>2</sup>·a)、2350.40 t/(km<sup>2</sup>·a),其中地表土壤侵蚀分别占 18.58%、34.44%、61.32%,地下土壤侵蚀分别占 81.42%、65.56%、38.68%。土壤侵蚀均以地下侵蚀为主,但平均土壤侵蚀厚度、地下侵蚀相对贡献率逐渐减少,地下土壤侵蚀相对贡献率与土壤侵蚀厚度正相关,土壤总侵蚀模数和地表土壤侵蚀模数逐渐增加。

缓坡部位,耕地与灌草坡比较,土壤总侵蚀模数、土壤侵蚀厚度和地下侵蚀相对贡献率均显著增加,说明人为活动加剧了土壤侵蚀,尤其加剧了缓坡部土壤的地下侵蚀。坡麓部位,耕地与灌草坡比较,地表、地下土壤侵蚀均增加,尤以地表土壤侵蚀增加最快,地表侵蚀相对贡献率相比高出 10.64%,人为耕种对坡麓部位地表侵蚀的影响大于地下侵蚀。洼地底部几乎全部开垦成耕地,洼地土壤侵蚀厚度最小,局部有泥沙沉积,而土壤侵蚀模数最高,与洼地土被覆盖率相对偏高有关,且以地表侵蚀为主。

## 2.2 岩溶峰丛洼地不同土地利用方式的土壤侵蚀特征

从 2008 年开始,选择 5 个石漠化治理类型区建立水土流失径流小区监测站,包括自然恢复灌草坡、人工牧草地、坡耕地、苦丁茶地、苏木林地,

动态监测不同石漠化治理类型区地表土壤侵蚀模数。2003 年以前,各土地类型区石漠化严重,除灌草坡退耕几年外,其他各类型区均为坡耕地。从 2003 年开始实施了退耕还林还草等治理措施,2008 年为石漠化治理后第 4 年,监测结果见表 2、图 2。由表 2 可知,2008—2012 年的平均土壤侵蚀模数为坡耕地>苦丁茶地>苏木林地>灌草坡>牧草地。

从不同土地类型区历年的土壤侵蚀比较看(图 2),坡耕地土壤侵蚀模数始终保持较高,有逐年增加的趋势,而其他各类型区土壤侵蚀模数逐年减少。不同土地类型区土壤侵蚀差异较大,2008 年的土壤侵蚀模数为苏木林地>苦丁茶地>灌草坡>坡耕地>牧草地,苏木林地、苦丁茶地和灌草坡土壤侵蚀均较高,只有牧草地土壤侵蚀小于坡耕地;2009 年的土壤侵蚀模数大小为坡耕地>苦丁茶地>灌草坡>苏木林地>牧草地,苏木林地、苦丁茶地和灌草坡土壤侵蚀小于坡耕地,但仍较高;2010 年的土壤侵蚀模数大小为坡耕地>苦丁茶地>苏木林地>牧草地>灌草坡,苦丁茶地和坡耕地土壤侵蚀模数较高,而牧草地、苏木林地和灌草坡的土壤侵蚀模数差异减少,均减少到 10 t/(km<sup>2</sup>·a)左右;2011、2012 年的土壤侵蚀模数大小均为坡耕地>苦丁茶地>苏木林地>灌草坡>牧草地,坡耕地土壤侵蚀最强,牧草地土壤侵蚀最小。

综合以上分析表明,不同石漠化治理模式对于治理石漠化防治水土流失均有较好的效果,但防治效果差异较大,牧草地水土保持效果最好,可作为石漠化治理保持水土优先考虑的治理措施,其次是

表 1 不同地貌部位土壤侵蚀特点

Table 1 Soil erosion moduli in different geomorphologic positions

地貌部位	土地类型	平均土壤侵蚀厚度/cm	土壤总侵蚀模数/t/(km <sup>2</sup> ·a)	地表土壤侵蚀模数/(t/(km <sup>2</sup> ·a))	地下土壤侵蚀模数/(t/(km <sup>2</sup> ·a))	地表侵蚀占土壤总侵蚀比例/%	地下侵蚀占土壤总侵蚀比例/%
峰坡	灌草坡	0.47	53.11	4.02	49.09	7.56	92.44
陡坡	灌草坡	0.65	220.35	8.29	212.06	3.76	96.24
缓坡	灌草坡	0.46	494.38	120.06	374.32	24.28	75.72
	耕地	0.94	1327.75	246.66	1081.09	18.58	81.42
坡麓	灌草坡	0.53	1048.08	249.46	798.62	23.80	76.20
	耕地	0.76	2149.83	740.39	1409.44	34.44	65.56
洼地	耕地	0.32	2350.40	1441.29	909.11	61.32	38.68

注:土壤容重取 1.13 g/cm<sup>3</sup>。

表 2 五种石漠化治理类型区情况及平均土壤侵蚀模数对比(2008—2012 年)

Table 2 Comparison of conditions and mean surface soil erosion moduli in five types of land use areas (from 2008 to 2012)

编号	土地利用类型	地形坡度/°	径流区面积/m <sup>2</sup>	土被覆盖率/%	平均土壤侵蚀模数/(t/(km <sup>2</sup> ·a))
S1	灌草坡	28	175.23	33.6	22.63
S2	牧草地	26	236.90	36.7	15.20
S3	坡耕地	23	260.30	17.99	48.18
S4	苦丁茶地	10	10.61	39.23	39.86
S5	苏木林地	18	106.54	32.82	36.60

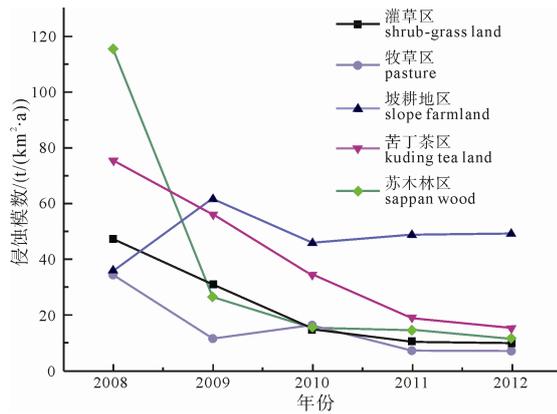


图 2 不同土地类型区历年土壤侵蚀模数  
Fig. 2 Soil erosion moduli in different land use areas from 2008 to 2012

自然恢复的灌草坡, 再次是苏木林区, 苦丁茶区效果最差。主要是因为苦丁茶未成林, 茶行间仍被耕种为玉米地, 另一方面也可能因为径流区的面积较小, 影响监测数据的准确性。苏木林区水土保持效果较灌草坡差, 表明单纯的退耕还林, 在树木未成林以前, 水土流失仍较严重, 需要在林下配套灌草等措施, 待树木成林后, 才能达到保持水土的效果。因此, 为了有效防治水土流失和石漠化, 在退耕还林后一定时期内, 至少 7 年以上的时间内, 配套种植牧草, 可以起到更好的效果, 而单独的退耕还林措施短期内防治水土流失的效果较差。

从不同石漠化治理模式下石漠化程度演变来看(表 3), 土壤侵蚀强度与石漠化程度演变正相关。灌草坡、牧草地、苦丁茶地和苏木林地随着土壤侵蚀模数逐年减少, 石漠化程度也逐年减弱, 而重度石漠化区土壤侵蚀模数始终保持较高, 有逐年增加的趋势。从不同等级石漠化区土壤侵蚀强度来看, 总体上表现出中度区>重度区>轻度区>潜在区>非石漠化区; 中度以下石漠化区, 水土流失强度随石漠化程度增加而增加; 当水土流失导致石漠化发展到重度以上石漠化阶段时, 地表主要为裸露岩石覆盖, 可流失的土壤面积较少, 土壤侵蚀模数开始下降, 小于中度石漠化区, 但是仍然高于轻度以下石漠化区, 且随着石漠化程度的加剧总体上呈增加趋势; 水土流失与石漠化互为促进关系, 但是在中度

石漠化和重度石漠化之间存在一个拐点。同一石漠化等级土壤侵蚀强度的差异主要与人类活动的强度、治理恢复时间和恢复植被种类有关。采用林草措施在石漠化治理的第 4 年以后, 可由中度石漠化区演变成轻度石漠化区, 灌草坡自然封育恢复 10 多年后由中度石漠化区演变为潜在石漠化区, 采用人工种植牧草在水肥管理较好的条件下 8 年后可由中度石漠化区演变为潜在石漠化区, 但牧草种植需加大投入解决水肥问题。

由表 4 可知, 5 种土地利用类型的  $^{137}\text{Cs}$  面积活度介于  $1.87\sim 43.96 \text{ mBq/cm}^2$  之间, 与本底值相比流失比介于  $68.23\%\sim 98.68\%$  之间, 流失比非常大, 表明自 1963 年以来研究区发生了强烈的水土流失 (Yang et al., 1998), 这与研究区治理以前水土流失严重并导致的严重石漠化景观相符。除灌草坡外, 其他 4 种土地类型 2003 年以前均为耕地, 且石漠化严重, 2003 年开始实施退耕还林和自然修复措施, 土地利用方式发生变化, 导致不同土地类型水土流失的较大差异。 $^{137}\text{Cs}$  面积活度大小为牧草地>苏木林地>苦丁茶地>灌草坡>坡耕地, 面积活度流失比大小为坡耕地>灌草坡>苦丁茶地>苏木林地>牧草地, 除灌草坡外, 其他 4 类土地  $^{137}\text{Cs}$  面积活度流失比与径流小区监测的平均地表土壤侵蚀模数正相关。各地类  $^{137}\text{Cs}$  面积活度流失比均较大, 表明自 1963 年以来发生了强烈的水土流失。灌草坡  $^{137}\text{Cs}$  面积活度流失比偏大, 一方面由于灌草坡坡度最大, 治理以前发生了相对更强烈的水土流失, 另一方面由于  $^{137}\text{Cs}$  主要集中在非农耕地表层, 相同的土壤流失较耕地导致更多的  $^{137}\text{Cs}$  流失, 因此治理以后尽管地表水土流失强度较苦丁茶地和苏木林地小, 但其  $^{137}\text{Cs}$  面积活度流失比仍然大于苦丁茶地和苏木林地。 $^{137}\text{Cs}$  面积活度流失比反应了土壤流失的强度, 结果同样表明, 坡耕地土壤流失最强, 流失比已经达到了 98.68%, 几乎全部流失; 牧草地水土保持效果最好, 其次是自然恢复的灌草坡, 再次是苏木林地, 苦丁茶地效果最差。

由图 3 可知, 典型土壤剖面  $^{137}\text{Cs}$  的分布深度达到岩土界面, 且岩土界面比活度较高, 说明土壤剖面

表 3 不同石漠化治理类型区石漠化等级演变(2008—2012 年)

Table 3 Rocky desertification grade variation in different rocky desertification harnessing areas from 2008 to 2012

年份	石漠化治理类型区				
	灌草区	牧草区	苦丁茶区	苏木林区	坡耕地区
2008 年	中度	轻度	中度	中度	重度
2009 年	轻度	轻度	中度	中度	重度
2010 年	轻度	轻度	中度	轻度	重度
2011 年	轻度	轻度	轻度	轻度	重度
2012 年	潜在	潜在	轻度	轻度	重度

表 4 不同土地利用类型  $^{137}\text{Cs}$  面积活度分布  
Table 4  $^{137}\text{Cs}$  inventory distribution of different land use types

编号	土地类型	地貌部位	土层厚度	表层土壤比活度/(mBq/g)	面积活度/(mBq/cm <sup>2</sup> )	地下漏失比/%	裸岩率/%	校正后面积活度/(mBq/cm <sup>2</sup> )	校正后的漏失比/%
S1	灌草坡	缓坡	30cm	4.825	39.22	6.00	66.4	13.18	90.48
S2	牧草地	缓坡	35cm	4.81	119.77	34.35	63.3	43.96	68.23
S3	坡耕地	缓坡	22cm	1.05	10.42	22.14	82.01	1.87	98.68
S4	苦丁茶地	缓坡	32cm	4.39	61.54	7.61	60.77	24.14	82.95
S5	苏木林地	缓坡	32cm	2.84	90.6	53.96	67.18	29.73	79.00

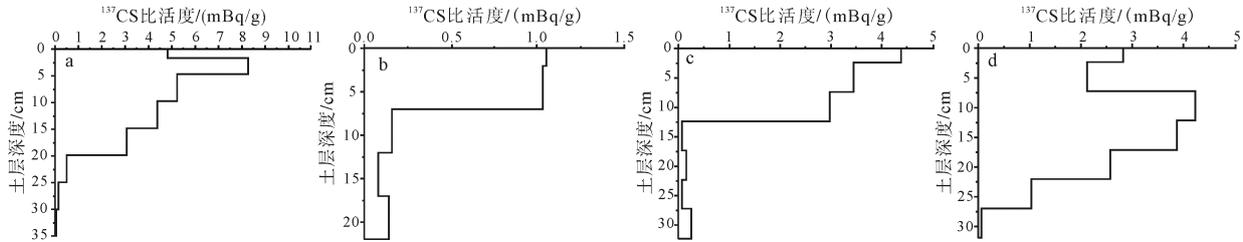


图 3 不同土地利用类型  $^{137}\text{Cs}$  土壤剖面深度分布示意图  
Fig. 3  $^{137}\text{Cs}$  depth distributions in soil sections of different land use types  
a-S2 牧草地; b-S3 坡耕地; c-S4 苦丁茶地; d-S5 苏木林地  
a-pasture S2; b-slope farmland S3; c-kuding tea land S4; d-sappan wood S5

$^{137}\text{Cs}$  存在随水土由岩土界面裂隙流失的特点,且地下漏失较强。目前的技术还很难判定到底有多少  $^{137}\text{Cs}$  及相应的土壤通过地下漏失。一般耕地土壤  $^{137}\text{Cs}$  主要集中在耕作层内,非农耕地  $^{137}\text{Cs}$  主要集中在 0~10 cm 土壤范围内(Li, 2007; Correchel, 2006; Wang, 2008)。研究区耕作层厚度为 12 cm,因此,我们尝试依据耕作层或非农耕地 10 cm 以下  $^{137}\text{Cs}$  面积活度占整个土壤剖面  $^{137}\text{Cs}$  面积活度的比例来粗略判断岩溶区土壤地下漏失强度,并将其称为  $^{137}\text{Cs}$  面积活度地下漏失比。其中,苦丁茶地、苏木林地和牧草地在治理以前为耕地,地下漏失比按耕作层以下计算,坡耕地由于地表流失强烈,并且依据其  $^{137}\text{Cs}$  剖面分布特征来看,在 0~7 cm 分布比较均匀,因此地下漏失比按 7 cm 以下计算。由表 4 可知,除灌草坡和苦丁茶地外,其它地类  $^{137}\text{Cs}$  地下漏失比较大,最大达到 53.96%,这也说明 1963 年以来土壤地下漏失严重。野外调查发现灌草坡土壤主要是通过垂向径流侵蚀、蠕滑侵蚀和崩塌侵蚀向地下漏失,而灌草坡  $^{137}\text{Cs}$  主要集中在土壤表层,其底层土壤的漏失和土壤整体下移不一定伴随表层土壤  $^{137}\text{Cs}$  沿土壤剖面向下漏失,因此,  $^{137}\text{Cs}$  示踪法不适宜岩溶区灌草坡土壤地下漏失的研究。苦丁茶地  $^{137}\text{Cs}$  地下漏失比偏小,可能由于该点土被覆盖率较高,表层带裂隙、溶沟、溶穴等不发育,岩层倾向与坡向一致,导致其土壤地下漏失较少,这也是苦丁茶地地表土壤流失相对偏大的原因之一。因此,在研究岩溶区水土流失时,必须结合表层带介质空间发育情况、倾向与坡向关系、土壤地下漏失方式、土壤覆盖率和土地利用方式综合考虑。

### 3 岩溶峰丛洼地水土流失防治

针对岩溶峰丛洼地上述水土流失特点,水土流失防治必须分地貌部位因地制宜实施水土保持生物或工程技术措施。

山峰及陡坡部位。以发展水源林和防止雨水冲刷为主要目标。重点是封山育林,辅以人工造林,营造涵养水源的常绿落叶阔叶混交林,以涵养区域表层岩溶泉水资源,为解决干旱缺水问题服务。在土壤极缺的严重石漠化坡面,先用客土填充溶沟、溶槽、溶洞,重点发展藤本常绿植物。

缓坡部位。包括垭口和山麓,是防治水土地下漏失的重要部位,也是当地粮食作物和经济作物的重要种植区,以发展不翻动土壤的特色经济植物为主,通过种植篱技术,构成“绿色篱笆”(罗为群等, 2013)。粮食作物尽量种植在夏末至春初降雨较小的季节。裸岩出露的部位,尽量采用客土填充或种植藤本或常绿灌木,以防止水土顺岩面向下漏失。

洼地或谷地。实施工程措施与生物措施结合,以工程措施为主。首先,通过合理规划,科学修建排水沟、落水洞坊等洼地排水系统,既保护耕地,又加速洼地水的排泄而不造成内涝;其次,在洼地或谷地经常受水淹的低洼部位,种植任豆、银合欢等豆科速生树,配套种植牧草或藤本灌木,实施牧草+树、藤灌+乔木的立体种植(李先琨等, 2008),既提高生态经济效益,又防治雨洪时期的水土流失。

不同土地利用方式的水土防治效果差别很大,但要综合考虑经济效益与生态效益。对于耕地和经

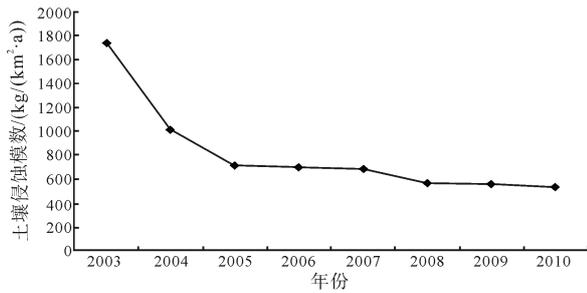


图 4 果化示范区龙何上小流域土壤侵蚀模数 (2003—2010 年)

Fig. 4 Annual variation of soil erosion modulus in Longhe basin of Guohua experimental site from 2003 to 2010

济林地, 关键是要注意粮草结合或林草结合, 特别是对于水土流失最严重的坡耕地和疏林地, 雨季需配套种植牧草才能有效降低水土流失量。

在石漠化综合治理过程中, 因综合考虑了不同地貌部位和不同土地利用方式下的合理措施, 故果化示范区水土流失情况明显改善, 土壤侵蚀模数从 2003 年到 2010 年下降了 65%(图 4)。

#### 4 结论

1)岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤侵蚀的方式和强度差异较大, 坡面土壤侵蚀均以地下侵蚀为主, 地下漏失量占 75%以上, 洼地以地表土壤流失为主, 但最终通过落水洞转成地下河管道流失。自峰坡到洼地底部, 土壤总侵蚀模数和地表侵蚀相对贡献率逐渐增加, 土壤侵蚀厚度和地下侵蚀相对贡献率逐渐减少, 地下侵蚀相对贡献率与土壤侵蚀厚度正相关。

2)土壤侵蚀模数为坡耕地>苦丁茶地>苏木林地>灌草坡>牧草地, 坡耕地土壤侵蚀模数始终保持较高, 有逐年增加的趋势, 而其他各土地类型土壤侵蚀模数逐年减少; 不同治理模式防治水土流失的效果大小为牧草地>灌草坡>苏木林地>苦丁茶地, 单纯退耕还林短期内防治水土流失的效果较差, 在退耕还林后至少 7 年内, 需配套种植牧草才能起到更好的防治效果。<sup>137</sup>Cs 示踪结果表明自 1963 年以来各土地类型区均发生了强烈的水土流失, 以坡耕地最强, 牧草地最低。

3)不同石漠化治理模式下土壤侵蚀强度与石漠化程度演变呈正相关, 不同等级石漠化区土壤侵蚀强度为中度区>重度区>轻度区>潜在区>非石漠化区。水土流失与石漠化为互相促进关系, 但是在中度石漠化和重度石漠化之间存在一个拐点。中度及以下石漠化区, 土壤侵蚀强度随石漠化程度增加而增加, 当水土流失导致石漠化发展到重度及以上石漠化阶段时, 土壤侵蚀模数小于中度石漠化区, 但是仍然高于轻度及以下石漠化区, 且随着石漠化程

度的加剧总体上呈增加趋势。

4)岩溶峰丛洼地的水土保持应当注重生物措施与工程措施相结合, 而且应分峰丛洼地的具体地貌部位进行水土流失防治。在山峰应主要发展水源林, 涵养表层岩溶泉水资源; 山坡主要发展生态产业防治水土向地下漏失; 在洼地底部, 重点修建排水系统工程, 防止内涝水流对土壤的冲刷。

#### 参考文献:

曹建华, 鲁胜力, 杨德生, 蒋忠诚, 康志强. 2011. 西南岩溶区水土流失过程及防治对策[J]. 中国水土保持科学, 9(2): 52-56.

冯腾, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 王克林. 2011. 桂西北喀斯特坡地土壤<sup>137</sup>Cs的剖面分布特征及其指示意义[J]. 应用生态学报, 22(3): 593-599.

蒋忠诚, 曹建华, 杨德生, 罗为群. 2008. 西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J]. 中国水土保持科学, 6(1): 37-42.

蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 邱泗杰, 邓艳, 罗为群, 覃小群, 谢运球, 蓝美宁. 2009. 岩溶峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究[J]. 地球学报, 30(2): 155-166.

蒋忠诚, 袁道先. 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 20(3): 302-308.

李先琨, 蒋忠诚, 黄玉清, 向悟生, 吕仕洪, 叶铎, 苏宗明. 2008. 桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响[J]. 地球学报, 29(2): 253-259.

李元寿, 王根绪, 王军德, 王一博, 吴青柏. 2007. <sup>137</sup>Cs 示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀[J]. 山地学报, 25(1): 114-121.

李智广, 张光辉, 刘秉正, 张平仓. 2005. 水土流失测验与调查[M]. 北京: 中国水利水电出版社.

龙俐, 熊康宁, 王代懿, 刘子琦. 2005. 贵州花江喀斯特峡谷水土流失及治理效果[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 23(3): 13-18.

罗为群, 蒋忠诚, 韩清延, 曹建华, 裴建国. 2008. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. 中国水土保持, 12: 46-48.

罗为群, 蒋忠诚, 欧阳然, 李衍青. 2013. 典型岩溶峰丛洼地水土保持技术研究[J]. 中国水土保持, 1: 37-41.

彭建, 杨明德. 2001. 贵州花江喀斯特峡谷水土流失状态分析[J]. 山地学报, 19(6): 511-515.

唐益群, 张晓晖, 周洁, 余恬钰, 杨坪, 王建秀. 2010. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究——以贵州普定县陈旗小流域为例[J]. 中国岩溶, 29(2): 121-128.

文安邦, 张信宝, 王玉宽, 贺廷荣, 王建文. 2003. 云贵高原区龙川江上游泥沙输移比研究[J]. 水土保持学报, 17(4): 139-141.

张洪江. 2000. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社.

张笑楠, 王克林, 张伟, 陈洪松, 何寻阳, 张信宝. 2009. 典型喀斯特坡地<sup>137</sup>Cs的分布与相关影响因子研究[J]. 环境科学, 30(11): 3152-3158.

张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 齐永青. 2006. 不同尺度域的侵蚀模数[J]. 水土保持通报, 26(2): 69-71.

张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 2007. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 35(3): 202-206.

郑永春, 王世杰. 2002. <sup>137</sup>Cs 的土壤地球化学及其侵蚀示踪意义[J]. 水土保持学报, 16(2): 57-60.

## References:

- BROWN R B, KLING G F, CUTSHALL N H. 1981. Agricultural erosion indicated by  $^{137}\text{Cs}$  redistribution: II. Estimates of erosion rates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1191-1197.
- CAO Jian-hua, LU Sheng-li, YANG De-sheng, JIANG Zhong-cheng, KANG Zhi-qiang. 2011. Process of Soil and Water Loss and Its Control Measures in Karst Regions, Southwestern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 9(2): 52-56(in Chinese with English abstract).
- COLLINS A L, WALLING D E, SICHINGABULA H M, LEEKS G J L. 2001. Using  $^{137}\text{Cs}$  measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the Upper Kaleya River basin, southern Zambia[J]. *Geoderma*, 104: 299-323.
- CORRECHEL V, BACCHI O O S, DE MARIA I C, DECHEN S C F, REICHARDT K. 2006. Erosion rates evaluated by the  $^{137}\text{Cs}$  technique and direct measurements on long-term runoff plots under tropical conditions[J]. *Soil & Tillage Research*, 86: 199-208.
- FELIPE Z. 2003. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments[J]. *Soil & Tillage Research*, 69: 3-13.
- FENG Teng, CHEN Hong-song, ZHANG Wei, NIE Yun-peng, WANG Ke-lin. 2011.  $^{137}\text{Cs}$  Profile Distribution Character and Its Implication for Soil Erosion on Karst Slopes of Northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(3): 593-599(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, CAO Jiang-hua, YANG De-sheng, LUO Wei-qun. 2008. Current Status and Comprehensive Countermeasures of Soil Erosion for Karst Rocky Desertification Areas in the Southwestern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(1): 37-42(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, LI Xian-kun, ZENG Fu-ping, QIU Si-jie, DENG Yan, LUO Wei-qun, QIN Xiao-qun, XIE Yun-qiu, LAN Fu-ning. 2009. Study of Fragile Ecosystem Reconstruction Technology in the Karst Peak-cluster Mountain[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(2): 155-166(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, YUAN Dao-xian. 1999. Dynamics Features of the Epikarst Zone and Their Significance in Environments and Resources[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 302-308(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-kun, JIANG Zhong-cheng, HUANG Yu-qing, XIANG Wu-sheng, LU Shi-hong, YE Duo, SU Zong-ming. 2008. Dynamics of Dominant Population and Its Influence on Karstification in Southwest Guangxi, China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(2): 253-259(in Chinese with English abstract).
- LI Yuan-shou, WANG Gen-xu, WANG Jun-de, WANG Yi-bo, WU Qing-bai. 2007.  $^{137}\text{Cs}$  trace technique to study soil erosion at Alpine Meadow of Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 25(1): 114-121(in Chinese).
- LI Zhi-guang, ZHANG Guang-hui, LIU Bing-zheng, ZHANG Ping-can. 2005. Soil and water loss test and investigation[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower(in Chinese).
- LONG Li, XIONG Kang-ning, WANG Dai-yi, LIU Zhi-qi. 2005. On the Soil Erosion and Control in Huajiang Karst Gorge of Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science)*, 23(3): 13-18(in Chinese with English abstract).
- LOWRANCE R J, MCINTYRE S, LANCE C. 1988. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using cesium-137 activity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 43: 195-199.
- LUO Wei-qun, JIANG Zhong-cheng, HAN Qing-yan, CAO Jian-hua, PEI Jian-guo. 2008. Characteristics of Soil Distribution and Erosion at Different Locations of Karst Peak-cluster Mountain[J]. *Soil and Water Conservation in China*, (12): 46-48(in Chinese with English abstract).
- LUO Wei-qun, JIANG Zhong-cheng, OU Yang-ran, LI Yan-qin. 2013. Typical Soil and Water Conservation Technology of Karst Peak-cluster Depression[J]. *Soil and Water Conservation in China*, (1): 37-41(in Chinese with English abstract).
- PENG Jian, YANG Ming-de. 2001. On the Present Soil Erosion Situation of Huajiang Karst Gorge in Guizhou Province[J]. *Journal of Mountain Science*, 19(6): 511-515(in Chinese with English abstract).
- TANG Yi-qun, ZHANG Xiao-hui, ZHOU Ji, SHE Tian-yu, YANG Ping, WANG Jian-xiu. 2010. The Mechanism of Underground Leakage of Soil in Karst Rocky Desertification Areas-A Case in Chenqi Small Watershed, Puding, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 29(2): 121-127(in Chinese with English abstract).
- WANG Y B, WANG G X, HU H C, CHENG H Y. 2008. Erosion rates evaluated by the  $^{137}\text{Cs}$  technique in the high altitude area of the Qinghai-Tibet plateau of China[J]. *Environmental Geology*, 53: 1743-1749, doi:10.1007/s00254-007-0780-0.
- WEN An-bang, ZHANG Xing-bao, WANG Yu-kuan, HE Ting-rong, WANG Jian-wen. 2003. Study on Sedimentation Delivery Ratio in Upper Longchuan River of Yungui Plateau Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4): 139-141(in Chinese with English abstract).
- YANG Hao, CHANG Qing, DU Ming-yuan, MINAMI K, HATTA T. 1998. Quantitative model of soil erosion rates using  $^{137}\text{Cs}$  for uncultivated soil[J]. *Soil Science*, 163: 248-257.
- ZHANG Hong-jiang. 2000. Principle of Soil Erosion[M]. Beijing: China Forestry Press(in Chinese).
- ZHANG Xiao-nan, WANG Ke-lin, ZHANG Wei, CHEN Hong-song, HE Xun-yan, ZHANG Xing-bao. 2009. Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and Relative Influencing Factors on Typical Karst Sloping Land[J]. *Environmental Science*, 30(11): 3152-3158(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xing-bao, HE Xiu-bin, WEN An-bang, QI Yong-qin. 2006. Soil Erosion Rates under Different Land Scale Conditions[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 26(2): 69-71(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xing-bao, WANG Shi-jie, HE Xiu-bin, WANG Yan-chun, HE Yong-bin. 2007. Soil Creeping in Weathering Crusts of Carbonate Rocks and Underground Soil Losses on Karst Slopes[J]. *Earth and Environment*, 35(3): 202-206(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yong-chun, WANG Shi-jie. 2002. Soil Geochemistry Characteristics of  $^{137}\text{Cs}$  and Its Theory of Tracing Soil Erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(2): 57-60(in Chinese with English abstract).