

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.012 CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.012

吴文贤, 李渊, 刘子琦. 喀斯特地区安顺市土壤侵蚀时空变化特征及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 359-367.

WU Wenxian, LI Yuan, LIU Ziqi. Characteristics and drivers of spatial and temporal soil erosion in anshun city, karst region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 359-367.

喀斯特地区安顺市土壤侵蚀时空变化特征及驱动因素

吴文贤^{1,2}, 李渊^{1,2,3}, 刘子琦^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 500025; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001;
3. 自然资源部贵州喀斯特山地国土生态与土地利用野外科学观测研究站, 贵州 关岭 561301)

摘要: [目的]探索西南喀斯特地区安顺市土壤侵蚀时空演变规律及土壤侵蚀主控因子,掌握该地区土壤侵蚀状况,有助于该地区石漠化治理和水土资源管理。[方法]采用优化后的 RUSLE 模型估算 2005—2020 年安顺市土壤侵蚀,同时,利用随机森林模型(RF)揭示土壤侵蚀的驱动因子,并估算驱动因子相互作用对 2005—2020 年安顺市土壤侵蚀的影响。[结果]1)2005—2020 年,安顺市低强度土壤侵蚀分布在中部、东南部和东部地区,高强度土壤侵蚀分布在北部和西南部地区。从时间上来看,安顺市土壤侵蚀整体上呈改善趋势,大部分地区土壤侵蚀等级主要由高强度向微强度侵蚀转移,但局部地区存在侵蚀加剧现象。2)石漠化对于安顺市土壤侵蚀有较大的影响,石漠化和土壤侵蚀变化趋势一致。土壤侵蚀随着石漠化强度增加呈先增加后减少趋势。3)安顺市发生土壤侵蚀最主要的土地利用类型为林地、耕地和草地,总体来看,土壤侵蚀速率依次为林地<草地<耕地,耕地水土流失风险较大。4)对土壤侵蚀驱动因子分析显示,植被覆盖与管理因子、水土保持措施因子和石漠化强度为主要驱动因子。驱动因子交互作用结果表明,植被覆盖与管理因子与水土保持措施因子交互作用为主导因素。[结论]2005—2020 年安顺市土壤侵蚀强度整体呈好转趋势,但部分地区存在侵蚀加剧现象,高强度土壤侵蚀主要位于北部和西南部的人类活动较密集地区。植被覆盖、土地利用和石漠化强度是土壤侵蚀主要影响因素,而石漠化治理和水土保持措施能较好地增加植被覆盖,改善安顺市水土流失状况。

关键词: 安顺市; 石漠化; 土壤侵蚀; 随机森林; 驱动因子; 交互作用

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2025)01-0359-09

Characteristics and Drivers of Spatial and Temporal Soil Erosion in Anshun City, Karst Region

WU Wenxian^{1,2}, LI Yuan^{1,2,3}, LIU Ziqi^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 500025, China;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Karst Mountain Land Ecology and Land Use Observation and Research Station, MNR, Guanling, Guizhou 561301, China)

Abstract: [Objective] To explore the spatial and temporal evolution of soil erosion in Anshun City, southwest karst region, as well as the main controlling factors of soil erosion, and to master the soil erosion situation in the region, in order to help the management of rocky desertification and soil and water resources management in the region. [Methods] The optimised RUSLE model was used to estimate soil erosion in Anshun City from 2005 to 2020, while the Random Forest Model (RF) was used to reveal the driving factors of soil erosion, and to estimate the effects of the interactions between the driving factors on soil erosion in Anshun City from 2005 to 2020. [Results] 1) From 2005 to 2020, soil erosion in Anshun City generally showed that low intensity soil erosion was distributed in the central, southeastern and eastern regions, while high intensity soil erosion was distributed in the northern and southwestern regions. In terms of time, soil erosion in

收稿日期: 2024-07-09 修回日期: 2024-08-20 录用日期: 2024-09-10 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-03
资助项目: 国家自然科学基金项目(42201013); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-zk[2024]一般 444 号, 黔科合中引地[2023]005)
第一作者: 吴文贤(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: odst1172024@163.com
通信作者: 李渊(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事喀斯特水文与生态修复研究。E-mail: liyuan7pro@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Anshun City as a whole showed a trend of improvement, soil erosion grade in most of the areas mainly transferred from high to micro intensity erosion, but the erosion exacerbated in some areas. 2) Rocky desertification had a greater impact on soil erosion in Anshun City, and the change trend of rocky desertification was consistent with that of soil erosion. Soil erosion increased first and then decreased with the increase of rocky desertification intensity. 3) The most important land use types in Anshun City where soil erosion occurred were forest land, arable land and grassland, and the overall rate of soil erosion was in the order of forest land < grassland < arable land, with cropland having a higher risk of soil and water runoff. 4) The analysis of the driving factors of soil erosion showed that the vegetation cover and management factor, the factor of soil and water conservation measures and the intensity of rock desertification were the main driving factors. The results of the interactions between the driving factors showed that the interaction between the vegetation cover and management factors and the soil and water conservation measures were the dominant factors. [Conclusion] Soil erosion intensity in Anshun City showed an overall trend of improvement from 2005 to 2020, but there was an increase in erosion in some areas, with high intensity soil erosion being mainly located in the north and southwest areas with high human activity. Vegetation cover, land use and rock desertification intensity are the main influencing factors of soil erosion, while rock desertification control and soil and water conservation measures can better increase vegetation cover and improve soil erosion in Anshun City.

Keywords: Anshun City; rocky desertification; soil erosion; random forests; drivers; interactions

Received: 2024-07-09

Revised: 2024-08-20

Accepted: 2024-09-10

Online(www.cnki.net): 2024-12-03

土壤作为重要环境要素,具有高度敏感性,气候变化和人类活动等因素对土壤产生重大影响^[1]。作为珍贵的自然资源,土壤在陆地生态系统的可持续性中起着重要作用,由于自然状态下土壤形成的时间漫长,所以土壤资源一旦遭到破坏,在短期内则难以恢复^[2]。喀斯特地貌在我国分布广泛,其分布面积可达 $356.3 \times 10^5 \text{ km}^2$,由于其特殊的地质和气候条件,喀斯特地区的环境容量有限,抗干扰能力较弱,稳定性不高,自我调节能力差^[3],导致喀斯特地区呈现出复杂的地貌特点,表现为基岩裸露、土壤存量稀少、土壤形成速率缓慢、土层浅薄且易碎成块状分布,一旦土壤流失,恢复极为困难^[4]。同时,由于喀斯特地区人类的剧烈活动,自然灾害的频繁发生及喀斯特地区特殊的二元水文地质特点使得土壤侵蚀强烈、基岩裸露,导致水土流失严重,该地区呈现石漠化景观^[5]。因而,土壤侵蚀及其导致的石漠化现象成为该区最大的生态环境问题。准确评价喀斯特地区土壤侵蚀及其驱动因素,可为喀斯特地区石漠化治理和土壤资源的长期利用提供科学依据。

目前,对于喀斯特地区土壤侵蚀特征研究,采用的方法主要有基于流域出口监测、基于核素反演和基于模型反演^[6]。但是,基于流域出口监测和基于核素反演存在观测设施及费用昂贵、长期定位观测困难。因此,上述 2 种方法大多用于喀斯特地区小流域土壤侵蚀研究。土壤侵蚀模型作为定量估算土壤流失情

况的快捷有效手段,主要有经验统计模型和物理过程模型,广泛应用于流域或区域尺度的土壤侵蚀评估^[7]。目前,常用的土壤侵蚀模型主要包括 USLE、RUSLE、WEPP、LISEM、SWAT、MUSLE 模型等^[8]。修正通用土壤流失方程(RUSLE)作为公认的、广泛使用的经验土壤侵蚀估算模型,被众多学者^[9]广泛使用。由于 RUSLE 模型具有结构简单、数据易于获取、高精度的估算和低成本等优点,许多学者^[10]将其作为研究西南地区独特且复杂的侵蚀过程的主要工具,能够快速、准确地模拟不同场景下的土壤侵蚀过程及分布特征。但是,由于喀斯特地区独特的二元水文地质特点和石漠化发育的复杂性,使用 RUSLE 模型直接估算喀斯特地区的土壤流失可能高估土壤侵蚀结果^[11]。针对上述情况,在采用 RUSLE 模型对喀斯特地区土壤侵蚀进行估算时,需要结合石漠化因子对 RUSLE 模型进行优化。

鉴于此,本研究拟探讨喀斯特地区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素,主要包括以西南喀斯特地区安顺市为研究地区,利用改进后的 RUSLE 模型估算不同时期土壤侵蚀,定量分析其时空变化特征;结合安顺市石漠化、植被覆盖度和土地利用数据等数据,探讨安顺市土壤侵蚀与其相应关系;利用随机森林量化各种驱动因素对安顺市土壤侵蚀时空差异的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安顺市是贵州省下辖地级市,位于西部区域(25°

21'~26°38' N, 105°15'~106°35' E),地处长江水系乌江流域和珠江水系北盘江流域的分水岭地带(图 1),总面积约 9 267 km²,海拔为 1 200~1 400 m。安顺市属于高原型湿润亚热带季风气候,气候温和宜人,降水充沛,年平均降雨量为 1 360 mm,年平均气温为 14 ℃。作为典型的喀斯特地貌集中分布地区,安顺市喀斯特地貌约占全域总面积 84.9%。

1.2 数据来源

以 2005—2020 年降水、Landsat 8 OLI 卫星影像、土壤属性、土地利用和 DEM 数据(表 1),通过对数据的提取、计算和分析安顺市土壤侵蚀强度,通过随机森林分析土壤侵蚀驱动因子。

1.3 研究方法

1.3.1 RUSLE 模型 喀斯特地区石漠化引起的地表岩石裸露,但 RUSLE 模型在估算该地区土壤侵蚀时没能考虑到基岩裸露导致的土壤流失减少,使得 RUSLE 模型通常高估喀斯特地区的土壤侵蚀量。因此,本研究采用优化后的 RUSLE 模型^[11],进行喀斯特地区土壤侵蚀估算,其模型表达式为:

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

式中:A 为土壤侵蚀模数,t/(hm²·a);R 为降雨侵蚀力因子,(MJ·mm)/(hm²·h·a);K 为土壤可蚀性因子,(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm);LS 为坡长坡度因子(无量纲);C 为植被覆盖与管理因子,无量纲;P 为水土保持措施因子,无量纲;α 为石漠化因子,无量纲。

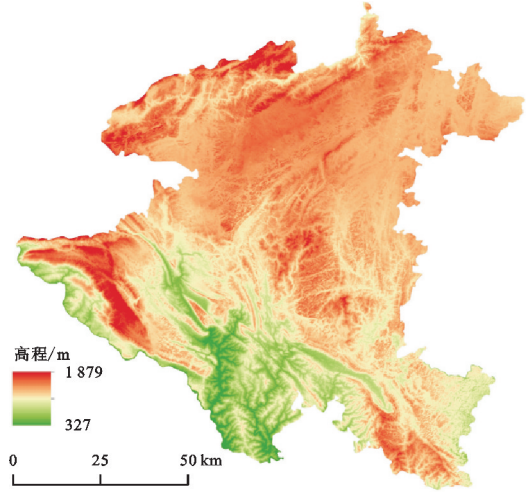


图 1 安顺市区位

Fig.1 Location map of Anshun City

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	年份	来源	备注
DEM	—	地理空间数据云	https://www.gscloud.cn
降水	2005—2020	中国气象数据网	http://data.cma.cn
土地利用	2005—2020	中国科学院资源科学环境数据中心	https://www.resdc.cn
土壤属性	—	世界土壤数据库(HWSD)	https://www.fao.org
Landsat 8 OLI 影像	2005—2020	地理空间数据云	https://www.gscloud.cn

1)降雨侵蚀力因子(R)。R 指降水对土壤侵蚀的影响程度,代表降水和径流对土壤侵蚀的潜在影响力,是土壤水蚀的动力来源。不同 R 模型的计算结果存在区域差异性,因此,采用 WISCHMEIER 等^[12]提出的降雨侵蚀模型,计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10 \left[1.5 \times \log \left(\frac{P_i^2}{P} \right) - 0.8188 \right] \quad (2)$$

式中:R 为降雨侵蚀力因子;P_i和 P 分别为月平均降雨量和年平均降雨量,mm。

2)土壤可蚀性因子(K)。采用 WILLIAMS 等^[13]提出的 EPIC 模型,估算土壤可蚀性因子(K),具体计算公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \times S_d \left(1 - \frac{S_t}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_t}{S_c + S_t} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right) \quad (3)$$

式中:K 单位为美制,需乘以转换系数 0.131 转换为国际制单位;S_d、S_t、S_c分别为土壤砂粒、土壤粉粒和

土壤黏粒质量分数,%;S_n=1-S_d/100。

3)坡长坡度因子 LS。坡长和坡度表示地形对侵蚀和植被的影响,其具体计算公式^[14]为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (4)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ \leq \theta < 5^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 5^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} 10.80 \times \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.80 \times \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.61 \times \sin \theta - 0.06 & \theta > 10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中:L 为坡长因子;S 为坡度因子;λ 为栅格单元投影长度;m 为坡长效应指数;θ 为坡度。

4)植被覆盖与管理因子(C)。C 值模型计算公式^[15]为:

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \times \lg f & 0 < f < 78.3\% \\ 0 & f \geq 78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (8)$$

式中: C 为植被覆盖与管理因子; f 为植被覆盖度; NDVI_{\max} 和 NDVI_{\min} 分别采用累计频率 95% 和 5% 的 NDVI 值。

5) 水土保持措施因子(P)。目前针对 P 因子大多数研究采用赋值法, 因此, 根据前人^[11,16] 研究, 针对不同土地利用类型对 P 因子进行赋值, 水田、旱地、草地、水域、有林地、灌木林、疏林地、其他林地、建设用地、未利用地赋值分别为 0.15、0.4、1.0、1.1、1.0、0.7、0、0。

6) 石漠化因子(α)。根据前人^[17] 研究, 选取植被覆盖度、基岩裸露率、坡度这 3 个关键指标因子, 划分石漠化等级(表 2)。 α 计算公式为:

$$\alpha = 0.076^2 \times T \quad (9)$$

$$f_c = \frac{\text{NDRI} - \text{NDRI}_{\min}}{\text{NDRI}_{\max} - \text{NDRI}_{\min}} \quad (10)$$

式中: α 为石漠化因子; T 为石漠化等级校正系数; f_c 为岩石裸露率; NDRI_{\max} 和 NDRI_{\min} 分别采用累计频率 95% 和 5% 的 NDRI 值。

表 2 石漠化等级划分标准及校正系数

Table 2 Criteria for classifying rocky desertification and the correction factors

石漠化等级	植被覆盖度/%	岩石裸露率/%	坡度/(°)	校正系数
无石漠化	>70	<20	<5	10
潜在石漠化	50~70	20~30	5~8	25
轻度石漠化	30~50	30~50	8~15	40
中度石漠化	20~30	50~70	15~25	60
重度石漠化	<20	>70	15~25	80

1.3.2 随机森林 随机森林(RF)是广泛使用的机器学习方法, 通常用于预测变量和目标变量间复杂关系的数据探索和建模。RF 是基于决策树的集成学习

方法, 通过构建多个决策树来提高预测准确性和稳定性^[18]。RF 中每个决策树的构建都是基于随机样本和随机特征, 此随机性的引入使得 RF 能够避免过拟合问题, 并且具备出色的鲁棒性^[19]。本研究中 RF 算法都将在 Pycharm 2022.1.3 进行编译, scikit-learn 库进行建模。

1.3.3 相关性分析 根据前人^[11] 相关研究表明, 植被覆盖和石漠化强度是影响喀斯特地区土壤侵蚀的重要因子, 因此, 以 2 个因子与安顺市土壤侵蚀时空变化进行相关性分析, 具体计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

式中: R_{xy} 表示变量 x 和 y 的相关系数; x 为第 i 年的植被覆盖和石漠化强度; y 为第 i 年的土壤侵蚀模数; n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀的时空格局与变化特征

由图 2、表 3 可知, 安顺市土壤侵蚀强度空间分布不均, 总体上低强度侵蚀主要分布在中部、东南部和东部地区, 而高强度土壤侵蚀主要分布在北部和西南部地区。由图 3 可以看出, 安顺市土壤侵蚀以微度和轻度为主, 其面积占比高达 60% 以上, 但还存在一定程度的高强度土壤侵蚀。

从时间上来看, 2005—2020 年安顺市土壤侵蚀总体上随时间变化呈逐渐降低趋势。由图 4 可知, 研究期间土壤侵蚀存在高等级向低等级转移现象, 主要转移方向是微度侵蚀和轻度侵蚀, 但也存在一定程度的低强度土壤侵蚀向高强度土壤侵蚀转移。总的来说, 安顺市土壤侵蚀强度明显好转。

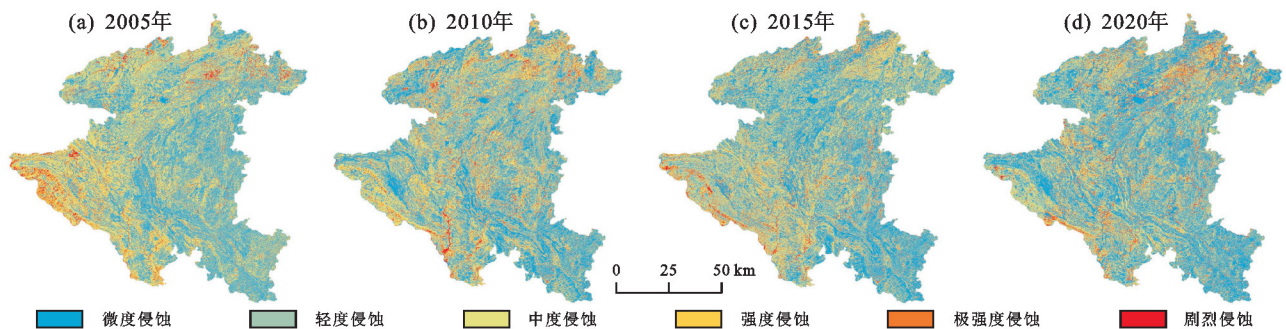


图 2 安顺市 2005—2020 年土壤侵蚀强度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil erosion intensity in Anshun City from 2005 to 2020

2.2 土壤侵蚀强度与石漠化和植被覆盖度相关性分析

由图 5 可知, 2005—2020 年安顺市土壤侵蚀强度与石漠化强度和植被覆盖度相关系数空间分布, 安顺市土壤侵蚀强度与石漠化的空间平均相关系数为

0.12, 呈正相关; 与植被覆盖度的空间平均相关系数为 -0.17, 呈负相关。通过进一步统计分析可知, 土壤侵蚀强度与石漠化呈正相关和负相关的面积分别占安顺市总面积的 59.3% 和 24.2%; 与植被覆盖度呈

正相关和负相关的面积分别占安顺市总面积的 20.2%和 72.1%。与石漠化呈负相关区域和与植被覆盖度呈正相关的少数区域均分布于安顺市东北角和安顺市区附近。安顺市内绝大部分区域的土壤侵蚀强度与植被覆盖度呈负相关,说明植被覆盖度对土壤侵蚀强度有较大的影响。

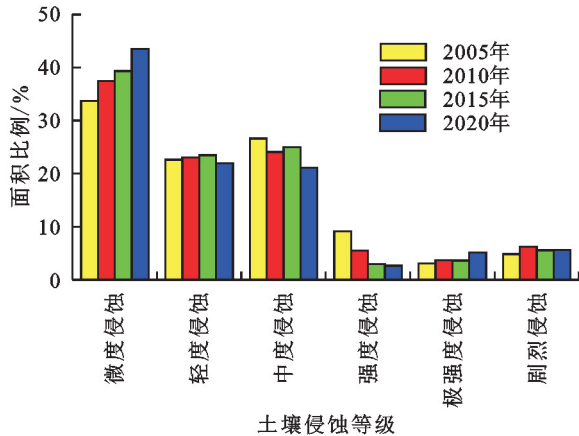


图 3 土壤侵蚀强度占比

Fig.3 Soil erosion intensity as a percentage

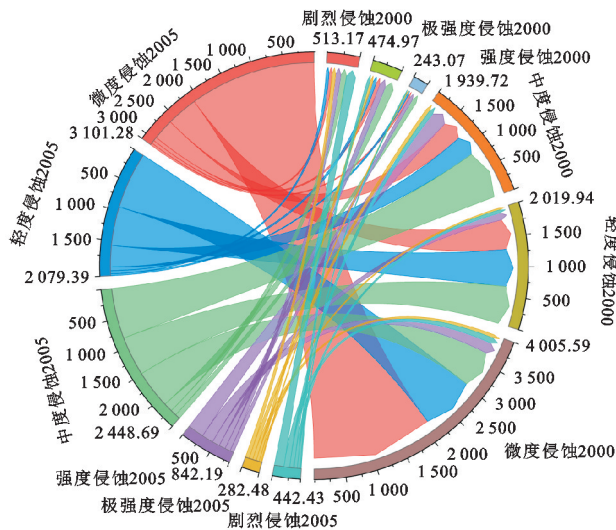


图 4 2005—2020 年安顺市土壤侵蚀转移面积和弦图

Fig.4 Soil erosion transfer area and chord map of Anshun City from 2005 to 2020

表 3 土壤侵蚀分级分类标准(SL 190—2007)

Table 3 Soil erosion classification and categorization standards (SL 190—2007)

侵蚀等级	侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
微度侵蚀	<5
轻度侵蚀	5~25
中度侵蚀	25~50
强度侵蚀	50~80
极强度侵蚀	80~150
剧烈侵蚀	>150

2.3 不同因子对土壤侵蚀影响

2.3.1 土地利用对土壤侵蚀影响 土地利用反映人

类社会经济活动对自然环境改造和利用的结果^[20]。不同的土地利用方式通过扰动地表土壤及改变地面植被类型与覆盖来影响降水与地表径流对地表土壤的侵蚀效果^[21]。由图 6 可知,2005—2020 年安顺市的土壤侵蚀主要发生在林地,其次是耕地和草地。相比之下,水域、城市和未利用地在整体面积中所占比重较小,因此,并不是土壤侵蚀的主要发生地类。不同地类土壤侵蚀程度各不相同,在耕地上是微度和轻度,而在林地上为微度和中度,在草地上为中度。从平均土壤侵蚀率来看,2005—2020 年耕地的平均土壤侵蚀率均为最高,其次是草地,最后是林地。由此可见,安顺市耕地的水土流失风险较大。

(a) 土壤侵蚀和石漠化强度 (b) 土壤侵蚀和植被覆盖度

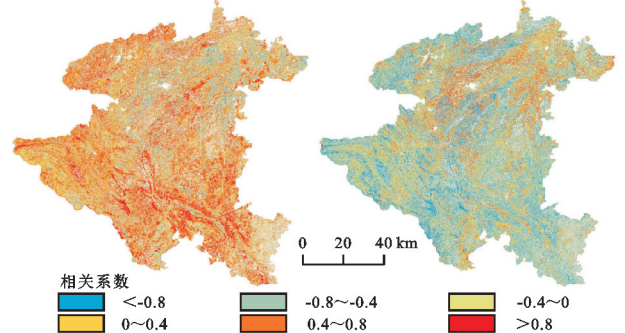


图 5 安顺市 2005—2010 年土壤侵蚀强度石漠化强度和植被覆盖度相关系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of correlation coefficients between soil erosion intensity and rock desertification intensity and vegetation cover in Anshun City from 2005 to 2010

2.3.2 石漠化强度对土壤侵蚀影响 通过对 2005—2020 年土壤侵蚀和石漠化强度叠加分析,计算不同石漠化强度下的各土壤侵蚀强度面积和平均土壤侵蚀率(图 7)。2005—2020 年安顺市石漠化整体呈好转趋势(表 4),其变化趋势与土壤侵蚀一致。2005—2020 年安顺市的无石漠化区域土壤侵蚀率最低,轻度石漠化区域土壤侵蚀率最高,且随着石漠化强度增加,土壤侵蚀呈先增加后减少趋势。低强度土壤侵蚀主要集中于无石漠化区域。高强度土壤侵蚀主要集中于潜在石漠化和轻度石漠化区域。

2.4 土壤侵蚀驱动因子

2.4.1 单因子对土壤侵蚀影响 由于喀斯特区域内环境条件具有高度异质性,采用 RF 模型来分析影响土壤侵蚀空间分布的主要驱动因素(图 8)。2005—2020 年,安顺市土壤侵蚀驱动因素中解释力最大的均为 C 因子。因此,安顺市土壤侵蚀的空间格局主要受植被因素控制。此外,P 因子对于土壤侵蚀驱动因素中解释力仅次于 C 因子,对土壤侵蚀也有显著影响。其他因子对土壤侵蚀的贡献在不同年份并不

一致。总体而言,C 因子、P 因子和石漠化强度是土

壤侵蚀空间变异的主要驱动因子。

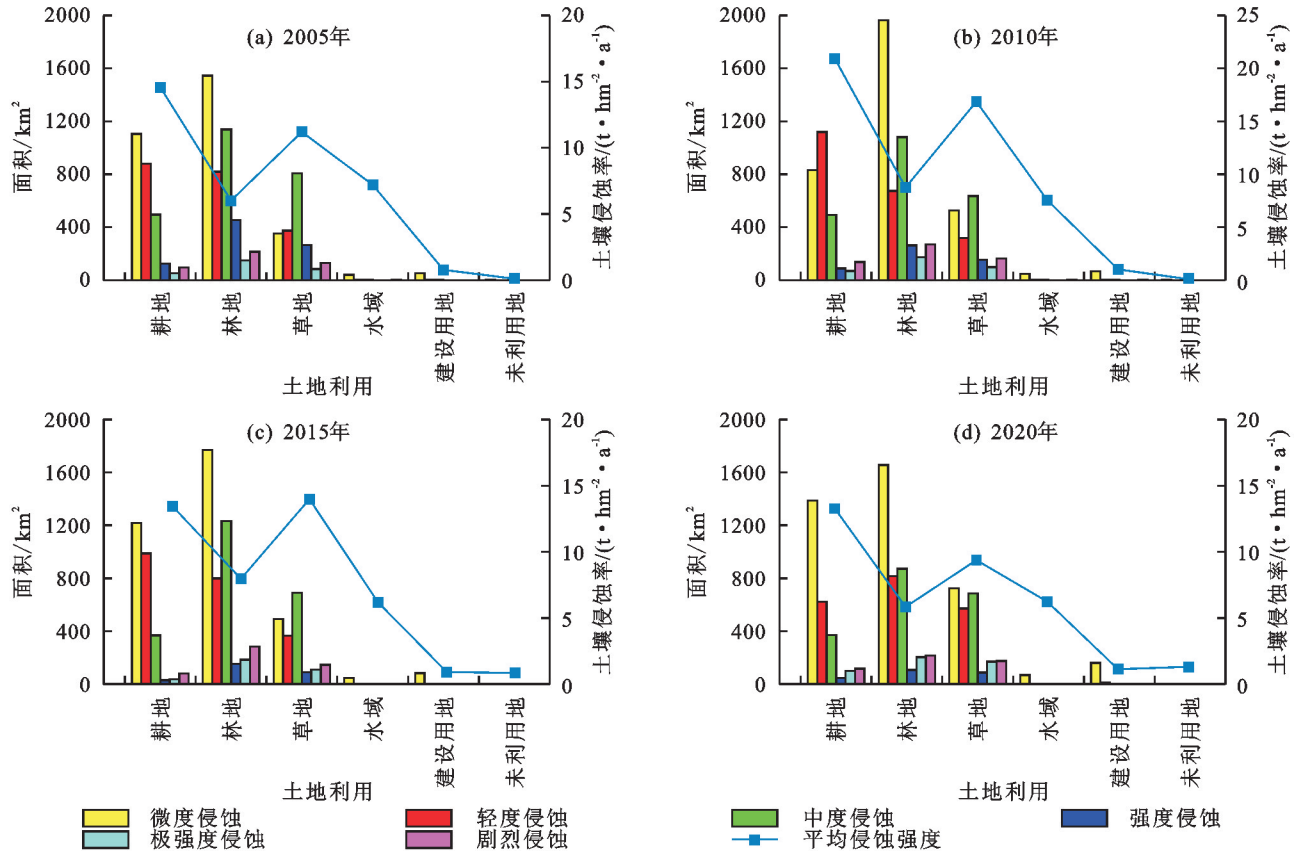


图 6 不同土地利用各侵蚀等级面积和平均侵蚀率

Fig.6 The average erosion rate and the area of each erosion grade under different land use types

表 4 2005—2020 年安顺市不同石漠化等级面积

Table 4 Area of different rocky desertification levels in Anshun City from 2005 to 2020 km²

年份	无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化
2005	2 362.39	3 223.03	2 308.84	745.02	568.71
2010	2 588.79	3 211.95	2 562.13	630.77	214.35
2015	2 920.69	2 901.06	2 654.47	523.06	208.65
2020	3 151.46	3 178.02	1 998.48	609.16	270.88

2.4.2 双因子交互作用对土壤侵蚀影响 土壤侵蚀是受多种因素间接或直接相互作用影响的复杂过程。驱动因子间的双向交互作用对土壤侵蚀的空间变异性有较大影响,且交互作用强度各不相同。因此,使用 RF 模型来评估 2 个驱动因子交互作用下对土壤侵蚀影响程度。在所有两两相互作用中,找出反映土壤侵蚀地理分布和空间变异性的前 15 对相互作用因子(图 9)。P_C 因子在 2005—2020 年均解释力最强的交互因子,交互作用强度分别为 18.5%、18.0%、17.7%、18.1%。其次是 LS_C 因子、C_R 因子、K_C 因子、高程_C 因子、石漠化强度_C 因子等交互作用因子。由于 C 因子在排名靠前的交互作用因子中均有参与。因此,C 因子对土壤侵蚀的空间分布具有

重要影响。

3 讨论

3.1 安顺市土壤侵蚀时空特征分析

2005—2020 年安顺市土壤侵蚀总体呈减少趋势,其中微度土壤侵蚀的面积在逐年增加,而中度和强度土壤侵蚀面积则逐年减少。是由于早期安顺市地形复杂崎岖,交通闭塞,经济发展困难,导致贫困人口集中,农业生产水平低下。为维持生存人们大量开荒毁林、破坏环境,导致严重的水土流失。后期安顺市实施的水土保持措施和石漠化治理政策,增加该地区植被覆盖面积,修复当地的植被生态环境,而植被的截流固土的功能也极大改善安顺市水土流失状况。

在空间分布上,安顺市高强度土壤侵蚀区域与建设用地等人类活动区域多有重合。土壤侵蚀受到人地相互作用的显著影响,城镇化率是土壤侵蚀的主要社会因素。区域城镇化所带来的人口聚集及对生态环境的干扰,是导致土壤侵蚀脆弱的重要原因^[22]。随着社会经济的发展,城市化进程的加快,人类生产建设活动更加频繁,导致过度填挖土壤和开垦农田,破坏地表植被,加剧土壤侵蚀。

3.2 石漠化和土地利用对土壤侵蚀影响

结合土壤侵蚀与石漠化强度相关性分析可知,石

漠化对于土壤侵蚀有较大影响。从平均土壤侵蚀率来看,随着石漠化强度增加呈先增后减少趋势。是由于不同等级石漠化地表特性不同,土壤侵蚀程度各异,中度和轻度石漠化区现存的土层较厚,土壤保有量大,比较容易受到侵蚀,而高等级石漠化区由于表层土壤较少,土壤侵蚀反而有所减弱^[23-24]。较低等级的土壤侵蚀主要集中于无石漠化和潜在石漠化区域,或许与该区域主要分布在低海拔、缓坡和河谷地带,

植被覆盖较高有关。喀斯特地区土壤侵蚀除了地表流失,还有地下漏失。地下漏失指地表土壤通过岩溶裂隙、孔隙等地下通道流失的过程。低等级石漠化地区岩溶裂隙发育比高强度石漠化较轻,其地下漏失作用也相对较弱^[6]。此外,较低等级石漠化区域出现一定程度的高土壤侵蚀,此现象可能是由于喀斯特地区独特的地貌条件和人类活动所引起的,例如,在不适宜种植的山坡上进行耕作,导致土壤侵蚀加剧。

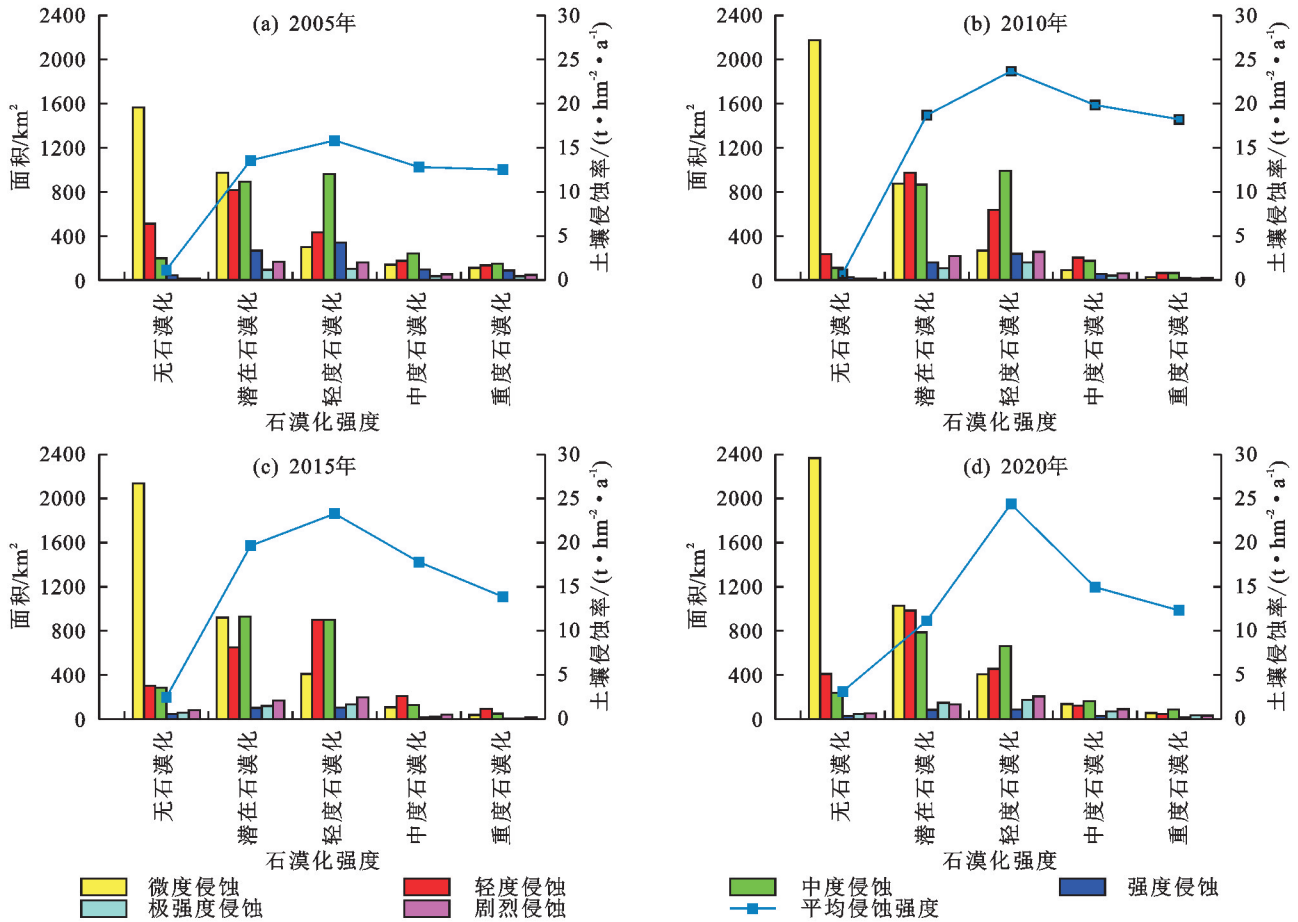


图 7 不同石漠化强度各侵蚀等级面积和平均侵蚀率

Fig.7 The area and average erosion rate of different rock desertification intensity

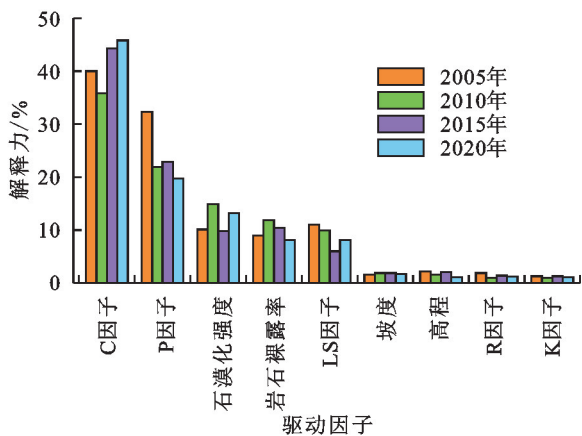


图 8 安顺市 2005—2020 年土壤侵蚀驱动因子相对贡献

Fig.8 Relative contribution of the driving factors of soil erosion in Anshun City from 2005 to 2020

不同的土地利用方式通过人类活动及改变地面植被变化来影响降水与地表径流对地表土壤的侵蚀效果^[21]。由于安顺市地形崎岖复杂,大多数耕地属于坡耕地。坡耕地坡度较大、植被覆盖程度较差,日常耕作活动破坏土体结构,使得土壤结构稳定性下降,导致耕地土壤侵蚀剧烈^[25]。林地和草地由于较高的植被覆盖和低频次的人类活动,其土壤侵蚀强度总体要低于耕地。

3.3 土壤侵蚀驱动因素及其相互作用

通过 RF 模型量化驱动因素对土壤侵蚀的贡献及不同驱动因素间的相互作用。RF 的结果表明,C 因子、P 因子是土壤侵蚀空间变异影响最大的驱动因子。C 因子在 2005—2020 年对于土壤侵蚀的贡献率均是最高,此外,植被覆盖度与土壤侵蚀呈负相关区

域高达 72.1%，具有高度相关性。因此，植被对于土壤侵蚀有着巨大影响力，是土壤侵蚀的主要驱动因素。植被具有截留降水、抗击减流、增强土壤可蚀性等作用。一方面，植被叶片可阻挡降雨并减少雨滴的冲击力，从而避免雨滴直接对地表土壤造成的冲击；另一方面，较高的植被覆盖其地下根量及根系大大增加，能够增强拦蓄径流、涵养水源的能力^[26]。P 因子作为仅次于 C 因子的驱动因素，对于土壤侵蚀也有显著影响。土地开发过程作为人类活动的表征是影响区域土壤侵蚀最活跃的因素，不合理的土地利用方式是导致土壤侵蚀的主要原因^[25]。

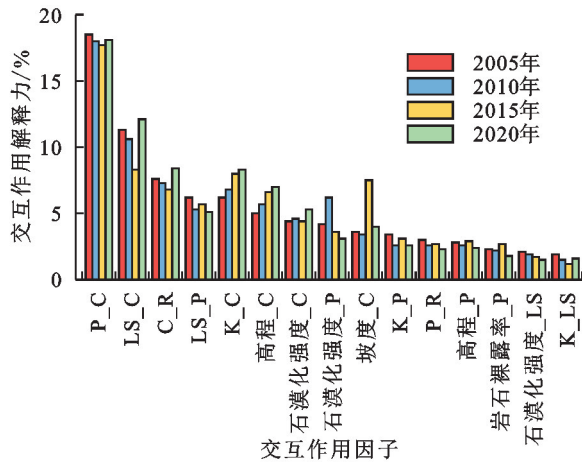


图 9 安顺市 2005—2020 年驱动因子相互作用对土壤侵蚀的相对贡献

Fig.9 The relative contribution of the interactions between the driving factors to soil erosion in Anshun City from 2005 to 2020

对于土壤侵蚀驱动因子交互作用的分析可以看出，P_C 因子、LS_C 因子和 R_C 因子对安顺地区土壤侵蚀具有较强的影响。不同的土地利用将导致植被覆盖度的不同，从而导致不同土地利用的水土保持能力不同^[27]。降雨为植被生长发育提供必要的水分条件，而地形则主导着地表水热条件的再分配从而影响植被分布。因此，土地利用、降雨和地形因子通过影响植被生长发育和分布从而影响植被的水土保持能力。

4 结论

1) 安顺市土壤侵蚀主要以微度、轻度和中度侵蚀为主，高强度土壤侵蚀主要位于北部和西南部的人类活动较密集地区。2005—2020 年安顺市土壤侵蚀存在高等级向低等级转移现象，主要转移方向是微度侵蚀和轻度侵蚀，但也存在一定程度的低强度土壤侵蚀向高强度土壤侵蚀转移。总的来说，安顺市土壤侵蚀强度保持明显改善。

2) 石漠化对于安顺市土壤侵蚀有较大的影响，2005—2020 年安顺市土壤侵蚀与石漠化强度变化趋势一致。通过分析不同石漠化强度土壤侵蚀率可看出，随

着石漠化强度增加，土壤侵蚀呈先增加后减少趋势。

3) 安顺市发生土壤侵蚀的主要土地利用类型为林地，其次为草地和耕地。总体上来看，土壤侵蚀速率从小到大依次为林地 < 草地 < 耕地，耕地的水土流失风险较大。

4) 利用 RF 模型分析发现，2005—2020 年安顺土壤侵蚀主要驱动因子是植被覆盖、管理因子、水土保持措施因子和石漠化强度。驱动因子交互作用结果表明，植被覆盖与管理因子与水土保持措施因子交互作用为主导因素。

参考文献：

- [1] WANG T, ZHOU W, XIAO J Y, et al. Soil organic carbon prediction using sentinel-2 data and environmental variables in a karst trough valley area of southwest China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(8): e2118.
- [2] 刘振坤, 刘峰, 郑光辉, 等. 基于 RUSLE 模型的青藏高原土壤保持功能定量评价[J]. 土壤, 2024, 56(1): 173-181.
- [3] LIU Z K, LIU F, ZHENG G H, et al. Quantitative evaluation of soil conservation function in the Qinghai-Tibet Plateau based on RUSLE model[J]. Soils, 2024, 56(1): 173-181.
- [4] ZHANG Z M, ZHOU Y C, WANG S J, et al. The soil organic carbon stock and its influencing factors in a mountainous karst Basin in P. R. China[J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(3): 1031-1043.
- [5] 张珍明, 周运超, 田潇, 等. 喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7647-7659.
- [6] ZHANG Z M, ZHOU Y C, TIAN X, et al. Study on spatial heterogeneity and reserve estimation of soil organic carbon in a small karst catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7647-7659.
- [7] 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.
- [8] WANG S J. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.
- [9] 李成芳, 王忠诚, 李振炜, 等. 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 962-974.
- [10] LI C F, WANG Z C, LI Z W, et al. Research progress of soil erosion in karst areas of southwest China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(6): 962-974.
- [11] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
- [12] DAI Q H, YAN Y J. Research progress of karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 1-10.
- [13] MALTSEV K, YERMOLAEV O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia[J]. Catena, 2020, 195: e104726.
- [14] GHOSAL K, DAS BHATTACHARYA S. A review of

- RUSLE model [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020, 48(4): 689-707.
- [10] MORAGODA N, KUMAR M, COHEN S. Representing the role of soil moisture on erosion resistance in sediment models: Challenges and opportunities [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 229: e104032.
- [11] 何茂林, 张玉珊, 高家勇, 等. 喀斯特区土壤侵蚀与石漠化协同演变及交互关系 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 140-150.
- HE M L, ZHANG Y S, GAO J Y, et al. Synergistic evolution and interaction of soil erosion and rocky desertification in karst area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 140-150.
- [12] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation [M]. Washington, D. C.: Agricultural Research Service, U. S. Dept of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, 1965.
- [13] WILLIAMS J, NEARING M, NICKS A, et al. Using soil erosion models for global change studies [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5): 381-385.
- [14] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐, 等. 基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3473-3485.
- LI J L, SUN R H, XIONG M Q, et al. Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3473-3485.
- [15] 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.
- CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [16] GAO G Y, FU B J, ZHANG J J, et al. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950s-2014 in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 609-619.
- [17] 张蕊娇, 张超, 陆双飞, 等. 滇东典型岩溶地区石漠化时空演变特征研究 [J]. *林业资源管理*, 2019(2): 99-108.
- ZHANG R J, ZHANG C, LU S F, et al. Study on the space-temporal evolution feature of the rocky desertification in typical karst area of eastern Yunnan [J]. *Forest Resources Management*, 2019(2): 99-108.
- [18] RIAL M, MARTÍNEZ CORTIZAS A, RODRÍGUEZ-LADO L. Understanding the spatial distribution of factors controlling topsoil organic carbon content in European soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1411-1422.
- [19] KIM J, GRUNWALD S. Assessment of carbon stocks in the topsoil using random forest and remote sensing images [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(6): 1910-1918.
- [20] 何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 426-439.
- HE S S, ZHU W B, CUI Y P, et al. Study on soil erosion characteristics of Qihe watershed in Taihang Mountains based on the INVEST model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 426-439.
- [21] 黄振华, 余健, 房莉, 等. 基于 InVEST 模型的青弋江流域土壤侵蚀与影响因素研究 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 189-197.
- HUANG Z H, YU J, FANG L, et al. Research on soil erosion and influencing factors in Qingyi River Basin based on InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 189-197.
- [22] 杨严攀, 田培, 沈晨竹, 等. 基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 91-103.
- YANG Y P, TIAN P, SHEN C Z, et al. Vulnerability assessment of soil erosion in southwestern Hubei Province based on RUSLE model and geographic detector [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 91-103.
- [23] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- MA Q H, ZHANG K L. Progresses and prospects of the research on soil erosion in karst area of southwest China [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [24] 李瑞, 袁江. 区域尺度喀斯特区石漠化强度对土壤流失的影响 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 84-92.
- LI R, YUAN J. Influence of rocky desertification intensity of Karst areas on soil loss at a regional scale [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(15): 84-92.
- [25] 潘文, 王强. 土地利用方式和强度对土壤抗蚀性的影响述评 [J]. *亚热带水土保持*, 2024, 36(1): 44-46.
- PAN W, WANG Q. Review on the effects of land use patterns and intensity on soil anti-erodibility [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2024, 36(1): 44-46.
- [26] 白雪莲, 郑海颖, 王理想, 等. 砒砂岩黄土区植被盖度对土壤侵蚀的影响 [J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3776-3784.
- BAI X L, ZHENG H Y, WANG L X, et al. The influence of vegetation coverage on soil erosion in sandstone loess area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3776-3784.
- [27] 陈淼, 汪小钦, 林敬兰, 等. 土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 168-177.
- CHEN M, WANG X Q, LIN J L, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 168-177.