

# 基于 CSLE 模型的广西土壤侵蚀规律

魏梦瑶, 张卓栋, 刘瑛娜, 张科利

(北京师范大学 地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**广西是我国喀斯特地貌分布主要区域之一,水土流失危害严重,利用第一次全国水利普查水土保持专项数据,以实际侵蚀调查单元和侵蚀地块为基础,统计和分析了广西侵蚀地块不同土地利用情况和地形特点以及土壤侵蚀空间分布规律。结果表明:广西土地利用类型以林地、耕地为主。整体地形崎岖,侵蚀地块破碎,平均坡长为 35.60 m,平均坡度为 18.49°。坡长、坡度空间分布规律基本一致,由西北向东南递减。随着坡度增加,各土地利用土壤侵蚀模数均呈先增大后减小的趋势,坡度临界值为 25°~40°,坡长小于 70 m 时,土壤侵蚀模数随坡长增加不断增大,坡长对土壤侵蚀的影响稍大于坡度。广西土壤侵蚀强度以微度至轻度为主,各土地利用中耕地土壤侵蚀状况最严重,特别是 15°以上的陡坡耕地对区域水土流失贡献最大。

**关键词:**土壤侵蚀;喀斯特;CSLE;土地利用;地形;广西

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)01-0015-06

## Characteristics of Soil Erosion in Guangxi Based on CSLE

WEI Mengyao, ZHANG Zhuodong, LIU Yingna, ZHANG Keli

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,  
Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Guangxi is one of the major regions with karst distribution, and the soil erosion in this region is very serious. According to the First National Water Census, we calculated and analyzed the characteristics of soil erosion in different land uses and topographies based on field erosion survey units and erosion plots. The results show that the forestland and cultivated land are the main land use types in Guangxi, the overall terrain is hilly and rough, and the erosion site is fragmentarily distributed in the area with an average slope length of 35.60 m and an average slope gradient of 18.49°; the spatial distribution of slope length and gradient is similar, decreasing from northwest to southeast. With the increase of slope gradient, the soil erosion modulus of each land use increases at first and then decreases, and the critical slope gradient is between 25°~40°. When the slope length is less than 70 meters, the soil erosion modulus increases with the slope length, and the influence of slope length on soil erosion is slightly larger than that of the slope gradient. The soil erosion intensity in Guangxi varies from mild to slight level. The soil erosion of the cultivated land is the most serious; especially the steep slope cropland above 15° has the biggest contribution to soil erosion in this region.

**Keywords:** soil erosion; karst; CSLE; land use; topography; Guangxi

我国是世界上喀斯特面积最大(344.3 万 km<sup>2</sup>)、分布最广、类型最多的国家,其中西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中分布区,该区连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈<sup>[1]</sup>。脆弱复杂的生态环境与不合理的人类活动导致该地区土壤侵蚀严重,危害人类生存与社会经济发展。西南喀斯特地区土壤侵蚀导致的石漠化问题逐渐严重,已经成为继黄土高原

水土流失和北方地区沙漠化问题之后的我国第三大严重的生态环境问题<sup>[2]</sup>,同时该地区相关研究还比较薄弱,缺少基础规律性的研究成果。

广西壮族自治区作为我国喀斯特地貌分布主要省区之一,土壤侵蚀分布范围广泛,根据广西第一次水利普查公报数据<sup>[3]</sup>,广西土壤侵蚀面积达 5.05 万 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 21.34%,同时人类不合理的土

收稿日期:2019-01-31

修回日期:2019-03-13

资助项目:国家自然科学基金重点项目“西南黄壤区不同尺度土壤侵蚀与泥沙运移规律耦合关系”(41730748)

第一作者:魏梦瑶(1995—),女,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为土壤资源利用与保护。E-mail:mwei@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张卓栋(1984—),男,湖南湘潭人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:zzhang@bnu.edu.cn

地利用导致区域水土流失加剧、石漠化日益严重,成为西部大开发战略实施的重点和难点地区<sup>[4]</sup>。目前有关广西喀斯特地区土壤侵蚀的研究相对较少且主要集中在坡面、小流域等较小尺度,李豪等<sup>[5]</sup>利用<sup>137</sup>Cs示踪技术定量研究峰丛洼地与小流域尺度泥沙堆积、土壤流失情况;陈洪松等<sup>[6]</sup>利用大型径流小区法研究了环江地区峰丛洼地区不同利用方式坡面的降雨产流与地表产沙特征的关系;王保田等<sup>[7]</sup>利用人工降雨探索了广西石漠化地区坡面侵蚀过程。已有零散研究为初步认识广西土壤侵蚀特征及其影响因素提供了有益参考。然而,由于喀斯特地貌广泛发育,地形破碎,区域差异显著,已有研究不能够完整全面反映出全区尺度的土壤侵蚀状况。水利部自2010—2012年开展了第一次全国水利普查,运用野外调查与定量评价相结合的方法,得到了全国范围土壤侵蚀强度与分布数据。本文的研究目标是利用第一次水利普查广西野外调查数据,通过分析广西土地利用、地形等重要因子,探究广西土壤侵蚀规律及空间分布特征,从而为全面、准确地认识广西土壤侵蚀现状以及水土保持规划布局和确定生态恢复治理重点区域提供重要理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

广西壮族自治区位于我国南部(104°26′—112°04′E,

20°54′—26°24′N),地处云贵高原东南边缘,两广丘陵西部,南临北部湾。地形以山地为主,丘陵次之,平原较少。地势自西北向东南倾斜,四周多山地与高原,中、南部多为丘陵平地,呈盆地状。气候类型为亚热带季风气候,降水丰富,雨热同期,年均温 21℃,年均降水量 1 070 mm。植被类型为常绿阔叶林,主要土壤类型为红壤、赤红壤、黄壤、石灰岩土等。区域内水土流失、石漠化严重。土地利用以林地、耕地、草地和园地为主。

## 1.2 野外调查方法与内容

野外调查单元是为了野外实地调查土地利用和水土保持措施而划定的空间范围,根据地形分为平原区的网格与丘陵、山地的小流域<sup>[8]</sup>。选取高斯—克吕格投影分带并划分为四层网格,每一层网格在上一层网格基础上进一步划分,以 4% 的密度在第 4 层基本侵蚀调查单元中心抽取 1 个 1 km×1 km 网格作为基本位置。野外调查内容主要为土壤侵蚀各影响因子,主要包括坡度、坡长、土地利用、植被覆盖状况,以及生物、耕作、工程措施实施现状。经野外调查获得有关广西数据共有 100 个市县区,2 319 个侵蚀调查单元,21 473 个侵蚀调查地块,调查总面积 686.35 km<sup>2</sup>。

## 1.3 数据处理与分析

在前期野外调查与准备工作完成后,利用中国土壤流失方程 CSLE(Chinese Soil Loss Equation)<sup>[9]</sup>计算各侵蚀调查单元土壤水蚀模数。

表 1 主要土地利用类型坡度统计

土地利用类型	地块数/个	极小值/(°)	极大值/(°)	均值/(°)	变异系数	偏度	峰度
林地	9818	0	65.88	24.34	0.42	−0.06	−0.04
耕地	5566	0	49.30	11.06	0.79	0.77	0.04
草地	2103	0	63.13	18.33	0.63	0.39	−0.46
园地	2128	0	54.01	17.04	0.58	−0.05	−0.90
总体	21473	0	65.88	18.49	0.63	0.27	−0.56

方程基本形式为: $M=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T$ 。其中: $M$  为土壤水蚀模数, $t/(hm^2 \cdot a)$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ;  $L$  和  $S$  分别为坡长和坡度因子,无量纲;  $B$  为植被覆盖与生物措施因子,无量纲;  $E$  为工程措施因子,无量纲;  $T$  为耕作措施因子,无量纲<sup>[9]</sup>。在分析统计土壤侵蚀模数过程中,根据以往小区实测数据<sup>[10]</sup>对耕作措施因子及生物措施因子进行了修正。利用 SPSS 20.0 软件进行描述统计分析和分类汇总,利用 Pearson 相关分析探索坡度、坡长与土壤侵蚀的相关关系。利用 ArcGIS 10.2 软件从已有研究中<sup>[11]</sup>提取石漠化地貌类型分区数据,对坡长、坡度及侵蚀强度数据进行克

里金空间插值,并叠加地貌分区图进行分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 坡度与土壤侵蚀

由表 1 可知,广西侵蚀调查单元的平均坡度为 18.49°,4 种主要土地利用中林地坡度最大,为 24.34°,草地次之,随后是园地,耕地平均坡度最小,为 11.06°。整体来看,广西坡度范围 0°~70°,主要集中在 0°~40°(面积占比为 96.2%)。相较于东北地区(0.8°)和北方土石区(12.1°)等,广西喀斯特地区坡面整体坡度较大,但小于黄土丘陵区平均坡度(22.3°)<sup>[12]</sup>。空间上,广西坡度主要由西北向东南递减(图 1)。其中西北部邻近贵州、云南地区坡度最大,以陡坡为主,中部及

北部坡度较小,地形较平缓。

坡度是地貌形态重要因子之一,同时也是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[13]</sup>。研究表明,坡度对土壤侵蚀的影响具有临界坡度,即随着坡度增加土壤侵蚀量随之增加,但到达某一坡度即临界坡度后,不再增加或开始减少<sup>[14]</sup>。统计各土地利用类型土壤侵蚀模数随坡度变化情况(表 2)可以看出,各土地利用类型随坡度增加,土壤侵蚀模数都呈现先增大后逐渐减小的趋

势,这与已有研究规律一致<sup>[15-16]</sup>。由于不同土地利用下的侵蚀环境与主要侵蚀方式不同,侵蚀模数的最大值出现的坡度范围有所不同,林地的最大值出现在 30°~35°,耕地和园地出现在 35°~40°,草地和区域总体统计得到的最大值都出现在 25°~30°。大于此最大值出现的坡度后,土壤侵蚀模数随着坡度的增大而逐渐减小或趋于平缓,这表明广西土壤侵蚀存在临界坡度,范围在 25°~40°。

表 2 不同坡度条件下各土地利用的土壤侵蚀模数 t/(km<sup>2</sup>·a)

土地利用 类型	坡度/(°)								
	<5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	>40
林地	3.88	15.22	24.87	31.10	33.80	36.46	40.01	32.14	27.28
耕地	30.91	131.50	272.82	340.89	450.41	617.46	699.46	874.19	811.01
草地	3.10	9.98	17.92	20.29	22.82	30.94	29.76	29.35	30.15
园地	4.54	17.61	31.15	45.63	68.51	81.34	76.76	89.46	88.08
总体	17.41	72.20	118.99	123.94	125.49	128.95	112.91	79.87	49.93

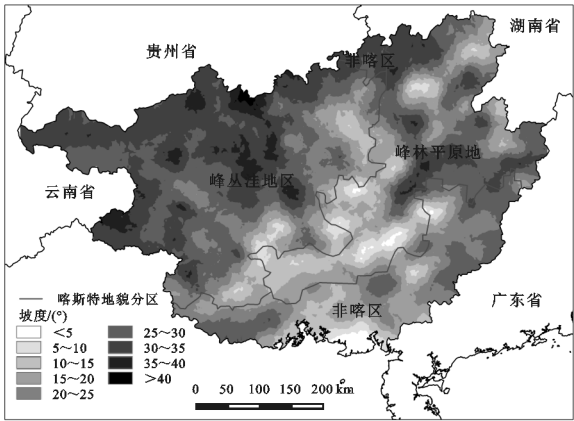


图 1 广西各侵蚀调查单元坡度空间分布

2.2 坡长与土壤侵蚀

坡长通过影响坡面径流、泥沙运移来影响侵蚀产

沙,是影响坡面侵蚀的重要因子<sup>[17]</sup>。通过表 3 可知,广西平均坡长为 35.60 m。不同土地利用类型坡长状况不同,其中:林地>园地>草地>耕地,林地坡长最长,耕地坡长最短。广西侵蚀地块的坡长主要集中在 10~60 m,占总体的 90.1%,尤其集中在 20~50 m,该部分坡长占总体的 70.7%,30~40 m 为坡长分布最集中的长度。相较于已有研究中东北(479 m)、黄土丘陵区(83 m)、北方土石区(121 m)等<sup>[12]</sup>,广西喀斯特地区坡面整体坡长较短。图 2 为广西各侵蚀调查单元坡长空间分布图,从中可知,广西坡长在空间上分布规律与坡度基本一致,主要呈现由西北向东南递减的规律。其中西北部邻近贵州、云南的地区坡长最大,坡长最小的地区位于广西中部及南部沿海地区。

表 3 主要土地利用类型坡长统计

土地利用类型	地块数/个	极小值/m	极大值/m	均值/m	变异系数	偏度	峰度
林地	9818	0	144.40	39.31	0.34	0.77	3.17
耕地	5566	0	146.35	30.96	0.53	0.90	2.74
草地	2103	0	137.61	35.32	0.48	0.94	3.17
园地	2128	0	119.74	35.99	0.44	0.80	2.04
总体	21473	0	144.40	35.60	0.44	0.66	2.37

表 4 不同坡长条件下各土地利用的土壤侵蚀模数 t/(km<sup>2</sup>·a)

土地利用 类型	坡长/m							
	<10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	>70
林地	0.75	10.37	25.86	34.03	33.15	30.46	40.60	58.21
耕地	10.45	57.78	156.68	273.09	363.33	449.29	621.64	520.73
草地	0.52	5.62	14.70	22.63	23.27	28.87	38.88	26.92
园地	1.50	15.83	40.63	48.69	56.37	68.63	76.29	64.45
总体	5.55	31.98	73.19	98.15	102.77	118.53	199.09	178.10

随着坡长增加,各土地利用类型的土壤侵蚀模数也呈现出明显的增加趋势(表 4)。各土地利用规律

有所差异,但总体上当坡长小于 70 m 时,随着坡长增加土壤侵蚀模数逐渐增大,而在 70 m 以上的坡

面,土壤侵蚀模数随坡长增加呈现降低趋势。同时,相同坡度或坡长条件下,耕地土壤侵蚀模数明显大于其他土地利用类型,侵蚀强度较大。尤其是坡度大于15°的陡坡耕地,土壤侵蚀状况严重,15°以上陡坡耕地土壤侵蚀模数是广西总体土壤侵蚀模数平均值的3.73 倍。通过 Pearson 相关分析可知,广西地区坡长与土壤侵蚀的相关系数稍大于坡度。

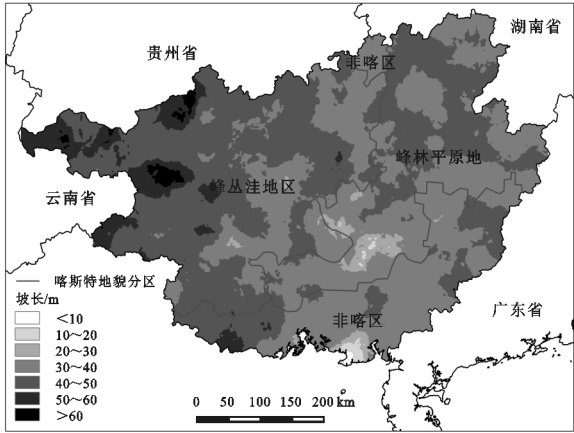


图 2 广西各侵蚀调查单元坡长空间分布

2.3 土地利用与土壤侵蚀

土壤侵蚀影响因素复杂,主要分为自然因素与人为因素,自然因素包括降雨、土壤、地形、植被条件等,

人为因素更为复杂和不确定,人类活动影响土壤侵蚀最直接的方式为土地利用。土地利用方式会影响植被条件、土壤理化性质等,进而对土壤侵蚀产生重要影响<sup>[18]</sup>。

通过统计分析广西土地利用现状可知(表 5),土地利用类型以林地为主(66.15%),其次为耕地(18.29%)、草地(6.32%)、园地(5.34%),共占总面积的 96%。总体来看广西喀斯特地区地形相对破碎,平均侵蚀地块面积仅为 3.2 hm<sup>2</sup>,其中有 66%的侵蚀地块面积<2 hm<sup>2</sup>。见表 5,广西喀斯特地区 4 种主要土地利用类型的平均土壤侵蚀模数为耕地>园地>林地>草地。耕地土壤侵蚀模数均值为总体的 2.28 倍,并分别为园、林、草地的 4.81,7.18,11.65 倍。这表明耕地的土壤侵蚀最严重,对广西喀斯特地区整体土壤侵蚀总量贡献较大。这主要是由于耕地受人为扰动最大,农耕活动导致土壤疏松易受侵蚀,再加之喀斯特地区土层较薄,使其土壤侵蚀的后果更为严重。除耕地外,园地受人类活动影响也较大,而林草地植被覆盖状况较好,良好的植被覆盖可以防止雨滴击溅、减缓地表径流,发达的植物根系也有利于固定土壤与改善土壤状况,因此林草地土壤不易产生土壤侵蚀。

表 5 不同土地利用类型侵蚀地块统计特征

土地利用类型	总面积/hm <sup>2</sup>	百分比/%	地块面积/hm <sup>2</sup>			土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		
			最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
林地	45401	66.15	0.03	123.69	4.62	0	471.85	31.35
耕地	12554	18.29	0.03	61.25	2.26	0	3672.85	225.11
草地	4335	6.32	0.03	84.02	2.06	0	265.37	19.31
园地	3666	5.34	0.03	27.99	1.72	0	488.65	46.75
居民点及工矿用地	1321	1.92	0.02	26.93	1.39	0	1363.36	26.98
交通运输用地	97	0.14	0.05	5.20	1.31	0	72.76	20.27
水域及水利设施用地	818	1.19	0.03	28.94	1.45	0	6.72	0.01
其他用地	442	0.64	0.02	17.97	1.64	0	4639.67	560.31
总体	68635	100.00	0.02	123.69	3.20	0	4639.67	98.47

表 6 不同土地利用类型侵蚀强度面积占比 %

土壤侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀 强度	总体	不同土地利用类型			
			林地	耕地	草地	园地
<30	微度	73.88	82.98	41.36	76.85	61.09
30~100	轻度	14.34	12.09	19.11	21.43	24.70
100~200	中度	5.26	3.76	11.51	1.63	9.08
200~500	强烈	3.83	1.17	14.78	0.08	5.12
300~1000	极强烈	2.02	0.00	10.71	0.00	0.00
>1000	剧烈	0.63	0.00	2.53	0.00	0.00

分析不同土地利用类型侵蚀强度占比可知(表 6),广西喀斯特地区土壤侵蚀强度以微度至轻度为主(88.22%),4 种主要的土地利用类型相比较,耕地中强烈以上土壤侵蚀面积占比最多(28.02%)。如图 3

所示,广西耕地侵蚀最为严重地区主要集中在西北部及西南边界地区,其中西北部基本与坡度较大地区分布范围一致,说明陡坡耕作对土壤侵蚀影响明显。综上所述可以发现,4 种主要土地利用类型中耕地不仅土壤侵蚀模数最大,同时侵蚀严重的地区面积占比最大,侵蚀强度和范围都最为突出。

2.4 土壤侵蚀空间分布与区域差异

广西土壤侵蚀强度空间差异明显,土壤侵蚀强度较大(中度及以上)区域主要分布在西北部与南部地区。从喀斯特地貌分区上来看,侵蚀强度较大区域主要集中在峰丛洼地地区,部分位于峰林平原和非喀区(图 4),这与地形、降雨以及土地利用、人类活动等因素有关。



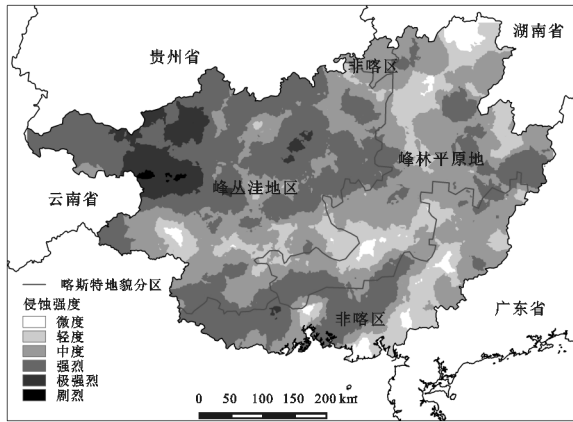


图3 广西耕地侵蚀强度空间分布

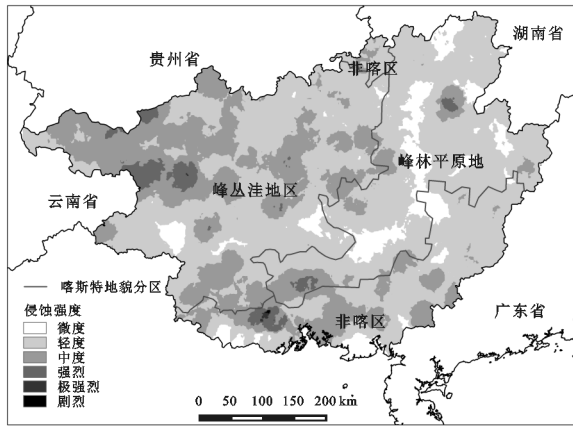


图4 广西土壤侵蚀强度空间分布

结合图1—3的坡长、坡度及耕地侵蚀强度空间分布图可知,广西坡长、坡度由西北向东南递减,西北部主要为长陡坡,同时位于峰丛洼地地区,地形崎岖破碎、起伏变化大,土层较薄,坡耕地开垦严重,加之降水年际分布不均,夏季多暴雨,土壤侵蚀严重。中部地区侵蚀以微度至中度为主,中部地形以盆地和平原为主,地形较平坦,虽然人口密度较西北部大,但坡度较小,土壤侵蚀强度相对较小。降雨是坡面侵蚀重要的动力来源,各因素中降雨强度对土壤侵蚀的影响尤为重要<sup>[19]</sup>。广西南部沿海地区,虽然坡长、坡度较小,但靠近海洋,雨量充沛且降水集中,冲刷能力强,且为碳酸盐岩地区,极易发生水土流失。根据蔡卓杰等人研究可知,南部尤其东南地区人口密度大,耕地占比较多,人类活动尤其是农业活动频繁<sup>[20]</sup>。地形和降水条件加上人为不合理耕作导致该地土壤侵蚀严重。在进行区域水土流失防治和规划布局时,应在侵蚀严重地区重点布设水土保持措施,同时也要兼顾其他侵蚀地区,做到重点防护,综合治理。

### 3 结论

(1) 广西平均坡长较短,为 35.60 m,平均坡度较大,为 18.49°。区域内坡长与坡度空间分布特征基本一

致,大致呈由西北向东南递减,西北部临近贵州、云南省地区,主要为峰丛洼地,地形陡峭崎岖,坡度、坡长较大。

(2) 随坡度增加,广西各土地利用类型的土壤侵蚀模数都呈现先增大后减小的趋势,不同土地利用类型坡度临界值有所不同,集中在 25°~40°范围内。坡长小于 70 m 时,土壤侵蚀模数随坡长增加不断增大。

(3) 广西占比最大的土地利用类型为林地(66.15%),4 种主要土地利用类型分别为林地、耕地、草地、园地,共占总面积的 96%。该地区侵蚀地块相对破碎,66%的侵蚀地块面积 < 2 hm<sup>2</sup>。各土地利用类型中耕地侵蚀模数最大,对广西整体土壤侵蚀贡献较大,尤其是大于 15°的坡耕地。

(4) 广西侵蚀强度较大区域主要分布在西北部临近贵州、云南地区以及南部临海区域,中部地区也有部分地区侵蚀强度较大,这与地形地貌及人类活动,尤其是陡坡耕地开垦有关。应针对这些地区重点进行水土流失防治,避免陡坡开垦。

#### 参考文献:

- [1] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in South-west China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(3): 1-12.
- [2] 吴秀芹,蔡运龙,蒙古军.喀斯特山区土壤侵蚀与土地利用关系研究:以贵州省关岭县石板桥流域为例[J].水土保持研究, 2005, 12(4): 46-48, 77.
- [3] 陆炳群.广西壮族自治区第一次水利普查公报[J].广西水利水电, 2013(3): 92-94.
- [4] 中国科学院学部.关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议[J].地球科学进展, 2003, 18(4): 489-492.
- [5] 李豪,张信宝,白晓永,等.桂西北喀斯特丘陵区峰丛洼地小流域泥沙堆积的<sup>137</sup>Cs 示踪研究[J].泥沙研究, 2010, 35(1): 17-24.
- [6] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J].农业工程学报, 2012, 28(16): 121-126.
- [7] 王保田,龚傲龙,杜妍平,等.广西石漠化地区坡面土壤侵蚀规律研究[J].广西大学学报:自然科学版, 2015, 40(1): 228-235.
- [8] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持, 2013(10): 26-34.
- [9] Liu B, Zhang K, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]// Beijing: Tsinghua University Press, Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference, 2002.
- [10] 郭继成,顾再柯,苑爽,等.西南喀斯特地区水土保持措施因子值计算与评价[J].中国水土保持, 2014(10): 50-53.
- [11] 王世杰,张信宝,白晓永.中国南方喀斯特地貌分区纲要[J].山地学报, 2015, 33(6): 641-648.

- [12] 耿晓东.主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2010.
- [13] 傅伟,陈洪松,王克林.喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性研究[J].中国生态农业学报,2007,15(5):59-62.
- [14] 王恒松,熊康宁,张芳美.地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J].水土保持通报,2015,35(4):1-7.
- [15] 陈美淇,魏欣,张科利,等.基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J].水土保持学报,2017,31(3):16-21.
- [16] 周晓晴,马芊红,张科利.基于样带的陕西省水土流失规律研究[J].水土保持研究,2018,25(4):47-53.
- [17] 何永彬,张信宝,文安邦.西南喀斯特山地的土壤侵蚀研究探讨[J].生态环境学报,2009,18(6):2393-2398.
- [18] 赵文武,傅伯杰,吕一河,等.多尺度土地利用与土壤侵蚀[J].地理科学进展,2006,25(1):24-33.
- [19] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [20] 蔡卓杰,卢远,谢坤坚.广西人类活动对土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持,2017(2):51-53.

(上接第 6 页)

- [10] 吴昌广,林德生,肖文发,等.三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J].应用生态学报,2011,22(1):151-158.
- [11] 王明晓.三峡库区降雨侵蚀力研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [12] 卢喜平.紫色土丘陵区降雨侵蚀力模拟研究[D].重庆:西南大学,2006.
- [13] 史东梅,江东,卢喜平,蒋光毅.重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J].农业工程学报,2008(09):16-21.
- [14] United States Department of Agriculture. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator 1. Model Documentation. Technical Bulletin Number 1768[R]. Washington D C:Usda-Ars, 1990:56-72.
- [15] 李树利. USLE 模型在川中紫色土区应用研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [16] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987,30:1389-1396.
- [17] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.
- [18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978:537.
- [19] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持报,2000,14(2):19-24.
- [20] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

(上接第 14 页)

- [18] 郑海金,方少文,杨洁,等.近 40 年赣江年径流泥沙变化及影响因素分析[J].水土保持学报,2012,26(1):28-32.
- [19] 肖洋,张汶海,张颖.赣江中下游近 60 年水沙时空分布特征[J].水文,2014,34(6):86-92.
- [20] Yu B, Rosewell. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales [J]. Australian Journal of Soil Research, 1996,34(1):139-152.
- [21] Yu B. Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics [J]. Australian Journal of Soil Research, 1998,36(1):143-165.
- [22] 宁丽丹,石辉.利用日降雨量资料估算西南地区的降雨侵蚀力[J].水土保持研究,2003,10(4):183-186.
- [23] 胡续礼,潘剑君,杨树江,等.几种降雨侵蚀力模型的比较研究[J].水土保持通报,2006,26(1):68-70.
- [24] 林璐,刘金涛,甘升伟,等.基于 TFPW-MK 法的太湖流域湖西区降水时空变化分析[J].水电能源科学,2018,36(4):1-5.
- [25] 刘卫林,刘丽娜.修河流域洪水变化特征及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2018,130(5):316-322.
- [26] 孟庆香,刘国彬,杨勤科.基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J].水土保持研究,2010,17(1):10-14.
- [27] 汪青静,许崇育,陈华.克里金日降水插值的不同变异函数比较分析[J].水资源研究,2016,5(5):469-477.
- [28] 马良,姜广辉,左长清,等.江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J].农业工程学报,2009,25(10):61-68.