

# 典型岩溶流域不同坡度等级下的土壤侵蚀与石漠化分布特征耦合分析

陈金珂<sup>1,2</sup>, 蒲俊兵<sup>2</sup>, 李建鸿<sup>2</sup>, 张陶<sup>2</sup>, 王赛男<sup>1,2</sup>, 曾锐<sup>1,2</sup>

(1.重庆市岩溶环境学重点实验室, 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;

2.中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部 广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为定量分析岩溶区不同坡度范围内石漠化和土壤侵蚀的关系,以南洞地下河流域为研究对象,利用该区域 2016 年气象数据、遥感数据,结合改进的 RUSLE 模型,在遥感技术和地理信息技术的支持下对不同坡度下二者的关系进行了研究。结果表明:(1) 南洞地下河流域石漠化面积为 740.64 km<sup>2</sup>,其发生率为 77.96%,以中度石漠化为主。区域中覆盖型岩溶区土壤侵蚀面积为 444.54 km<sup>2</sup>,发生率为 66.55%,以微度侵蚀为主。裸露型岩溶区土壤侵蚀面积为 688.86 km<sup>2</sup>,发生率为 72.51%,以轻中度土壤侵蚀为主;(2) 裸露型岩溶区石漠化和土壤侵蚀主要发生在 5°~25° 坡度范围内,当坡度<25°时土壤侵蚀面积随着石漠化等级的升高先减少后增加,坡度>25°时土壤侵蚀面积随着石漠化等级的升高而降低;土壤侵蚀发生率在各个坡度内随着石漠化等级的升高而降低;(3) 在裸露型岩溶区发生土壤侵蚀的范围内,各个坡度的石漠化面积随着土壤侵蚀等级的升高先增加后减少,在中度土壤侵蚀区石漠化面积达到最大。石漠化发生率与土壤侵蚀等级的关系复杂,其与石漠化并不存在单一相关关系。研究区石漠化问题严重,土壤侵蚀强度较大,必须加快区域尤其是 5°~25°坡度范围内的石漠化和土壤侵蚀治理工作。

**关键词:**石漠化; 土壤侵蚀; 地下河流域; 坡度

**中图分类号:**S157

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)05-0001-09

## Coupling of Rocky Desertification Distribution and Soil Erosion Under Different Slope Grades in a Typical Karst Basin

CHEN Jinke<sup>1,2</sup>, PU Junbing<sup>2</sup>, LI Jianhong<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, WANG Sainan<sup>1,2</sup>, ZENG Rui<sup>1,2</sup>

(1.Chongqing Key Laboratory of Karst Environmental Science, Southwest University School of Geographical Sciences, Chongqing 400715, China; 2.Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Meteorological data, remote sensing data in the Nantong underground river basin and improved RUSLE model were used to quantitatively analyze the relationship between rocky desertification and soil erosion in different slopes, with the support of remote sensing and geographic information technology. The results show that: (1) the rocky desertification area in the Nandong underground river basin is 740.64 km<sup>2</sup> with the risk probability of 77.96%, which is dominated by moderate rocky desertification grade; the soil erosion area in the area covered by karst is 444.54 km<sup>2</sup> with the risk probability of 66.55%, which is dominated by micro-erosion grade; the soil erosion area in the bared karst area is 688.86 km<sup>2</sup> with the risk probability of 72.51%, which is dominated by light and moderate soil erosion grade; (2) rocky desertification and soil erosion in bared karst areas mainly occur in the slope range of 5°~25°, soil erosion area first decreases and then increases with the increase of rocky desertification intensity, when the slope is <25°; when the slope is >25°, the soil erosion area continuously decreases with the increase of rocky desertification

**收稿日期:**2019-10-15

**修回日期:**2019-11-14

**资助项目:**国家重点研发计划项目“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范:断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理”(2016YFC0502501);广西自然科学基金项目“岩溶环境学”(2017GXNSFFA198006)

**第一作者:**陈金珂(1994—),女,河南商水人,硕士研究生,主要从事岩溶环境与全球变化研究。E-mail:17839164069@163.com

**通信作者:**蒲俊兵(1982—),男,四川渠县人,研究员,博士生导师,主要从事岩溶环境学、岩溶水文地球化学研究。E-mail:junbingpu@karst.ac.cn

intensity; (4) in the soil erosion areas in the bared karst area, the rocky desertification area in various slope grades first increases and then decreases with the increase of soil erosion grade; the rocky desertification area reaches the maximum in the moderate soil erosion region; The risk probability of rocky desertification in the studied area shows the complex correlation with soil erosion grade, which is not a single liner relationship between them. Because the intensity of soil erosion is large and the problem of rocky desertification in study area is severe, it is necessary to pay more attention to the control of rocky desertification and soil erosion in the slope range of  $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$  in this study area.

**Keywords:** rocky desertification; soil erosion; underground river basin; slope

我国西南岩溶区是世界上连片分布的、面积最大的碳酸盐岩分布区<sup>[1]</sup>。该区域土层薄、土壤有机质含量低,植被覆盖状况差,导致土壤抵御侵蚀的能力较弱,一经破坏极易造成严重的土地退化问题<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀和石漠化是岩溶区土地退化的两个阶段<sup>[3]</sup>,土壤受到扰动发生侵蚀,当侵蚀达到一定的程度,基岩大面积裸露,形成石漠化。因此,石漠化与土壤侵蚀存在一定的因果关系,土壤侵蚀是石漠化的早期阶段,石漠化是土壤侵蚀的终极状态<sup>[4]</sup>。最新的《中国·岩溶地区石漠化状况公报》数据显示,2016 年底,岩溶区石漠化面积为 10.07 万  $\text{km}^2$ ,约占岩溶区面积的 22.3%,国土面积的 9.4%,共涉及贵州、云南等 8 个省,457 个县(市、区)<sup>[5]</sup>,其中贵州省石漠化面积最大,为 2.47 万  $\text{km}^2$ ,其次是云南省,面积达 2.35 万  $\text{km}^2$ <sup>[5]</sup>。由此可见,目前石漠化和土壤侵蚀仍是区域突出的生态环境问题,对区域的可持续发展和脱贫攻坚带来巨大的挑战。前人研究发现石漠化和土壤侵蚀受地形影响较大,尤其是坡度对于二者的影响更加显著<sup>[6]</sup>。进行岩溶区不同坡度范围内石漠化和土壤侵蚀的定量分析,理清二者的关系对石漠化和土壤侵蚀精准治理具有重要的参考价值,对于岩溶区的生态、经济、政治等各方面健康发展具有非凡意义。

非岩溶区较早开展土壤侵蚀研究,体系较为完善,但岩溶区土壤侵蚀与石漠化研究工作开展较晚,且由于岩溶区具有较大的空间异质性并存在地上流失和地下漏失两种情况,野外定位观测难度较大,其影响因素以及定量评价等一些科学、技术问题仍需要进一步的解决<sup>[7]</sup>。近年来很多学者在岩溶区石漠化和土壤侵蚀定量评价以及影响因素分析等方面做了较多研究。在石漠化和土壤侵蚀影响因子研究方面,Chen 等<sup>[8]</sup>以西南岩溶流域为例采用交替因子模型探究各个因子对于土壤侵蚀的响应,发现坡度、植被覆盖与管理因子、水土保持因子与土壤侵蚀量呈正相关。Li 等<sup>[9]</sup>利用数学统计的方法研究岩溶山区流域岩性—地貌对于产沙量的影响,结果表明控制年产沙量的主要岩性—地貌因子为岩溶覆盖率、水系密度、

地形起伏等。Huang 等<sup>[6]</sup>以西南后寨河为例,应用 GIS 技术对岩溶流域土地退化的发生机制进行预测,认为坡面坡度、海拔是影响石漠化的重要因素。在石漠化和土壤侵蚀关联性方面,王济等<sup>[10]</sup>利用室内模拟的方法探讨不同裸岩率下我国西南地区的土壤侵蚀特征,结果表明坡面输沙率和土壤侵蚀量随着裸岩率的升高而降低。罗旭玲等<sup>[11]</sup>进行了贵州沿河县不同岩性影响下土壤侵蚀和石漠化关系研究,研究认为在不同岩性背景下石漠化和土壤侵蚀不存在单一相关性。Dai 等<sup>[12]</sup>采用人工试验方法探究石漠化地区裸露边坡径流和侵蚀过程,发现地表产沙量随着裸岩率增加先增加后减少。彭旭东等<sup>[13]</sup>通过人工模拟的方法探究岩溶区石漠化过程中地表地下产沙特征,发现随着石漠化强度加剧其地表越不易发生侵蚀,而石漠化强度达到一定程度时土壤流失以地下漏失为主。以上研究大多是探究影响石漠化和土壤侵蚀的影响因素或者是通过试验模拟的方法和从岩性角度研究石漠化和土壤侵蚀的关系,而从坡度方面对二者的分布特征和关系进行探讨的较少。

坡度较大将会使得土壤在受到外力作用时,极易发生流失,如不加强坡面保护,将会诱发严重的石漠化问题。由于岩溶断陷盆地区地形变化急剧,坡度因子对于该区域石漠化和土壤侵蚀的影响将更为显著。因此,本研究借鉴前人的研究成果,利用 RUSLE 模型进行南洞地下河流域土壤侵蚀评价、借助于像元二分法模型评价石漠化状况尝试回答以下科学问题:(1)典型岩溶流域石漠化和土壤侵蚀强度如何。(2)典型岩溶流域不同坡度下石漠化和土壤侵蚀分布特征及存在何种关系,以期为政府部门进行石漠化和土壤侵蚀防治提供科学依据。

## 1 研究区概况

南洞地下河流域隶属于云南省红河哈尼族彝族自治州蒙自市、开远市和个旧市,流域面积约 1 618  $\text{km}^2$ ,属珠江流域红水河上游南盘江水系,年径流量约 2.59 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,是西南地区第三大地下河系统<sup>[14]</sup>,

也是最为典型的岩溶流域。

南洞地下河流域位于北回归线附近(图 1),属于典型的亚热带季风气候,年均温 20.2℃<sup>[15]</sup>。降雨因地貌差异存在明显的垂直地带性,盆地地区多年平均降雨量约为 800 mm,高原区约为 1 200 mm,主要集中在 6—9 月,季节差异显著,干湿季分明<sup>[16]</sup>。在地质构造方面,区域位于康滇菱形板块东南角,受西北、近南北两条断裂和红河大断裂带的影响,其宏观地形由断陷盆地与周边的岩溶高原和丘陵组成<sup>[17-18]</sup>。在岩性方面,东部高原山区和西部盆地底部均为三叠系中统碳酸盐岩,第三系、第四系沉积物主要分布于盆地内<sup>[18]</sup>,其中裸露型岩溶区面积约为 950 km<sup>2</sup>,占区域总面积 59%,覆盖型岩溶区面积约为 668 km<sup>2</sup>,占区域总面积 41%。裸露型岩溶区土壤多是由石灰岩、白云岩、泥质灰岩发育而成,覆盖型岩溶区的土壤则是由砂页岩发育而成也包括古近系以来的沉积物,主要土类为石灰土、紫色土、红壤<sup>[15]</sup>。总体上该区域植被覆盖度较低,原有森林植被遭受破坏,现存森林大多是人工林,植被类型以灌丛为主,主要包括:矮灌丛、疏林灌丛、荒草灌丛<sup>[15]</sup>。

区域人口与经济活动主要集中于盆地地区,山区人口较少,经济活动以种植业为主,农民收入水平较低。同时由于陡坡开荒、过度垦殖等人类活动的严重破坏,岩溶山区生态环境严重退化,土壤侵蚀、石漠化问题突出。根据王宇等<sup>[19]</sup>在云南的调查研究显示,2014 年蒙自市重度石漠化面积达 759.52 km<sup>2</sup>。虽然近年来地方政府采取了一系列措施来改善区域生态环境状况,但是石漠化形势依然严峻,土壤侵蚀问题仍旧不可忽视。

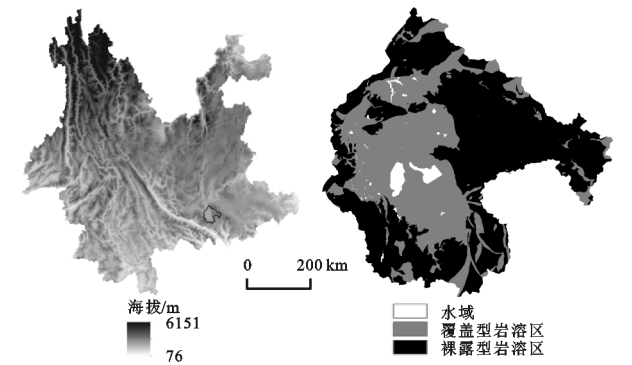


图 1 南洞地下河流域区位图及岩溶类型

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

本研究所采用的基础数据主要包括区域地质图、2016 年日降水数据、土壤类型和质地数据、高程数据 (DEM)、以及 Landsat8 数据,数据来源见表 1。

表 1 数据来源

数据类型	来源	网址
区域地质图	修改自蒋勇军等 <sup>[20]</sup>	
日降水数据	寒区旱区科学数据中心	http://westdc.westgis.ac.cn/
土壤类型和质地	寒区旱区科学数据中心	http://westdc.westgis.ac.cn/
DEM	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/
Landsat8	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/

### 2.2 RUSLE 模型

本文采用广泛应用的 RUSLE 模型计算土壤侵蚀模数及土壤侵蚀量,其表达式如下:

$$A=R\times K\times L\times S\times C\times P\tag{1}$$

式中: $A$  为土壤侵蚀模数; $R$  为降雨侵蚀力因子; $K$  为土壤可蚀性因子; $L$  为坡长因子; $S$  为坡度因子; $C$  为植被覆盖与管理因子; $P$  为水土保持措施因子。

因岩溶区域特殊的地质构造以及石漠化现象的存在,RUSLE 模型的传统算法在一定程度上会高估土壤侵蚀量。因此 Gao 等<sup>[21]</sup>基于 Dai 等<sup>[12]</sup>提出的地表沉积物与裸岩率的关系对 RUSLE 模型进行了修正,使其适宜于岩溶区土壤侵蚀评价,其修正方法如下:

$$A=(1-0.076^2\times a)\times R\times K\times L\times S\times C\times P\tag{2}$$

式中: $a$  的取值方法见表 2。

表 2 不同裸岩率下  $a$  的取值

裸岩率/%	<20	21~30	31~50	51~70	71~90	>90
$a$	10	25	40	60	80	95

根据研究区实际情况,本研究中覆盖型岩溶区土壤侵蚀模数的计算采用公式(1),裸露型岩溶区土壤侵蚀模数的计算采用公式(2)。

(1) 降雨侵蚀力因子。降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力<sup>[22]</sup>。降雨侵蚀力的计算一般采用经典算法 EI30,但是该算法需要大量的自记降雨资料,一般难以获取。因此许多学者提出了降雨侵蚀力的简易算法。胡续礼等<sup>[23]</sup>的研究表明 CRE-AMS 模型计算降雨侵蚀力具有较高的精度。

$$R=1.03\times P_i^{1.51}\left(P_i>P_0\right)\tag{3}$$

式中: $P_i$  为日降水量; $P_0$  为侵蚀性降水量阈值。根据杨子生在滇东北的研究,区域内侵蚀性降雨的基本雨量标准为 9.2 mm<sup>[21]</sup>。

(2) 土壤可蚀性因子。土壤可蚀性因子是指土壤抵抗流水冲刷和侵蚀的能力。对于  $K$  值的计算比较成熟的有 Wischmeier 提出的田间实测法和诺谟图法以及 EPIC 模型,但是由于田间实测法要耗费大量的人力,财力,许多学者通过研究证明了诺谟图法不适合中国土壤可蚀性因子的计算<sup>[24]</sup>。因此本研究  $K$  值的计算选择



Williams 提出的 EPIC 模型<sup>[25]</sup>,其计算公式如下:

$$K=0.1317\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256\text{SAN}\left(1-\frac{\text{SIL}}{100}\right)\right]\right\}\times\left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA}+\text{SLA}}\right)^{0.3}\times\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\times\left[1-\frac{0.7\text{SN}}{\text{SN}+\exp(22.9\text{SN}-5.51)}\right]\tag{4}$$

式中:SAN 为砂粒含量百分比;SIL 为粉砂含量百分比;CLA 为黏粒含量百分比;C 为有机质含量百分比,SN=1-SAN/100。

(3) 坡度坡长因子。地形对于土壤侵蚀具有较大的影响,地形平坦能够降低重力势能,进而减小土壤侵蚀发生的可能性,相反地形高差大则会增加重力势能,在一定程度上就会增加土壤侵蚀风险。利用研究区 30 m 分辨率的 DEM 数据采用刘斌涛<sup>[26]</sup>提出的西南土石山区坡度因子的修正算法以及张宏鸣研发的 LS-TOOL 进行坡度 S 和坡长 L 因子的计算,

表 3 不同土地利用类型下的 C 值

土地利用类型	林地	果园	草地	灌木	旱地	温室	三七用地*	建设用地	裸岩	水域
C	0.006	0.04	0.04	0.01	0.22	0.1	0.15	0	0	0

注:在土地利用类型划分时,发现在山区有许多三七遮阳大棚,其所采取的水土保持措施与其他用地显著不同,为了提高土壤侵蚀的模拟精度,依据实地考察结果对其 C 因子和后文的 P 因子进行赋值。

(5) 水土保持措施因子。水土保持措施因子是指采取专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值,其值在 0~1 之间,0 表明不发生水土流失,

表 4 不同土地利用下的 p 值

土地利用类型	林地	果园	草地	灌木	旱地	温室	三七用地*	建设用地	裸岩	水域
P	1	0.7	1	1	0.4	0.15	0.2	0	0	0

2.3 石漠化遥感解译

从地理空间数据云获取 Landsat 8 数据,在 ENVI 5.3 中经过辐射定标、大气校正等处理后,计算南洞地下河流域归一化植被指数(NDVI),计算方法如下:

$$\text{NDVI}=\frac{\text{NIR}-R}{\text{NIR}+R}\tag{10}$$

式中:NIR 为近红外波段;R 为红波波段。

在地质图的辅助下,对南洞地下河流域岩溶区 NDVI 图层进行裁剪以计算裸岩率。采用像元二分法模型,在置信度为 5%,95% 区间内,计算植被覆盖度(FVC),公式如下:

$$\text{FVC}=\frac{\text{NDVI}-\text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max}-\text{NDVI}_{\min}}\tag{11}$$

式中:NDVI<sub>min</sub> 为 NDVI 最小值;NDVI<sub>max</sub> 为 NDVI 最大值。

根据裸岩率与植被覆盖度的关系计算得到南洞地下河流域岩溶区裸岩率。

$$\text{裸岩率}=1-\text{FVC}\tag{12}$$

其计算方法如下

$$\text{LS}=L\times S\tag{5}$$

$$L=(\lambda/22.13)^{\alpha}\tag{6}$$

$$\alpha=\beta/(\beta+1)\tag{7}$$

$$\beta=\sin\theta/[3\sin\theta^{0.8}+0.56]\tag{8}$$

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta\leqslant5^{\circ})\\16.8\sin\theta-0.50 & (5^{\circ}<\theta\leqslant10^{\circ})\\20.204\sin\theta-1.2404 & (10^{\circ}<\theta\leqslant25^{\circ})\\29.582\sin\theta-5.607 & (\theta>25^{\circ})\end{cases}\tag{9}$$

式中:θ 为坡度;λ 为坡长,α 为坡长因子指数。

(4) 植被覆盖与管理因子。植被覆盖与管理因子是土壤侵蚀的抑制性因子,充足的植被覆盖与良好的管理措施有助于减缓土壤侵蚀速率,减少土壤侵蚀量。目前对于 C 值的计算还未有统一方法,参照蔡崇法<sup>[27]</sup>、许月卿<sup>[28]</sup>等人的研究结合研究区的实际情况进行 C 因子赋值,赋值方法见表 3。

1 表示未采取任何水土保持措施<sup>[29]</sup>。P 因子一般是根据土地利用类型进行赋值,根据许月卿<sup>[28]</sup>、杨子生<sup>[30]</sup>等的研究以及野外观测 P 值赋值方法见表 4。

参照《DD2004—02 区域环境地质调查总则》,以及有关石漠化遥感解译分级标准(表 5)<sup>[31-32]</sup>,根据裸岩率进行石漠化等级划分。

表 5 石漠化划分标准

裸岩率/%	<30	30~50	50~70	>70
石漠化等级	无	轻度	中度	重度

将以上有关土壤侵蚀的 6 个因子图层及裸岩率分布图统一至 30 m 分辨率进行土壤侵蚀和石漠化强度分析。

3 结果与分析

3.1 石漠化与土壤侵蚀强度分析

根据前文裸岩率的计算以及石漠化等级划分标准进行南洞地下河流域岩溶区石漠化等级划分,得到南洞地下河流域石漠化分布图(图 2)。2016 年,南洞地下河流域裸露型岩溶区面积约 950 km<sup>2</sup>,石漠化面积达 740.64 km<sup>2</sup>,其发生率为 77.96%,为石漠化的高发地区。该区域轻度石漠化面积最小,为 191.02 km<sup>2</sup>,发生率为

20.11%,重度石漠化面积次之,为 244.11 km<sup>2</sup>,发生率为 25.70%,中度石漠化面积最大,为 305.51 km<sup>2</sup>,发生率为 32.16%(表 6)。因此南洞地下河流域岩溶区石漠化等级

以中度和重度为主,该结果与涂杰楠等<sup>[33-34]</sup>在南洞地下河流域南部和东山生态治理区以及王宇等<sup>[19]</sup>在云南的石漠化调查结论存在一致性。

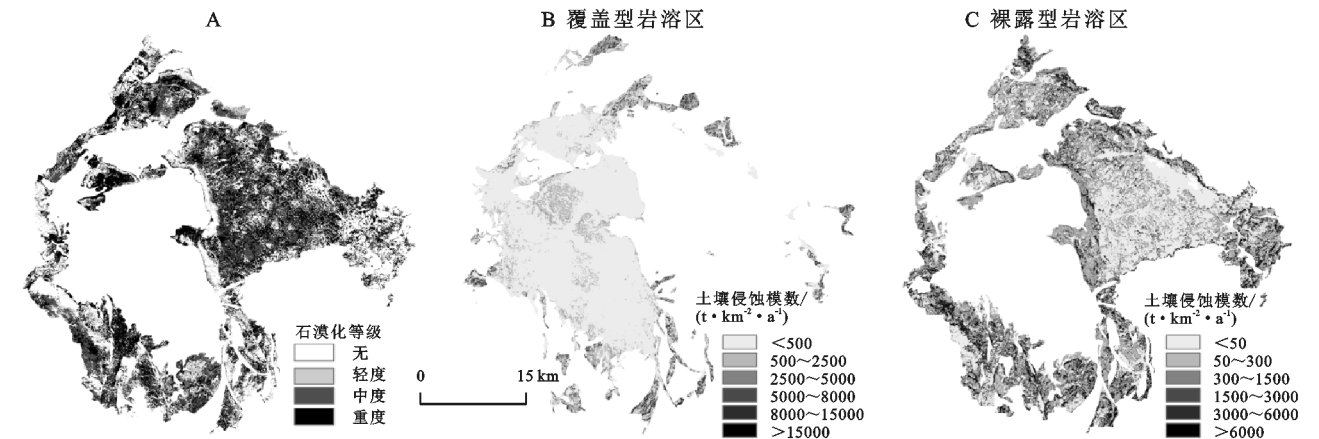


图 2 南洞地下河流域石漠化和土壤侵蚀模数状况

在区域地质图辅助下将南洞地下河流域土壤侵蚀图分为覆盖型岩溶区和裸露型岩溶区。参照 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级中水力侵蚀分类分级标准》和 SL461—2009《岩溶地区水土流失综合治理标准》分别对南洞地下河流域覆盖型岩溶区和裸露型岩溶区进行土壤侵蚀等级划分。覆盖型岩溶区土壤侵蚀面积为 444.54 km<sup>2</sup>,发生率为 66.55%,土壤侵蚀模数为 688.41 t/(km<sup>2</sup>·a)(图 2)。根据前人对地势较为平坦的非岩溶区域的研究,土壤侵蚀模数大致在 462~1 918 t/(km<sup>2</sup>·a)范围内<sup>[35-36]</sup>。该区域以微度侵蚀为主,随着土壤侵蚀等级的升高,土壤侵蚀面积减小。其中微度侵蚀面积为 276.30 km<sup>2</sup>,发生率为 41.36%,轻度侵蚀面积为 118.01 km<sup>2</sup>,发生率为 17.67%。中度、重度和极强度面积较小,分别为 27.39 km<sup>2</sup>,13.80 km<sup>2</sup>,8.37 km<sup>2</sup>。剧烈侵蚀面积最小,为 0.67 km<sup>2</sup>,发生率仅为 0.10%(表 7)。

裸露型岩溶区土壤侵蚀面积为 688.86 km<sup>2</sup>,发生率为 72.51%,土壤侵蚀模数为 1 096.35 t/(km<sup>2</sup>·a)(图 2)。前人对于贵州、广西、云南等岩溶区侵蚀模数的计算稳定在 880~2 870 t/km<sup>2</sup><sup>[37-38]</sup>,本研究结果与此存在较大一致性。该区域土壤侵蚀以轻度和中度为主,侵蚀面积随着侵蚀等级的升高先增大后减小。中度侵蚀面积最大为 273.55 km<sup>2</sup>,发生率为 28.79%,其次是轻度侵蚀,为 139.34 km<sup>2</sup>,发生率为 14.67%。强度土壤侵蚀面积为 102.78 km<sup>2</sup>,发生率为 10.82%。微度、极强度土壤侵蚀面积较小,为 76.26 km<sup>2</sup>,65.20 km<sup>2</sup>,发生率为 8.03%,6.86%。剧烈侵蚀面积最小,为 31.73 km<sup>2</sup>,发生率仅为 3.34%(表 8)。

3.2 裸露型岩溶区不同坡度下石漠化和土壤侵蚀强度分析

根据岩溶区水土流失综合治理标准<sup>[39]</sup>,将坡度

划分为<5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°, >35°等6个等级。裸露型岩溶区石漠化面积随着坡度等级的升高先增加后减少,主要分布在 5°~25°坡度范围内,该范围内石漠化面积约占石漠化总面积的 78.77%(表 9)。

表 6 石漠化面积及发生率

等级	无	轻度	中度	重度
面积/km <sup>2</sup>	209.36	191.02	305.51	244.11
发生率/%	22.04	20.11	32.16	25.70

表 7 覆盖型岩溶区土壤侵蚀面积发生率

等级	微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈
面积/km <sup>2</sup>	276.30	118.01	27.39	13.80	8.37	0.67
发生率/%	41.36	17.67	4.10	2.07	1.25	0.10

表 8 裸露型岩溶区土壤侵蚀面积及发生率

等级	微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈
面积/km <sup>2</sup>	76.26	139.34	273.55	102.78	65.20	31.73
发生率/%	8.03	14.67	28.79	10.82	6.86	3.34

石漠化面积在 8°~15°坡度等级内最大,为 248.02 km<sup>2</sup>,其次是 15°~25°范围内,为 184.34 km<sup>2</sup>。>35°坡度等级内石漠化面积最少,仅为 13.53 km<sup>2</sup>。土壤侵蚀面积也随着坡度等级的升高先增加后减少,也主要分布在 5°~25°坡度范围内(表 10)。该范围内土壤侵蚀面积占总面积的 78.48%,其中最大面积发生在 8°~15°坡度范围内,为 222.85 km<sup>2</sup>。>35°坡度范围内土壤侵蚀面积最小,仅 19.75 km<sup>2</sup>。这除了与各个坡度等级的分布面积有关外,还与人类活动密切相关。5°~25°坡度范围内,人类生产活动频繁,生态环境面临极大的挑战,因此土壤侵蚀面积较大,石漠化面积也较大。石漠化发生率随着坡度等级的升高而降低,

在<5°坡度范围内石漠化发生率最高,为 86.15%,最低是在>35°范围内,为 61.77%。这与土地开垦的难易程度密切相关,坡度平缓区,开垦难度小,不合理的人类活动使得石漠化发生率较高,相反坡度较陡,开发利用困难,人类活动较少,且大部分区域实施了退耕还林,石漠化发生的概率就低。土壤侵蚀发生率随着坡度的升高而升高,原因在于坡度越高土壤侵蚀的风险就越大,一经扰动极易发生土壤侵蚀。

表 9 南洞地下河流域不同坡度下石漠化面积及发生率

坡度	<5°	5°~8°	8°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
面积/km <sup>2</sup>	91.90	151.07	248.02	184.34	51.79	13.53
发生率/%	86.15	85.23	79.53	71.71	65.77	61.77

表 10 南洞地下河流域不同坡度下土壤侵蚀面积发生率

坡度	<5°	5°~8°	8°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
面积/km <sup>2</sup>	61.40	116.88	222.85	200.90	67.08	19.75
发生率/%	34.64	65.94	71.46	78.15	85.19	90.18

3.3 裸露型岩溶区石漠化和土壤侵蚀分布特征耦合分析

3.3.1 不同坡度下石漠化区的土壤侵蚀状况 将不同坡度等级下石漠化发生区的土壤侵蚀面积以及土壤侵蚀发生率进行统计。从整体上来说,土壤侵蚀主要发生在坡度为 5°~25°轻中度石漠化区(表 11,图 3)。中度石漠化区的土壤侵蚀面积最大,可达 207.28 km<sup>2</sup>。轻度石漠化区的面积次之,为 168.13 km<sup>2</sup>。重度石漠化区面积最少,为 118.64 km<sup>2</sup>。虽然轻中度石漠化区相较于重度石漠化区地表遭受破坏的程度较低,但是由于重度石漠化区土层薄,土壤总量少,土壤侵蚀的面积就会偏小。从坡度方面进行分析:<25°坡度范围内土壤侵蚀面积随着石漠化等级升高先增加后减少,中度石漠化区土壤侵蚀面积达到最大。在坡度>25°范围内土壤侵蚀面积随着石漠化等级的升高而降低,轻度石漠化区土壤侵蚀面积最大。在各个坡度等级范围内,石漠化区的土壤侵蚀发生率则随着石漠化等级的升高而降低,这是因为随着石漠化等级的升高,地表裸露程度越来越高,土壤存有量越来越少,因此在整个坡面范围内土壤侵蚀的发生率随着石漠

化等级的升高而降低。

3.3.2 不同坡度下土壤侵蚀区的石漠化状况 为了统计不同坡度范围内土壤侵蚀发生区的石漠化状况,将坡度、石漠化和土壤侵蚀图层在 ArcGIS 中再次进行叠加分析。从整体上来看:南洞地下河流域石漠化主要发生在 5°~25°范围内的轻中度土壤侵蚀区(表 12,图 4)。中度侵蚀区石漠化面积最大为 198.49 km<sup>2</sup>,轻度侵蚀区石漠化面积次之,为 108.40 km<sup>2</sup>,强度侵蚀区石漠化面积为 73.54 km<sup>2</sup>。微度、极强度、剧烈侵蚀区石漠化面积分别为 57.67 km<sup>2</sup>,42.71 km<sup>2</sup>,17.03 km<sup>2</sup>。从坡度方面进行分析:石漠化面积在各个坡度范围内随着土壤侵蚀等级的升高先增加后减少,在中度土壤侵蚀区石漠化面积达到最大。这主要是因为中度土壤侵蚀区,地表裸露程度偏高,地表缺少植被保护,土层日渐变薄,石漠化面积增多。在各个坡度范围内土壤侵蚀区的石漠化发生率与土壤侵蚀等级关系复杂,二者之间并不存在单一相关关系,但是大致为微度、轻度、中度土壤侵蚀区石漠化发生率较高,强度、极强度、剧烈土壤侵蚀区石漠化发生率偏低。发生率最高的地区为<5°的轻度土壤侵蚀区,发生率最低的为坡度<5°的剧烈土壤侵蚀区。这主要是因为等级较高的土壤侵蚀一般发生在植被覆盖度低、坡度较陡,但是土壤存有量较大的区域。南洞地下河流域近年来实施石漠化治理工程,虽然植被在一定程度上得到了恢复,但由于该区域的土壤大部分由碳酸盐岩风化形成,土层较薄,所以石漠化主要发生在微度、轻度、中度土壤侵蚀区。

表 11 不同坡度下石漠化区土壤侵蚀发生率 %

发生率	石漠化等级		
	轻度	中度	重度
<5°	72.92	58.65	45.38
5°~8°	84.69	64.60	49.21
8°~15°	88.00	67.66	49.32
15°~25°	90.64	71.70	48.80
25°~35°	94.52	75.94	50.34
>35°	97.38	78.56	52.50

表 12 不同坡度下土壤侵蚀区石漠化发生率 %

发生率	土壤侵蚀等级					
	微度	轻度	中度	强度	极强度	重度
<5°	81.98	85.24	80.39	61.29	40.88	11.48
5°~8°	81.01	77.63	83.47	71.87	57.75	39.01
8°~15°	74.98	70.11	76.57	74.28	61.53	45.57
15°~25°	65.73	67.58	64.65	72.93	65.34	49.25
25°~35°	56.90	70.52	58.73	64.08	70.35	53.66
>35°	42.20	62.29	45.91	59.80	65.85	66.49

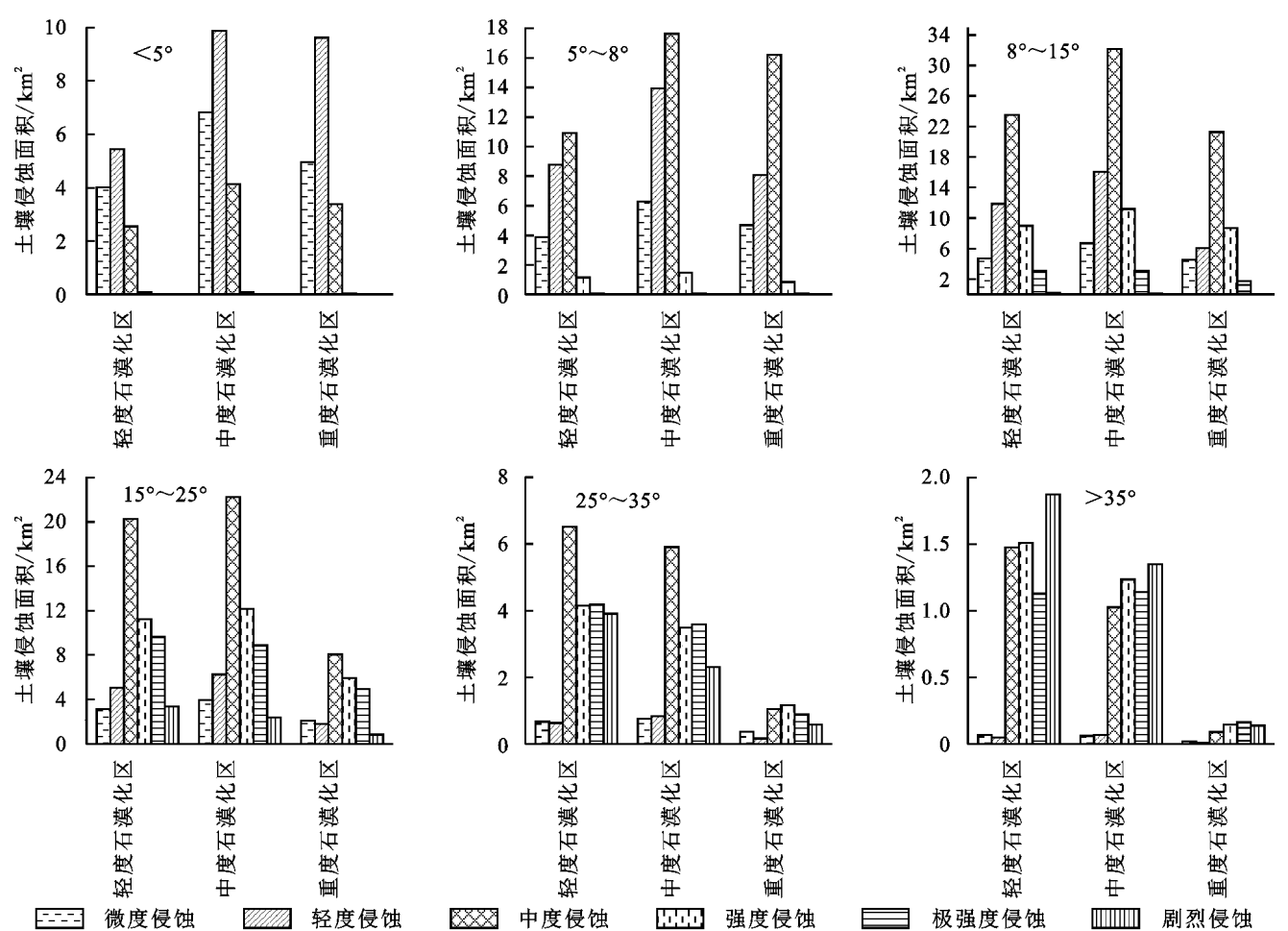


图3 不同坡度下石漠化地区各等级土壤侵蚀面积

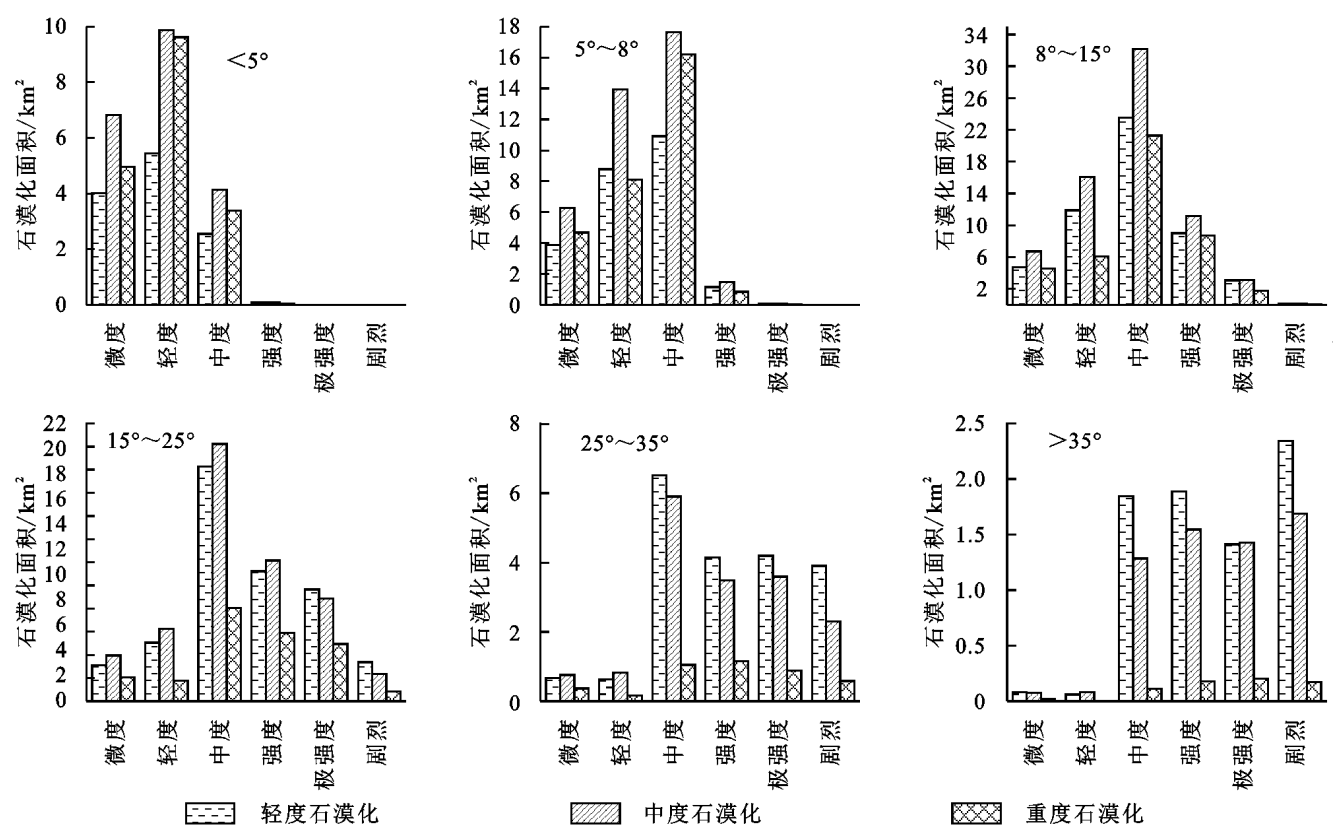


图4 不同坡度下土壤侵蚀地区各等级石漠化面积



## 4 讨论

(1) 本文在对南洞地下河流域石漠化和土壤侵蚀进行定量评价的基础上,并对坡度影响下二者的分布特征和关系进行分析,揭示了  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  坡度范围内是石漠化和土壤侵蚀的高发区域,同时揭示了在裸露型岩溶区土壤侵蚀主要发生在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  坡度范围内的轻中度石漠化区,而石漠化主要发生在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  坡度范围内的轻中度土壤侵蚀区。区域中  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  坡度范围内土地利用类型以耕地、建设用地为主,因此该范围内土壤受到扰动的可能性较大,在人类活动影响下,石漠化和土壤侵蚀风险较高。轻度和中度石漠化地区地表遭受破坏,土壤抵御侵蚀的能力降低,在降雨和其他因子的扰动下极易发生土壤侵蚀。重度石漠化区处于石漠化的后期阶段,地表裸露程度较高,土壤几乎流失殆尽,因此土壤侵蚀的面积偏小。中度、轻度和强度侵蚀区石漠化面积较大主要是在土壤侵蚀的中期阶段,地表缺少相应的保护措施,同时在石漠化区采取相应的治理措施也会使得土壤侵蚀的等级降低。岩溶区生态环境状况复杂,其遭受破坏后投资量大,恢复周期长。因此要做好区域石漠化和土壤侵蚀防治工作,尤其要密切关注  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  坡度范围内的石漠化和土壤侵蚀状况,防止无石漠化向轻度石漠化的转移,以及中度和重度石漠化的治理。

(2) 本文利用 RUSLE 模型进行覆盖型岩溶区土壤侵蚀评价,利用修正后的 RUSLE 模型进行裸露型岩溶区土壤侵蚀评价,主要是考虑到南洞地下河流域石漠化问题突出,基岩裸露率较高,如果直接利用该模型将会使得土壤侵蚀量被高估,因此采用以基岩裸露率为基础的修正模型使得计算结果更加合理。但是 RUSLE 模型只针对坡面侵蚀,而未考虑岩溶区特有的地下漏失量,因此也存在一定的局限性,在以后的研究中除了要考虑基岩裸露率对于岩溶区土壤侵蚀的影响,更要关注地下漏失量的计算。此外,石漠化和土壤侵蚀除了与坡度有关外,还受控于植被覆盖、降雨、岩性等多个因子,因此在以后的研究中还要加强对于其他因子的分析,为石漠化治理提供理论支撑。

## 5 结论

(1) 该区域石漠化面积为  $740.64\text{ km}^2$ ,以中度石漠化为主,亟需采取石漠化治理措施。区域中覆盖型岩溶区土壤侵蚀面积为  $444.54\text{ km}^2$ ,以微度侵蚀为主。裸露型岩溶区土壤侵蚀面积为  $688.86\text{ km}^2$ ,以

轻中度土壤侵蚀为主。覆盖型岩溶区无论土壤侵蚀发生率和土壤侵蚀模数均低于岩溶区,一是因为前者主要位于坝区,高差小,二是因为岩溶山区生态环境脆弱,当地村落为了发展经济,进行陡坡开荒。

(2)  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  范围内是人类生产生活的重点区域,地表条件易于遭到改变,其面临的生态环境压力巨大,因此在裸露型岩溶区,石漠化和土壤侵蚀主要分布在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  坡度范围内,其中石漠化主要发生在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  轻中度土壤侵蚀区,土壤侵蚀主要发生在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  轻中度石漠化区。

(3) 裸露型岩溶区各个坡度等级范围内,土壤侵蚀区的石漠化发生率与土壤侵蚀等级关系复杂,并不存在单一相关关系,因为石漠化是由多种因素导致,并非完全由坡度决定。石漠化区的土壤侵蚀发生率随着石漠化等级的升高而降低,因为前期的剧烈侵蚀导致基岩裸露,土壤存有量会越来越少,石漠化后期甚至会出现无土可流的现象。

### 参考文献:

- [1] 袁道先.西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 龙明忠,吴克华,熊康宁. WEPP 模型(坡面版)在贵州石漠化地区土壤侵蚀模拟的适用性评价[J].中国岩溶, 2014,33(2):201-207.
- [3] 张珊珊,周忠发,孙小涛,等.基于坡度等级的喀斯特山区石漠化与水土流失相关性研究:以贵州省盘县为例[J].水土保持学报,2017,31(2):79-86.
- [4] Huang Q H, Cai Y L. Spatial pattern of Karst rock desertification in the middle of Guizhou Province South-western China [J]. Environmental Geology, 2007, 52 (7):1325-1330.
- [5] 国家林业和草原局.中国·岩溶地区石漠化状况公报 [EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/138/20181214/161609114737455.html>, 2018.
- [6] Huang X F, Zhou Y C, Wang S J, et al. Occurrence mechanism and prediction of rocky land degradation in karst mountainous basins with the aid of GIS technology, a study case in Houzhai River Basin in southwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(6):217-229.
- [7] 李瑞,张弛,顾再柯,等.贵州喀斯特区典型小流域坡面土壤侵蚀与主要影响因子的响应[J].水土保持研究, 2018,25(3):1-5.
- [8] Chen H, Takashi O, Wu P. Assessment for soil loss by using a scheme of alternative sub-models based on the RUSLE in a karst basin of southwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017,16(2):377-389.
- [9] Li Z W, Xu X L, Zhu J X, et al. Effects of lithology



- and geomorphology on sediment yield in karst mountainous catchments [J]. *Geomorphology*, 2019, 343 (15):119-128.
- [10] 王济,蔡雄飞,雷丽,等.不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J].*中国岩溶*,2010,29(1):1-5.
- [11] 罗旭玲,白晓永,谭秋,等.不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析[J].*生态学报*,2018,38(24):8717-8725.
- [12] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. *Catena*, 2017,152:218-226.
- [13] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].*土壤学报*,2016,53(5):1237-1248.
- [14] 王赛男,李建鸿,蒲俊兵,等.气候和人类活动对典型岩溶地下河系统径流年际变化的影响[J].*自然资源学报*, 2019,34(4):759-770.
- [15] 黄晓燕.南洞流域典型岩溶区石漠化遥感动态监测研究[D].广西桂林:广西师范大学,2017.
- [16] 康彦仁.云南南洞地下河系统及水资源开发利用[J].*中国岩溶*,1993,012(4):307-318.
- [17] 覃星铭,蒋忠诚,蓝芙宁,等.南洞地下河最枯径流的周期变化及趋势分析[J].*广西师范大学学报:自然科学版*,2015,33(2):120-126.
- [18] 莫美仙,王宇,李峰,等.云南南洞地下河系统边界及性质研究[J].*中国岩溶*,2019,38(2):173-185.
- [19] 王宇.云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M].北京:地质出版社,2017:133-150.
- [20] Jiang Y J, Wu Y X, Grove C, et al. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunnan, China[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009,109(1):49-61.
- [21] Gao J B, Wang H. Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion:A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China[J]. *Catena*, 2019,172:369-377.
- [22] 杨子生.滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J].*地理科学*,1999,19(3):265-270.
- [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] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子[J].*山地学报*,1999,17(S1):10-15.
- [25] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion—sediment yield models[J]. *Soil Technology*, 1997,11(1):43-55.
- [26] 刘斌涛,宋春风,史展,等.西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J].*中国水土保持*,2015,000(8):49-51.
- [27] 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].*水土保持学报*,2000,14(2):19-24.
- [28] 许月卿,邵晓梅.基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算:以贵州省猫跳河流域为例[J].*北京林业大学学报*, 2006,28(4):67-71.
- [29] 王萌,刘云,宋超,等.基于 RUSLE 模型的 2000—2010 年长江三峡库区土壤侵蚀评价[J].*水土保持通报*, 2018,38(1):12-17.
- [30] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的水土保持措施因子[J].*山地学报*,1999,16(S1):22-24.
- [31] 曹建华,袁道先,童立强.中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J].*草业科学*,2008,25(9):40-50.
- [32] 王宇,张贵.滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J].*地球科学进展*,2003,18(6):933-938.
- [33] 涂杰楠,童立强,王珊珊.南洞地下河流域南部岩溶石漠化空间分布特征分析[J].*中国岩溶*,2016,35(5):566-573.
- [34] 涂杰楠,王毅,童立强,等.基于高分辨率遥感影像的石漠化演变趋势分析:以蒙自东山生态治理区为例[J].*中国岩溶*,2018,37(6):900-907.
- [35] 胡刚,宋慧,石星军,等.基于 RUSLE 的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J].*地理科学*,2018,38(4):610-617.
- [36] 李雪莹,杨俊,温海明,等.基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀量估算:以辽宁省阜新市为例[J].*水土保持通报*, 2015,35(1):199-204.
- [37] 孙德亮,赵卫权,李威,等.基于 GIS 与 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究:以贵州省为例[J].*水土保持通报*,2016,36(3):271-276.
- [38] Zeng C, Wang S, Bai X, et al. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology, using RUSLE with GIS[J]. *Solid Earth Discussions*, 2017,8(4):1-26.
- [39] 中华人民共和国水利部.岩溶地区水土流失综合治理技术标准[M].北京:中国水利水电出版社,2009:3-4.