

DOI: 10.5846/stxb201807251583

罗旭玲,白晓永,谭秋,陈欢,冉晨,习慧鹏.不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析.生态学报 2018, 38(24): 8717-8725.

Luo X L , Bai X Y , Tan Q , Chen H , Ran C , Xi H P. Effect of lithology background on the correlation between soil erosion and rock desertification. Acta Ecologica Sinica 2018, 38(24): 8717-8725.

## 不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析

罗旭玲<sup>1,2</sup>,白晓永<sup>1,2,\*</sup>,谭秋<sup>1</sup>,陈欢<sup>1,2</sup>,冉晨<sup>1,2</sup>,习慧鹏<sup>2</sup>

1 贵州师范大学 地理与环境科学学院,贵阳 550025

2 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550081

**摘要:**喀斯特地区土壤侵蚀与石漠化问题备受关注,为了定量分析不同岩性下土壤侵蚀与石漠化的关联性,为研究区优化生态环境提供决策依据,以贵州省沿河县为例,以 Landsat 遥感影像、1:5000 地形图、岩性和石漠化为基础数据,采用监督分类方法、表面分析和栅格计算,提取出土壤侵蚀的各项指标因子。对不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析,结果显示:(1)沿河县石漠化面积为 284.44 km<sup>2</sup>,占全县国土面积的 11.52%。已发生石漠化等级以轻度、中度、强度较显著;土壤侵蚀面积为 1838.97 km<sup>2</sup>,占全县总面积的 74.48%,已经发生土壤侵蚀等级以轻度、中度、强度侵蚀为主。(2)灰岩与碎屑岩互层和连续性白云中,石漠化与土壤侵蚀发生面积较显著,分别占石漠化与土壤侵蚀面积的 57.99%和 50.45%。(3)非碳酸盐岩、灰岩夹碎屑岩、灰岩与白云岩混合、灰岩与碎屑岩互层、连续性白云岩和石灰岩上,石漠化等级与土壤侵蚀程度在潜在和轻度呈负相关、轻度和中度石漠化内呈正相关、中度和极重度石漠化内呈负相关,土壤侵蚀等级与石漠化在微度和轻度侵蚀内呈正相关,在轻度和剧烈侵蚀内呈负相关,其中灰岩与白云岩混合和连续性白云岩上,石漠化等级与土壤侵蚀存在单一的负相关。

**关键词:**岩性;土壤侵蚀;石漠化;关联性分析

## Effect of lithology background on the correlation between soil erosion and rock desertification

LUO Xuling<sup>1,2</sup>, BAI Xiaoyong<sup>1,2,\*</sup>, TAN Qiu<sup>1</sup>, CHEN Huan<sup>1,2</sup>, RAN Chen<sup>1,2</sup>, XI Huipeng<sup>2</sup>

1 Guizhou Normal University School of Geography and Environmental Science, Guiyang 550025, China

2 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract:** The occurrence of both soil erosion and rocky desertification in karst areas of China have attracted much attention. In order to quantify the correlation between soil erosion and rocky desertification under different lithologies and to establish a basis for optimizing the area's ecosystem, the present study investigated the correlation between soil erosion and rocky desertification in Yanhe County (Guizhou Province, China) using Landsat remote-sensing data, a 1:5000 topographic map, and both lithology and rocky desertification data. Supervised classification, surface analysis, and grid calculation were used to extract a variety of soil erosion indices. (1) Rocky desertification affected 284.44 km<sup>2</sup> of Yanhe County, thereby accounting for 11.52% of the county's total land area, and the grade of rocky desertification was mild, moderate, and strong. Meanwhile, soil erosion affected 1838.97 km<sup>2</sup>, thereby accounting for 74.48% of the county's total land area, and the grade of soil erosion was mostly mild, moderate, and intense. (2) Both rocky desertification and soil erosion were predominant in the interbedded and continuous limestone and clastic rock, with 57.99% and 50.45% of the rocky

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502102);中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-036);“西部之光”人才培养计划(A类)(〔2018〕X);贵州省科技计划(2017-2966)

收稿日期:2018-07-25; 修订日期:2018-11-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@126.com

<http://www.ecologica.cn>

desertification and soil erosion found in this area , respectively. (3) Non-carbonate rocks , limestone clastic rocks , limestone and dolomite mixtures , limestone and clastic interbeds , continuous dolomite and limestone , rocky desertification grade , and degree of soil erosion were all negatively correlated with mild , positively correlated with Light and moderate rocky desertification , and negatively correlated with moderate and extremely severe rocky desertification. Soil erosion grade was positively correlated with rocky desertification in Potential and Light erosion. There was a negative correlation between Light and severe erosion. Among the limestone and dolomite mixtures and continuous dolomite , rocky desertification grade was negatively correlated with the degree of soil erosion.

**Key Words:** lithology; soil erosion; rock desertification; relevance analysis

西南典型喀斯特地区是一种脆弱的生态环境,土壤侵蚀和石漠化已成为制约西南喀斯特山区社会经济可持续发展的关键问题<sup>[1-7]</sup>。喀斯特山地土壤流失具有地上地下重叠、地表产流产沙少等特点<sup>[8]</sup>,研究喀斯特地区石漠化与土壤侵蚀变得极其重要。

为了更好的防治石漠化与土壤侵蚀的危害,当前对特定喀斯特地貌背景下的研究有很多。例如:何永彬等<sup>[9]</sup>对西南喀斯特山地土壤侵蚀研究探讨;邓艳等<sup>[10]</sup>西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被关键技术进展与建议;戴全厚等<sup>[11]</sup>对西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展的分析;李瑞玲等<sup>[12]</sup>对贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析,等研究表明石漠化治理与土壤侵蚀息息相关。张信宝等<sup>[13]</sup>对贵州石漠化空间分布与喀斯特、岩性、降水和人口密度的关系研究;白晓永等<sup>[14]</sup>对贵州碳酸盐岩岩性基地对土地石漠化时空演变的控制;李阳兵等<sup>[1]</sup>对中国典型石漠化地区土地利用与石漠化的关系的研究,以上研究均取得较好的成果。喀斯特地区土壤侵蚀和石漠化受坡度影响<sup>[15]</sup>,由石漠化<sup>[16]</sup>与土壤侵蚀<sup>[17]</sup>的概念可知,影响因子不同对两者的作用存在差异。

因此,本文在借鉴前人的研究基础上,以沿河县为例,利用 ArcGIS 软件对土壤侵蚀、石漠化、岩性三者进行叠加分析,对石漠化与土壤侵蚀空间分布、不同岩性下的石漠化与土壤侵蚀分布状况、土壤侵蚀与石漠化相关性进行分析,以期获得较好的分析结果,为研究区石漠化与土壤侵蚀防治工作提供指导依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

沿河土家族自治县位于贵州省黔东北(图 1),隶属铜仁市,108°03'49"—108°37'5"E,28°12'45"—29°05'23"N。县内属于中亚热带季风湿润气候区,年均温 13—18℃,年降水量 1050—1220 mm,年日照 1100—1400 h。岩性以碳酸盐岩类(石灰岩、白云质灰岩、白云岩等)为主,碳酸盐岩类与碎屑岩类交错分布,岩性组合较为复杂<sup>[18]</sup>。在全县面积中,山地占 69.9%,丘陵占 27%,槽坝占 3.1%,属于典型的岩溶山区<sup>[19-20]</sup>。沿河县水土流失得到有效控制<sup>[21]</sup>。位于乌江流域下游的沿河县比流域上游石漠化等级较高,但近几年来石漠化面积有减少,石漠化处于好转趋势<sup>[21]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据源

DEM 用于土壤侵蚀 LS 因子计算,Landsat OLI 2015 年遥感影像用于土地利用解译,NDVI 用于 C 因子计算,均来自地理空间数据云。用于 R 因子计算的降雨数据,来自中国气象数据共享网,用于 K 因子计算的沙粒、粉粒、粘粒、有机质成分,来自 HWSO 数据库。土壤侵蚀所有因子具有统一的投影(WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N)和分辨率(30 m)。沿河县岩性图和石漠化分布图源于喀斯特科学数据中心。数据详细来源及网站见表 1。

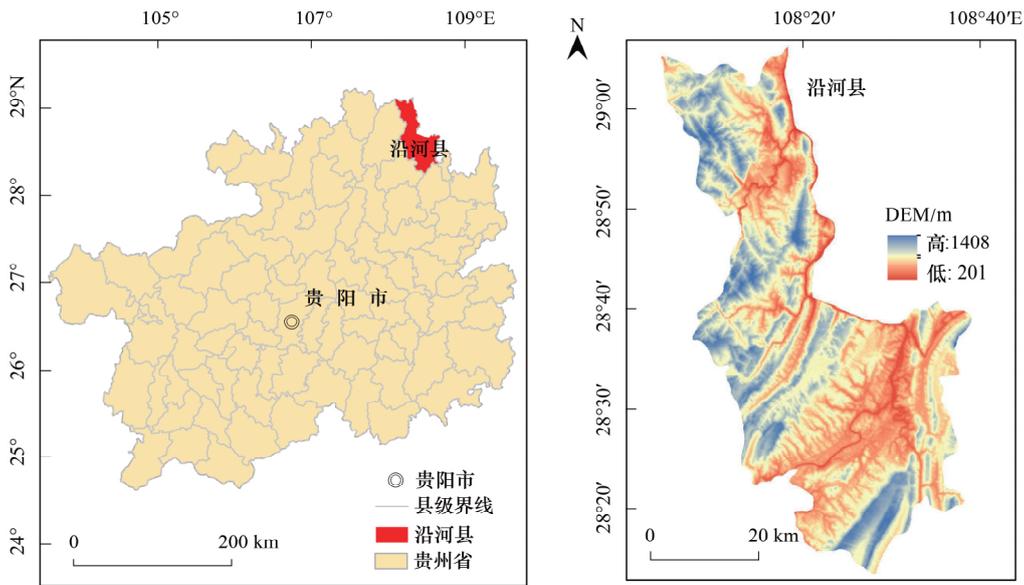


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

表 1 主要数据来源

Table 1 Main data sources

数据名称 Data name	数据来源 Data sources	数据来源网址链接 Data source URL link
数值高程模型 Digital elevation model	地理空间数据云	<a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
Landsat	地理空间数据云	<a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
植被指数 Normalized difference vegetation index	地理空间数据云	<a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
降雨数据 Rainfall data	中国气象数据共享网	<a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a>
土壤侵蚀力因子 Soil erosion factor	HWSD 数据库	<a href="http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/">http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/</a>
岩性图 Lithology map	喀斯特科学数据中心	<a href="http://www.karstdata.cn/">http://www.karstdata.cn/</a>
石漠化分布图 Rock desertification distribution map	喀斯特科学数据中心	<a href="http://www.karstdata.cn/">http://www.karstdata.cn/</a>

### 1.2.2 土壤侵蚀计算

研究计算公式为 Wischemier 和 Smith 于 1958 年提出<sup>[22]</sup>,经美国农业部修正的通用土壤流失方程 (USLE)。表达式如下:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中  $A$  为年土壤侵蚀量  $R$  为降雨侵蚀力因子  $K$  为土壤侵蚀力因子  $LS$  为地形因子  $C$  植被与作物管理因子  $P$  土壤保持措施因子。

#### (1) 降雨侵蚀力因子

研究采用周伏建、黄炎和<sup>[23-24]</sup>等人根据南方实测数据提出的  $R$  值计算式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792P_i) \quad (2)$$

式中  $P_i$  为月降水量,由气象数据共享网下载的贵州省 19 个气象站点的月值数据,利用 EXCEL 表格统计获得,借助 ArcGIS 地图代数几何计算工具,按照公式(2)计算得每个站点的年降雨侵蚀力  $R$ ,进行 Kriging 插值得到  $R$  值的空间分布图,对  $R$  重采样(30 m)和裁剪。

## (2) 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性因子  $K$  值是经过试验获得的定量数值,通常以标准小区单位降水侵蚀力所造成的土壤流失量获得,但在该区域大规模布设天然小区很难做到,因此本研究以 Williams 等<sup>[25]</sup>发展的仅由土壤颗粒和土壤有机碳组成数据来估算  $K$  值,其表达式为:

$$K = 0.1317 \times \{0.2 + 0.3 \times \exp[-0.0256Sa(1 - Si/100)]\} \times \left(\frac{Si}{Si + Cl}\right)^{0.3} \\ \times \left[1 - \frac{0.25Cor}{Cor + \exp(3.72 - 2.95Cor)}\right] \times \left[1 - \frac{0.75Sn}{Sn + \exp(-5.51 + 22.9Sn)}\right] \quad (3)$$

式中, $Sa$  为沙粒(%), $Si$  为粉粒(%), $Cl$  粘粒(%), $Cor$  为有机质(%), $Sn = 1 - \frac{Sa}{100}$ 。

## (3) 地形坡长坡度因子

地形地貌对土壤侵蚀有着重要的影响,区域不同,USLE 模式中斜坡长度因子( $L$ )和坡度因子( $S$ )有变化。本文根据水流功率理论和物理过程,以及充分考虑了径流和水文过程的影响,选择以下公式<sup>[26-27]</sup>进行计算  $LS$ 。

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (5)$$

$$\lambda = \text{flowacc} \times \text{cellsize} \quad (6)$$

$$m = n/(1 + n) \quad (7)$$

$$n = (\sin\theta/0.0896) / (3.0 \times \sin^{0.8}\theta + 0.56) \quad (8)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin\theta + 0.03 & (\theta < 5) \\ 16.8 \times \sin\theta - 0.50 & (5 \leq \theta < 14) \\ 21.9 \times \sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 14) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $L$  为坡长因子; $m$  为可变坡长指数;22.13 为标准小区坡长; $S$  为坡度因子; $\theta$  为坡度。

## (4) 植被与作物管理因子

采用 Van der Knijff M 提出的利用 NDVI 确定  $C$  因子的方法<sup>[28-29]</sup>。两者关系为:

$$C = \exp\left[-\alpha \frac{\text{NDVI}}{\beta - \text{NDVI}}\right] \quad (10)$$

式中, $\alpha = 2$ , $\beta = 1$ ,NDVI 为归一化植被指数。

## (5) 土壤保持措施因子

水土保持措施因子的值在 0—1 之间。贵州喀斯特山区,海拔落差较大,坡度较陡,水土保持措施常与土地利用类型紧密相关。所以,把水体、建设用地和裸地赋值为 0,水田 0.15,旱地 0.5,其他用地 0.8,有林地、灌木用地、草地为 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 石漠化与土壤侵蚀空间分布

研究区石漠化和土壤侵蚀空间分布情况,通过 ArcGIS 空间分析得出。喀斯特面积为 623.04 km<sup>2</sup>,占总面积的 25.24%;非石漠化面积为 1845.76 km<sup>2</sup>,占总面积的 74.76%(表 2)。沿河县石漠化面积达 284.44 km<sup>2</sup>,占全县国土面积的 11.52%。已发生石漠化现象区域,中度石漠化面积最大,为 135.87 km<sup>2</sup>,占石漠化面积的 47.77%;轻度石漠化与重度石漠化次之,面积分别为 126.33、21.58 km<sup>2</sup>,分别占石漠化面积的 44.41%、7.59%;极重度石漠化分布面积最小,为 0.66 km<sup>2</sup>,仅占 0.23%。分析得出,沿河县已发生石漠化等级以轻度、中度和重度为主。石漠化变化面积整体呈现随等级的增加而减少。

表 2 沿河县喀斯特与非喀斯特区石漠化分布情况

Table 2 Distribution of rocky desertification in karst and non-karst areas along Yanhe County

石漠化等级 Karst desertification grade	喀斯特区 Karst area					非石漠化区 NKRDA
	潜在石漠化 PKRD	轻度石漠化 LKRDA	中度石漠化 MKRD	重度石漠化 SKRD	极重度石漠化 ESKRD	
面积 Area / km <sup>2</sup>	338.60	126.33	135.87	21.58	0.66	1845.76
占总面积比例 Proportion of total area / %	13.72	5.12	5.50	0.87	0.03	74.76
占石漠化面积比例 Proportion of rocky desertification area / %	—	44.41	47.77	7.59	0.23	—

非石漠化 = 无石漠化 + 非喀斯特; PKRD, 潜在石漠化 Potential Rock Desertification; LKRDA 轻度石漠化 Light Rock Desertification; MKRD, 中度石漠化 Medium Rock Desertification; SKRD, 重度石漠化 Severe Rock Desertification; ESKRD, 极重度石漠化 Extremely Severe Rock Desertification; NKRDA 非石漠化区 Non-Rock Desertification Area

土壤侵蚀面积 1838.97 km<sup>2</sup>, 占全县总面积的 74.48%, 微度侵蚀面积为 629.83 km<sup>2</sup>, 占全县总面积的 25.51% (表 3)。已经发生土壤侵蚀现象区域, 轻度侵蚀面积分布最广, 1637.69 km<sup>2</sup>, 占土壤侵蚀面积的 89.05%; 中度侵蚀和强度侵蚀面积次之, 分别为 154.15, 28.51 km<sup>2</sup>, 占土壤侵蚀面积的 8.38%, 1.55%。极强度侵蚀面积为 13.63 km<sup>2</sup>, 占侵蚀面积 0.74%。剧烈侵蚀面积最少, 为 4.99 km<sup>2</sup>, 仅占土壤侵蚀面积的 0.27%。分析数据可知, 沿河县境内土壤侵蚀较严重, 以轻度和中度侵蚀为主。随侵蚀等级的升高, 其面积越小。

表 3 沿河县水土流失情况

Table 3 Soil and water loss in Yanhe County

土壤侵蚀等级 Soil erosion grade	微度侵蚀 PSE	轻度侵蚀 LSE	中度侵蚀 MSE	强度侵蚀 SSE	极强度侵蚀 ESSE	剧烈侵蚀 FSSE
面积 Area / km <sup>2</sup>	629.83	1637.69	154.15	28.51	13.63	4.99
占总面积比例 Proportion of total area / %	25.51	66.34	6.24	1.15	0.55	0.20
占土壤侵蚀面积比例 Proportion of soil erosion area / %	—	89.05	8.38	1.55	0.74	0.27

PSE, 微度侵蚀 Potential soil erosion; LSE, 轻度侵蚀 Light soil erosion; MSE, 中度侵蚀 Medium soil erosion; SSE, 强度侵蚀 Strength soil erosion; ESSE, 极强度侵蚀 Extremely strength soil erosion; FSSE, 剧烈侵蚀 Fierce soil erosion

## 2.2 不同岩性下的石漠化与土壤侵蚀分布状况

对岩性、石漠化和土壤侵蚀在 ArcGIS 中进行叠加分析, 统计得到不同岩性所占全县、石漠化和土壤侵蚀面积比例 (表 4)。非碳酸盐岩分别占石漠化与土壤侵蚀面积的 5.08%, 14.75%, 土壤侵蚀在碳酸盐岩上分布较广, 但石漠化分布却是最少。灰岩与碎屑岩占石漠化面积 7.50%, 占土壤侵蚀面积 9.38%。灰岩与白云岩混合面积最少, 占沿河县面积 8.18%, 占土壤侵蚀面积 8.69%, 是土壤侵蚀分布最少的岩性, 占石漠化面积 11.56%。该区人类活动较强, 导致石漠化面积较大, 但因地表较缓, 所以土壤侵蚀较小。灰岩夹碎屑岩互层面积最大, 占沿河县面积 30.66%, 分别占石漠化与土壤侵蚀面积的 36.53% 和 30.90%, 岩性基底大, 加上人类活动与自然环境的影响, 因此, 石漠化和土壤侵蚀面积分布均为最大。连续性石灰岩占石漠化面积 21.46%, 占土壤侵蚀面积 19.55%, 连续性石灰岩分别占石漠化与土壤侵蚀面积的 17.86% 和 16.74%。由分析可知, 同一岩性上石漠化与土壤侵蚀发生不具有单一的相关性, 石漠化发生比例小的地方土壤侵蚀并不是最小, 说明石漠化与土壤侵蚀的发生有着一定的滞后性。

## 2.3 石漠化与土壤侵蚀相关性分析

### 2.3.1 不同岩性下各石漠化等级区的土壤侵蚀

依据沿河县岩性、石漠化和土壤侵蚀叠加分析得到的数据, 在 EXCLE 表格中统计得到表 5 和图 2。土壤侵蚀主要发生在潜在、轻度和中度石漠化区 (表 5, 图 2), 在非碳酸盐岩、灰岩夹碎屑岩、灰岩与碎屑岩互层和连续性石灰岩中, 潜在石漠化区侵蚀面积最大, 分别为 18.40, 18.53, 112.08, 56.01 km<sup>2</sup>。因为中度石漠化区植

被较发育, 土被基本连续, 土壤侵蚀明显, 所以, 中度石漠化区侵蚀面积比轻度石漠化区要大。极重度石漠化区最少, 其中非碳酸盐上极重度石漠化区侵蚀面积  $0.06 \text{ km}^2$  最小, 土壤侵蚀与石漠化等级在中度至极重度石漠化区间呈负相关, 因为石漠化等级越高, 岩石裸露率越大, 表层土壤越薄, 会出现少有或无土可流。灰岩与白云岩混合和连续性白云岩上, 在潜在石漠化区面积最大, 分别为  $38.91 \text{ km}^2$  与  $94.44 \text{ km}^2$ , 在极重度石漠化区最小, 分别为  $0.17 \text{ km}^2$  与  $0.07 \text{ km}^2$ 。土壤侵蚀面积随着石漠化等级的增加而减少, 存在负相关。

表 4 不同岩性下土壤侵蚀与石漠化面积比例/%

Table 4 Proportion of soil erosion and rocky desertification area under different lithologies

岩性 Lithology	非碳酸盐 岩组合 NCRC	灰岩夹碎屑 岩组合 LCRC	灰岩与白云岩 混合组合 MCLD	灰岩与碎屑 岩互层 LLRI	连续性白云 岩组合 CD	连续性石灰 岩组合 CL
占全县的面积比例 Proportion of the area of the county	14.96	10.34	8.18	30.66	19.09	16.76
占石漠化面积比例 Proportion of karst desertification area	5.08	7.50	11.56	36.53	21.46	17.86
占土壤侵蚀面积比例 Proportion of soil erosion area	14.75	9.38	8.69	30.90	19.55	16.74

NCRC, 非碳酸盐岩组合 Non-carbonate rock combination; LCRC, 灰岩夹碎屑岩组合 Limestone clastic rock combination; MCLD, 灰岩与白云岩混合组合 Mixed combination of limestone and dolomite; LLRI, 灰岩与碎屑岩互层 Limestone and lastic rock interbed; CD, 连续性白云岩 Continuous dolomite; CL, 连续性石灰岩 Continuous limestone

表 5 不同岩性下各石漠化等级区已发生土壤侵蚀面积/ $\text{km}^2$ 

Table 5 Soil erosion area has occurred in each rocky desertification grade area under different lithologies

岩性 Lithology	潜在石漠化 PKRD	轻度石漠化 LKR D	中度石漠化 MKRD	重度石漠化 SKRD	极重度石漠化 ESKRD
非碳酸盐岩组合 NCRC	18.40	4.88	8.39	1.48	0.06
灰岩夹碎屑岩组合 LCRC	18.53	10.80	11.10	0.63	0.38
灰岩与白云岩混合组合 MCLD	38.91	17.89	12.86	1.92	0.17
灰岩与碎屑岩互层 LLRI	112.08	42.49	50.37	7.40	0.58
连续性白云岩组合 CD	94.44	29.83	21.79	7.21	0.07
连续性石灰岩组合 CL	56.01	18.23	27.94	3.00	0.12

### 2.3.2 不同岩性下各土壤侵蚀等级区的石漠化

通过 ArcGIS 叠置分析, 导出面积进行 Excel 统计得到表 6 和图 3。沿河县石漠化主要发生在微度和轻度侵蚀区。各岩性上不同土壤侵蚀等级区石漠化主要发生在微度、轻度和中度。石漠化发生主要分布在灰岩与碎屑岩互层、连续性白云岩、连续性石灰岩上, 其面积发生最大值在轻度侵蚀区, 分别为  $72.20$ 、 $42.88 \text{ km}^2$  和  $30.96 \text{ km}^2$ , 非碳酸盐岩上分布最少。各岩性中土壤侵蚀等级与石漠化在微度侵蚀与轻度侵蚀内呈正相关, 在轻度与剧烈侵蚀内呈负相关。石漠化治理是预防潜在石漠化向石漠化的转移, 以及对已发生石漠化的改善。石漠化的改善有利于固土持水, 所以轻度侵蚀区石漠化面积最大。由表 6 可知, 各土壤侵蚀等级区, 石漠化面积最大的岩性是灰岩与碎屑岩互层, 灰岩与碎屑岩互层主要是人类居住聚集的岩层, 地表人类活动(耕种, 开采, 放牧等)强烈, 再加上灰岩与碎屑岩互层本地较大, 所以, 这可能是石漠化较高的原因。石漠化面积最小的岩性为非碳酸盐岩。研究区非碳酸盐岩分布不是最少, 但石漠化分布是最少的, 说明石漠化主要发生在碳酸盐岩上。

## 3 结论

(1) 沿河县石漠化面积为  $284.44 \text{ km}^2$ , 占全县国土面积的  $11.52\%$ 。已发生石漠化现象区域, 以轻度、中度、强度较显著, 分别占石漠化面积的  $44.41\%$ ,  $47.77\%$ ,  $7.59\%$ , 石漠化现象较轻。土壤侵蚀面积为

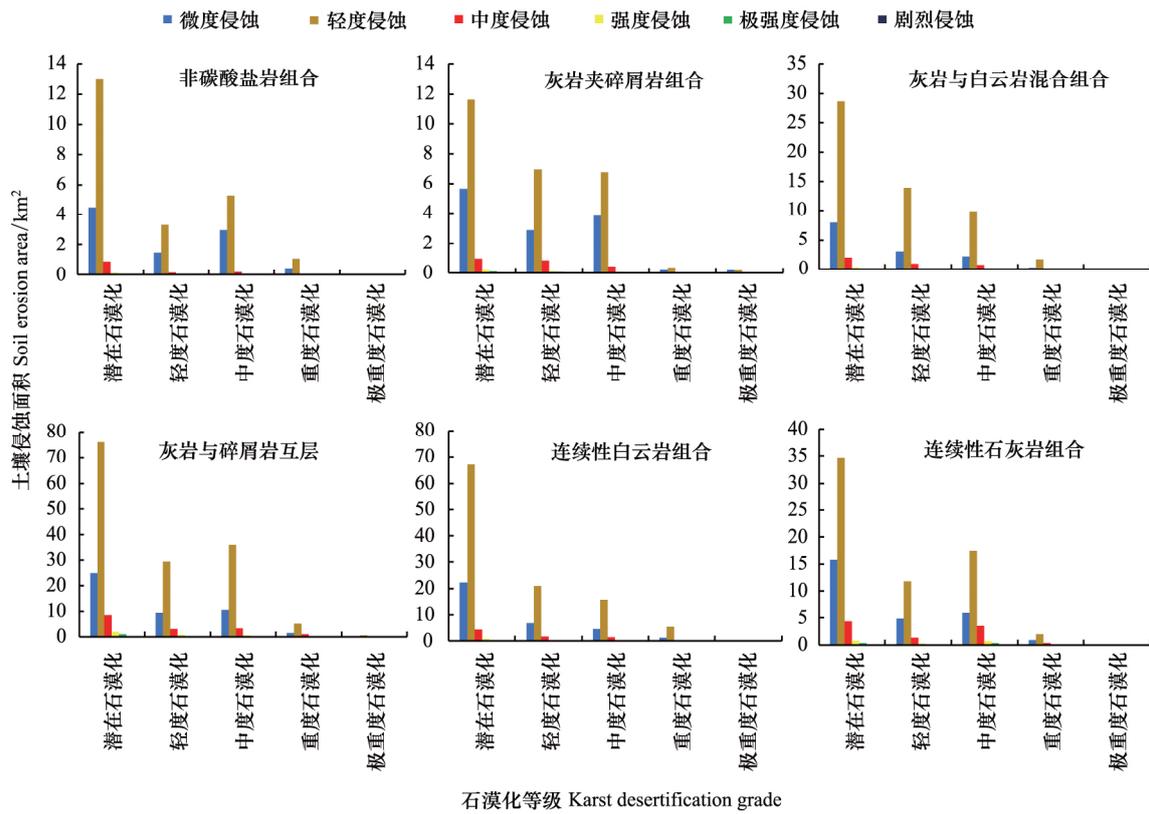


图 2 不同岩性下各石漠化等级区域的土壤侵蚀

Fig.2 Soil erosion in different rocky desertification areas under different lithologies

NCRC 非碳酸盐岩组合 Non-carbonate rock combination; LCRC 灰岩夹碎屑岩组合 Limestone clastic rock combination; MCLD 灰岩与白云岩混合组合 Mixed combination of limestone and dolomite; LLRI 灰岩与碎屑岩互层 Limestone and lastic rock interbed; CD 连续性白云岩 Continuous dolomite; CL 连续性石灰岩 Continuous limestone ;PSE 微度侵蚀 Potential soil erosion; LSE 轻度侵蚀 Light soil erosion; MSE 中度侵蚀 Medium soil erosion; SSE 强度侵蚀 Strength soil erosion; ESSE 极强度侵蚀 Extremely strength soil erosion; FSE 剧烈侵蚀 Fierce soil erosion.潜在石漠化 Potential rock desertification; LKRD 轻度石漠化 Light rock desertification; MKRA 中度石漠化 Medium rock desertification; SKRD 重度石漠化 Severe rock desertification; ESKRD 极重度石漠化 Extremely severe rock desertification; NKRD 非石漠化区 Non-rock desertification area

1838.97 km<sup>2</sup>, 占全县总面积的 74.48% ,微度侵蚀面积为 629.83 km<sup>2</sup>, 占全县总面积的 25.51%。已经发生土壤侵蚀现象区域, 以轻度、中度、强度侵蚀为主, 分别占沿河县土壤侵蚀面积的 89.05% ,8.38% ,1.55% ,土壤侵蚀程度较严重。

表 6 不同岩性下各土壤侵蚀等级区已发生石漠化面积 /km<sup>2</sup>

Table 6 Rocky desertification area has occurred in each soil erosion grade area under different lithologies

岩性 Lithology	微度侵蚀 PSE	轻度侵蚀 LSE	中度侵蚀 MSE	强度侵蚀 SSE	极强度侵蚀 ESSE	剧烈侵蚀 FSSE
非碳酸盐岩组合 NCRC	4.69	10.12	0.35	0.10	0.03	0.02
灰岩夹碎屑岩组合 LCRC	6.53	15.52	1.17	0.21	0.08	0.03
灰岩与白云岩混合组合 MCLD	5.34	25.12	1.77	0.36	0.09	0.05
灰岩与碎屑岩互层 LLRI	21.02	72.20	7.66	1.40	0.57	0.21
连续性白云岩组合 CD	12.44	42.88	3.96	0.81	0.33	0.1
连续性石灰岩组合 CL	11.42	30.96	5.05	0.95	0.46	0.15

(2) 在不同石漠化等级区, 潜在、轻度和中度石漠化区土壤侵蚀发生面积最大, 重度和极重度石漠化区, 土壤侵蚀发生面积最小, 因为早期剧烈土壤侵蚀发生, 导致石漠化严重区域, 地表可流物质减少。在不同的土

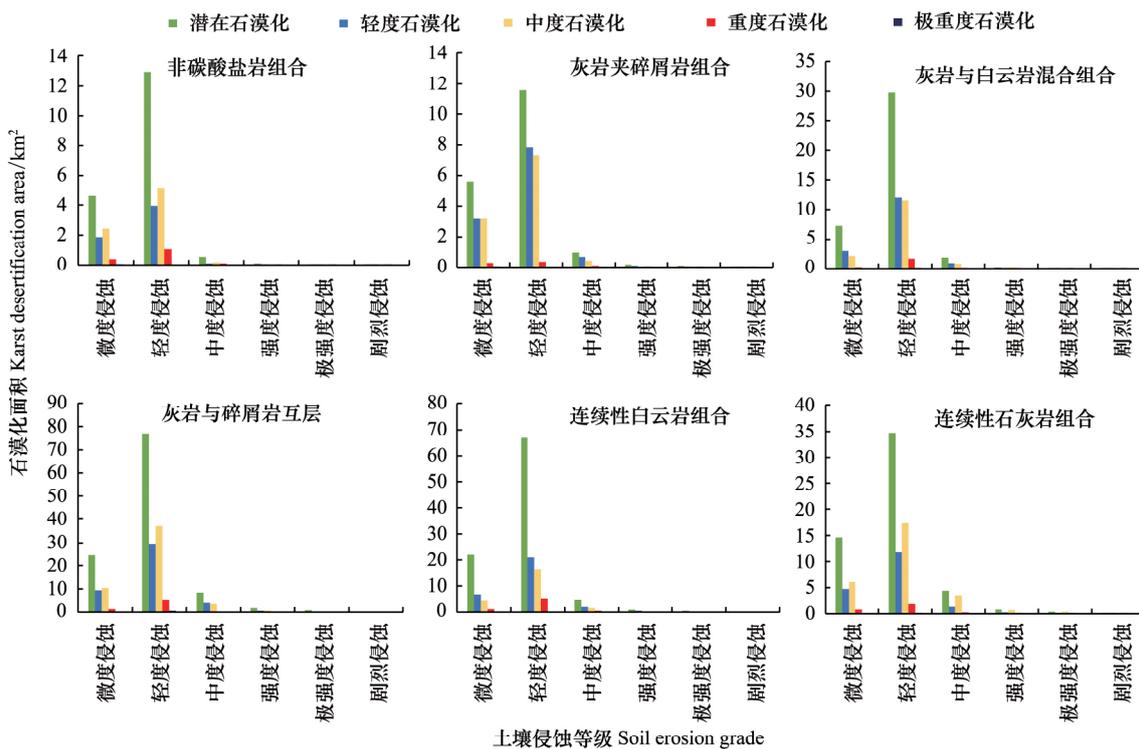


图3 不同岩性下各土壤侵蚀等级区域的石漠化

Fig.3 Rocky desertification in different soil erosion grades under different lithologies

壤侵蚀区,石漠化主要发生在微度和轻度侵蚀区,轻度侵蚀区石漠化发生面积最大。当土壤侵蚀严重区域石漠化发生更加剧烈时,地表土层薄、岩石裸露程度大、植被覆盖率低,土壤侵蚀会逐渐减少。所以,石漠化与土壤侵蚀的发生是受多种因素综合作用的结果。

(3) 各岩性上,石漠化与土壤侵蚀的发生是相互影响的,两者之间没有完全单一正相关和负相关关系。非碳酸盐岩、灰岩夹碎屑岩、灰岩与碎屑岩互层和连续性石灰岩上,石漠化等级与土壤侵蚀在潜在和轻度、中度和极重度石漠化内呈负相关,在轻度和中度石漠化内呈正相关,土壤侵蚀等级与石漠化在微度和轻度侵蚀内呈正相关,在轻度和剧烈侵蚀内呈负相关。灰岩与白云岩混合和连续性白云岩上,石漠化等级与土壤侵蚀存在单一的负相关关系,土壤侵蚀等级与石漠化在土壤侵蚀等级与石漠化在微度和轻度侵蚀内呈正相关,在轻度和剧烈侵蚀内呈负相关。

#### 参考文献(References):

- [1] 李阳兵,白晓永,周国富,兰安军,龙健,安裕伦,梅再美. 中国典型石漠化地区土地利用与石漠化的关系. 地理学报, 2006, 61(6): 624-632.
- [2] Sweeting M. Karst in China: Its Geomorphology and Environment. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [3] Li Y B, Shao J A, Yang H, Bai X Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. Environmental Geology, 2009, 57(3): 621-627.
- [4] 张殿发,王世杰,周德全,李瑞玲. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制. 水土保持通报, 2001, 21(4): 1-5.
- [5] 宋同清,彭晚霞,杜虎,王克林,曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [6] 顾展飞,刘琦,卢耀如. 贵州贞丰—关岭花江喀斯特石漠化过程中岩土体化学元素含量与石漠化差异性关系研究. 中国岩溶, 2016, 35(5): 533-538.
- [7] 陈飞,周德全,白晓永,肖建勇,钱庆欢. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 174-180.

- [8] 张信宝,王世杰,曹建华,王克林,孟天友,白晓永. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
- [9] 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. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2393-2398.
- [10] 邓艳,曹建华,蒋忠诚,周晓东,岳祥飞. 西南岩溶石漠化综合治理水—土—植被关键技术进展与建议. 中国岩溶, 2016, 35(5): 476-485.
- [11] 戴全厚,严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
- [12] 李瑞玲,王世杰,周德全,张殿发,李凤全,周忠发,熊康宁. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [13] 张信宝,王世杰,白晓永,陈伟燕,张思屿. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. 地球与环境, 2013, 41(1): 1-6.
- [14] 白晓永,王世杰,陈起伟,程安云. 贵州碳酸盐岩岩性基底对土地石漠化时空演变的控制. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(4): 691-696.
- [15] 张珊珊,周忠发,孙小涛,冯倩,陈全. 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. 水土保持学报, 2017, 31(2): 79-86.
- [16] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [17] 王德,傅伯杰,赵文武,陈利顶. 土壤侵蚀模型研究中的几个问题. 干旱区地理, 2007, 30(3): 406-413.
- [18] 杨炜,田茂权. 沿河县资源生态环境遥感信息系统. 贵州农业科学, 2003, 31(3): 37-39.
- [19] 舒多友. 沿河县地质灾害特征、成因及防治. 贵州地质, 2003, 20(3): 172-177.
- [20] 梁境. 沿河县区域生态环境质量评价与生态调控的研究[D]. 重庆大学, 2004.
- [21] 陈起伟,熊康宁,兰安军. 乌江流域不同河段石漠化特征对比分析. 铜仁学院学报, 2013, 15(4): 124-128.
- [22] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 1958, 39(2): 285-291.
- [23] 周伏建,陈永葆. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨. 亚热带水土保持, 1989, (2): 58-60.
- [24] 黄炎和,卢程隆,付勤,施悦忠,许建金. 闽东南土壤流失预报研究. 水土保持学报, 1993, 7(4): 13-18.
- [25] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion—sediment yield models. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [26] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, Jia Z W. Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [27] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses——A Guide to Conservation Planning. Beltsville, Maryland, USA: Department of Agriculture, 1978, 537.
- [28] Van der Knijff J M, Jones R J A, Montanarella L. Soil Erosion Risk Assessment in Italy. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999: 54.
- [29] Van der Knijff J M, Jones R J A, Montanarella L. Soil Erosion Risk Assessment in Europe. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000: 34.