

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.014

彭大力,张斌,吴林蓬,等.龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):29-37.

PENG Dali, ZHANG Bin, WU Linpeng, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River Basin in recent 20 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 29-37.

龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析

彭大力^{1,2,3}, 张斌^{1,2,3}, 吴林蓬^{1,2,3}, 邹介石^{1,2,3}, 罗君^{1,2,3}, 刘辉^{1,2,3}, 王磊^{1,2,3}

(1. 西华师范大学地理科学学院, 四川 南充 637009; 2. 西华师范大学四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室, 四川 南充 637009; 3. 大小凉山干旱河谷土壤侵蚀与生态修复野外科学观测研究站, 四川 喜德 616753)

摘要: [目的] 探究龙川江流域土壤侵蚀时空变化及其主控因子并掌握当地水土保持情况, 有利于筑牢长江上游生态屏障。[方法] 采用通用土壤流失方程 RUSLE, 结合 GIS 和 RS 技术, 研究龙川江流域 2000—2020 年的土壤侵蚀时空变化特征, 同时利用最优参数地理探测器(OPGD)模型, 量化驱动因子对龙川江流域土壤侵蚀时空动态变化的影响力和相互作用。[结果] (1) 龙川江流域土壤侵蚀主要以微度和中度侵蚀为主, 面积占比分别为 2000 年 49.17%, 2010 年 50.29%, 2020 年 59.29%。2000—2010 年土壤侵蚀变化较小, 2010—2020 年, 共有 9.01% 的中度及以上侵蚀区域转为微度和轻度侵蚀。(2) 最优参数地理探测器结果显示, 在选取的影响因子中土地利用类型对研究区土壤侵蚀时空动态变化解释力最强, q 值为 0.18。土地利用类型与坡度的交互作用对龙川江流域土壤侵蚀解释力最强, q 值达到 0.45。[结论] 龙川江流域的土壤侵蚀主要以微度和轻度侵蚀为主, 整体呈好转趋势, 但元谋盆地土壤侵蚀仍较剧烈。土地利用类型对流域内土壤侵蚀的影响最强, 而研究区最主要的土地利用类型为植被, 占总面积的 67.02%, 因此未来需重点关注植被覆盖区域变化, 继续推进生态保护政策, 警惕地形复杂区域水土流失加剧风险。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 最优参数地理探测器; 植被覆盖; 龙川江流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0029-09

Analysis of Spatial and Temporal Changes and Driving Factors of Soil Erosion in Longchuan River Basin in Recent 20 Years

PENG Dali^{1,2,3}, ZHANG Bin^{1,2,3}, WU Linpeng^{1,2,3}, ZOU Jieshi^{1,2,3}, LUO Jun^{1,2,3},

LIU Hui^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}

(1. School of Geography Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 2. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion in Dry Valley, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 3. Liangshan Soil Erosion and Ecological Restoration in Dry Valleys Observation and Research Station, Xide, Sichuan 616753, China)

Abstract: [Objective] The objective is to explore the spatial and temporal changes of soil erosion and its main controlling factors in the Longchuan River Basin, as well as to understand mastering the local soil and water, which is conducive to building an ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River. [Methods] The temporal and spatial variation characteristics of soil erosion in the Longchuan River Basin during 2000 to 2020 were studied using the revised universal soil loss equation (RUSLE) combined with GIS and RS technology. Additionally, the optimal parameters-based geographical detector (OPGD) model was used to quantify the influence and interaction of driving factors on the temporal and spatial dynamic changes of soil erosion in the Longchuan River Basin. [Results] (1) Soil erosion in the Longchuan River Basin was mainly slight and moderate erosion. In 2000, the proportion of slight and moderate erosion was 49.17%. In 2010, the total proportion was 50.29%; In 2020, the total proportion is 59.29%. There was little change in soil erosion

收稿日期: 2024-01-23

修回日期: 2024-02-26

录用日期: 2024-03-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-24

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42307454, 41971015); 西华师范大学校级基本科研业务费项目 (20E030, 22kA002); 西华师范大学校级科研创新团队项目 (KCXTD2022-1)

第一作者: 彭大力 (1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: peng106462@163.com

通信作者: 王磊 (1992—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀过程与机理、水土保持与生态修复研究。E-mail: wanglei5418@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

from 2000 to 2010, but from 2010 to 2020, a total of 9.01% of areas experiencing soil erosion transitioned from moderate to slight or mild levels. (2) The results of the OPGD showed that the land use type had the strongest explanatory power for the temporal and spatial dynamic changes of soil erosion in the study area, with a q value was 0.18. The interaction between land use type and slope had the strongest explanatory power for soil erosion in Longchuan River Basin, with a q value reached 0.45. [Conclusion] Soil erosion in the Longchuan River Basin is mainly slight and mild, with an overall improving trend, but there are still areas with strong soil erosion. Land use type has the strongest impact on soil erosion in the basin, with woodlands and meadows being the most important types covering 67.02% of the total area in the study area. In the future, we should focus on regional changes in vegetation coverage, continue to promote ecological protection policies, and be alert to the risk of soil erosion in complex terrain areas.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; OPGD model; vegetation coverage; Longchuan River Basin

Received: 2024-01-23

Revised: 2024-02-26

Accepted: 2024-03-10

Online(www.cnki.net): 2024-05-24

土壤侵蚀是全球性的主要环境问题之一,可导致土壤退化、土地生产力降低,进而影响农业生产和粮食安全^[1]。土壤侵蚀时空变化研究是土地持续利用的重要保障,其与区域地理环境密不可分^[2],是区域尺度上植被、土地利用、降雨、地形等多重因素叠加的综合作用的结果。对小流域而言存在土壤侵蚀主导因子^[3],如黄河小浪底和崇礼清水河流域的土壤侵蚀主导因子均为植被覆盖^[4-5],其流域内植被覆盖空间格局变化影响土壤侵蚀变化,因而提出注重流域植被覆盖率的提高和加强合理的水土保持措施等建议。由此可见,确定区域土壤侵蚀时空变化的影响因素及影响主导因子对水土保持工作尤为重要。

区域水文条件的异质性导致土壤侵蚀在不同尺度上的空间巨大变化^[6]。土壤侵蚀的空间分异性主要受自然和人为因素的影响^[7],如土壤性质、降雨、坡度、高程、土地利用类型和植被覆盖等。以往的研究^[8]多集中于单个或多个因素对土壤侵蚀的影响,能较全面分析影响土壤侵蚀的因子,但不能区分其中的主要影响因素,难以定量分析多个变量间的耦合作用对土壤侵蚀空间分异的影响,而地理探测器模型正好可以解决这些问题。因此,越来越多的学者^[9-10]采用地理探测器来研究影响区域土壤侵蚀的因子。地理探测器模型是一组统计学方法^[11],可用于探测空间分异性并揭示背后的驱动力。而传统地理探测器对连续变量进行离散化处理时需要人为设定,存在主观性问题,因此本研究选取最优参数地理探测器^[12]。最优参数地理探测器通过优化数据离散化过程和空间尺度来确定参数的最佳组合,从而提高模型空间分析的准确性和有效性。

龙川江流域是长江上游生态屏障建设的重要区域,该区域地形起伏大,河流下切深,沟壑纵横,水土流失情况严重,诸多学者^[13-14]针对该区域开展了土壤

侵蚀和水土保持研究工作。以往龙川江流域土壤侵蚀研究主要为土壤侵蚀动态变化^[15]和土地利用与土壤侵蚀耦合分析^[16-17],研究时间多在 2010 年,而在 2013 年当地发布生态保护管理条例^[18]之后的相关研究目前较少,当地土壤侵蚀和水土保持研究有待深入。鉴于此,本研究将 GIS 和 RS 技术结合通用土壤流失方程 RUSLE 对 2000 年、2010 年、2020 年龙川江流域土壤侵蚀进行定量分析,探究土壤侵蚀时空变化规律,并利用最优参数地理探测器分析龙川江流域土壤侵蚀影响因素,探明研究区土壤侵蚀主导因子,以期对长江上游水土保持与生态屏障建设提供科学依据。

1 研究区概况

龙川江流域(24°49'14"—26°14'54"N, 100°58'14"—102°05'05"E)位于我国云南省,龙川江发源于云南省南华县北部,是金沙江南岸的重要支流^[19]。流域面积 9 240.7 km²,河流全长约 246 km(图 1)。发源处和入江口的相对落差约 1 600 m,河床平均坡降为 4.8‰,流域内的平均海拔为 1 992 m。龙川江流域内以山区和丘陵为主,占比达到 95%,剩下 5%为河谷盆地和浅丘。地势西南高东北低,河网复杂,小型河流众多,具有长江上游源头支流的典型分布特征^[19]。流域属于低纬度高原季风气候,具有气候温和、日照充足、干湿季明显、无霜期长等特点,年平均气温为 14.8~21.9 °C,因此冬夏季植被变化不明显。年降水量多达 1 700 mm,雨季主要集中在夏季,全年蒸发量达 2 545 mm^[20]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

数据来源与基本信息见表 1。将气象数据和土壤数据的空间分辨率通过 ArcGIS 10.8 软件重采样为 30 m,与其他数据保持一致性。

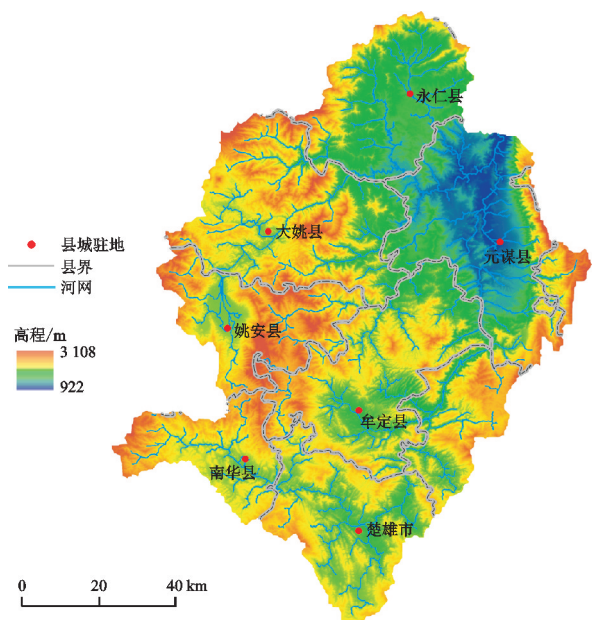


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview map of the study area

表 1 数据来源和基本信息

Table 1 Data sources and basic information

指标	数据来源	年份	空间分辨率
气象数据	中国气象信息中心 (https://data.cma.cn/)	2000—2020	1 km
DEM	地理空间数据云平台 (https://www.gscloud.cn/)	2000	30 m
NDVI	Google Earth Engine (https://developers.google.cn/earth-engine/)	2000—2020	30 m
土地利用类型	全球地理信息公共产品 (http://www.globallandcover.com)	2000—2020	30 m
土壤数据	世界土壤数据库 (http://westdc.westgis.ac.cn/)	2000	1 km

2.2 研究方法

2.2.1 通用土壤流失方程 RUSLE 模型即修正的通用水土流失模型,是基于小区域的长期观测数据而总结出的计算坡面空间尺度多年平均年土壤侵蚀量的经验统计模型^[21],本研究通过引入 RUSLE 模型对龙川江流域研究区进行土壤侵蚀模数的计算,计算公式为:

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

式中: A 为计算的土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; 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 为坡长因子; S 为坡度因子,通常综合考虑坡长、坡

度对土壤侵蚀模数的影响,把 LS 称为地形因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子 (R)

降雨侵蚀力因子是指由降水引起的土壤侵蚀的潜在能力,反映降雨和径流对土壤侵蚀的潜在影响作用。直接测得降雨侵蚀力难度大,通常采用降雨量等其他参数进行计算,本研究采用的是用 Wischmeier 提出并由 ARNOLDUS^[22] 修正的公式进行计算,计算公式为:

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

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)

土壤可蚀性因子反映土壤性质对土壤侵蚀力强弱的影响。 K 值的大小主要受土壤质地、土壤结构及其稳定性、土壤渗透性、有机质含量和土层深度等因素的影响。本研究采用 WILLIAMS 等^[23] 在 EPIC 模型中 K 因子的计算方法,公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.256 \times \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C_0}{C_0 + \exp(3.72 - 2.95C_0)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7\text{SNI}}{\text{SNI} + \exp(-5.51 - 22.9\text{SNI})} \right] \quad (3)$$

$$\text{SNI} = 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \quad (4)$$

式中: SAN 、 SIL 、 CLA 和 C_0 分别为砂粒 (0.05~2 mm)、粉粒 (0.002~0.05 mm)、黏粒 (<0.002 mm) 和有机质的含量 (%),计算结果 K 的单位为美制,需乘以转换系数 0.131 7 转换为国际制单位。

(3) 地形因子 (LS)

坡度因子和坡长因子反映地形对于土壤侵蚀强度的影响,基于数字高程模型 DEM 提取坡度因子 (S)。根据不同坡度范围采用不同公式计算, 10° 以下按照前人^[24] 公式计算, 10° 以上按照 LIU 等^[25] 的公式计算,公式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta > 10^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度 ($^\circ$)。

考虑到研究区中陡坡地较多,采用符素华等^[26] 的坡度因子算法,坡长因子 (L) 可由 DEM 计算获取。

$$L_i = \frac{\lambda_{\text{out}}^{m+1} - \lambda_{\text{in}}^{m+1}}{[(\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}}) 22.13^m]} \quad (6)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 0.5^\circ \\ 0.3 & 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ \\ 0.4 & 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 3^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中: L_i 为第 i 个栅格的坡长因子值; λ_{out} 、 λ_{in} 分别为栅格出口和入口的坡长(m); m 为坡长指数。

(4) 植被覆盖因子(C)

植被覆盖因子反映的植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀具有抑制作用,其值介于 0~1。目前较为常用的方法是采用归一化植被指数 NDVI 对 C 值进行估算,根据前人^[27]提出的计算公式,公式为:

$$C = \exp \left[-a \cdot \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad (8)$$

式中: C 为植被覆盖因子; a 和 β 为决定 NDVI- C 关系曲线的参数,通常取 $a=2$, $\beta=1$ 。

(5) 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子是采用特定保持措施下的土壤流失量与相应未实施保持措施的顺坡耕作地块的土壤流失量之比。在应用 RUSLE 模型时, P 因子值是最难确定的因子,也是模型输入参数中可靠性最低的参数。 P 因子的取值参照覃杰香等^[28]的研究成果,对研究区不同土地利用类型进行赋值,其中林地、草地、未利用地的 $P=1$; 水域和建筑用地的 $P=0$; 耕地坡度为 $\leq 5^\circ$, $5^\circ \sim 10^\circ$, $10^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 20^\circ$, $20^\circ \sim 25^\circ$, $> 25^\circ$, 分别对应的 P 值为 0.100, 0.221, 0.305, 0.575, 0.705, 0.800。

2.2.2 马尔科夫转移矩阵 使用马尔可夫转移矩阵来定量描述龙川江流域不同土地利用类型和各级土壤侵蚀强度的转换关系,反映不同时间段内龙川江流域不同土地利用类型和各级土壤侵蚀强度增加或者减少的面积变化。马尔科夫转移矩阵的表达式为:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1j} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{i1} & C_{i2} & \cdots & C_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: C_{ij} 为 i 类型与 j 类型相互转换的数值。

2.2.3 最优参数地理探测器 地理探测器是探测空间分异性,并揭示其背后驱动力的一组统计学方法。其内核是一种探测和利用空间分异性的工具^[11]。最优参数地理探测器利用 R4.2.1 语言中地理探测器“GD”包^[12],对连续型因子进行离散化处理,计算每个连续变量在不同分级方式(相等区间、自然区间、分位数区间、几何区间和标准差分类方法)的 q 值, q 值最大的参数组合为该自变量最优离散组合。

在明确龙川江流域土壤侵蚀时空分异特征后,本研究选取对土壤侵蚀解释力较强的 5 种影响因素: 土地利用类型、年平均降雨量、高程、坡度和土壤类型,分别用编号 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 、 $X4$ 和 $X5$ 表示。

因子探测是通过分析因变量 Y 自身的空间分异性和各影响因子 X ,对 Y 的空间分异性解释力强度,强度大小用 q 值来衡量^[11], q 值在 $[0, 1]$, q 值越大,显示驱动因子对土壤侵蚀的解释力越强。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sum \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (10)$$

式中: h 为因变量 Y 或影响因子 X 的分层($h=1, \dots, L$),即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差; q 的取值范围为 0~1, q 值越大,表明影响因子 X 对因变量 Y 空间分异的解释程度越强^[11]。

交互作用探测用来判断不同影响因子共同作用时是增加还是减弱对因变量 Y 的解释力^[11]。交互作用探测判断方法和类型见表 2。

表 2 交互作用类型

Table 2 Types of interaction

判据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 龙川江流域土壤侵蚀时空变化特征

将通用土壤流失方程计算结果按照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007)^[29]西南地区分为微度侵蚀[0~500 t/(km²·a)]、轻度侵蚀[500~2 500 t/(km²·a)]、中度侵蚀[2 500~5 000 t/(km²·a)]、强烈侵蚀[5 000~8 000 t/(km²·a)]、极强烈侵蚀[8 000~15 000 t/(km²·a)]和剧烈侵蚀[>15 000 t/(km²·a)]6个等级。

3.1.1 龙川江流域土壤侵蚀空间变化特征 2000年、2010年、2020年龙川江流域土壤侵蚀空间分布见图 2。从图 2 可以看出,龙川江流域土壤侵蚀空间分布差异明显,总体上西南部地区土壤侵蚀强度低于东北部。龙川江流域土壤侵蚀强度以微度、轻度侵蚀为主,主要分布在大姚县东南部、姚安县东部、南华县东北部、楚雄市东北部和牟定县大部分区域,这几个县市的微度和轻度侵蚀面积占比明显高于其他几个县,

其微度和轻度侵蚀面积占流域微度和轻度侵蚀总面积的68.73%;中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀区域呈现出比较明显的聚集状态,主要分布在永仁县南部、元谋县西南部、牟定县东北部和禄丰县西北部,该区域地势起伏大,地形陡峭,河流经过,土壤易流失。2000—2010年,龙川江流域东北部的元谋县、牟定县和禄丰县等区域中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀加剧,主要分布在河流流经处,侵蚀面积进一步扩大,土壤侵蚀更加严重;流域西部的楚雄市、南华县、姚安县、大姚县和永仁县侵蚀等级降低、侵蚀面积减小,土壤侵蚀问题得到改善。2010—2020年,流域大部分区域的侵蚀等级都明显降低,侵蚀问题有所改善,侵蚀问题加剧区域主要在禄丰县西北部,该县域内土壤侵蚀向更高侵蚀等级转化的面积占该县总转化面积的65.50%,土壤侵蚀问题有所加重。整体而言,龙川江流域在2000—2020年土壤侵蚀问题改善较为明显。流域东北部中级及以上侵蚀向微度和轻度侵蚀转化,但该区域侵蚀问题依然严重,此外其他区域的侵蚀等级明显降低,侵蚀面积进一步缩小。

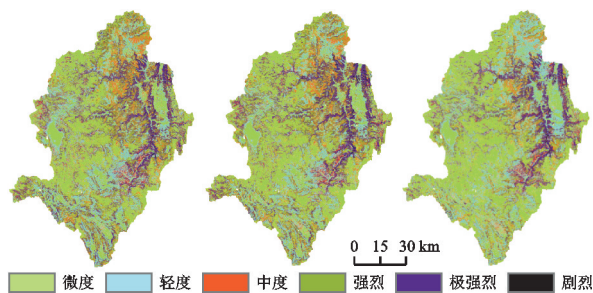


图2 龙川江流域2000—2020年土壤侵蚀空间变化

Fig. 2 Spatial changes of soil erosion in the Longchuan River Basin from 2000 to 2020

3.1.2 龙川江流域土壤侵蚀时间变化特征 由图3可知,龙川江流域2000年、2010年主要以微度侵蚀为主,面积占比分别为30.76%和32.54%。在2000—2010年,微度侵蚀和剧烈侵蚀呈上升趋势,增长率分别为5.78%和31.91%;轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀呈下降趋势,下降率分别为3.57%,0.93%,0.92%,5.82%。在2010—2020年,微度侵蚀和轻度侵蚀呈上升趋势,上升率分别为18.71%和16.48%,其他轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀均呈下降趋势,下降率分别为11.08%,21.30%,19.71%,7.63%。在2000—2010年,不同侵蚀等级间的转化不明显;在2010—2020年,微度和轻度侵蚀的面积增加,面积占比分别为18.71%和16.48%,中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积缩小,分别为11.08%,21.30%,19.71%,7.63%,

呈较大幅度下降趋势,表明龙川江流域水土流失治理取得一定的效果。

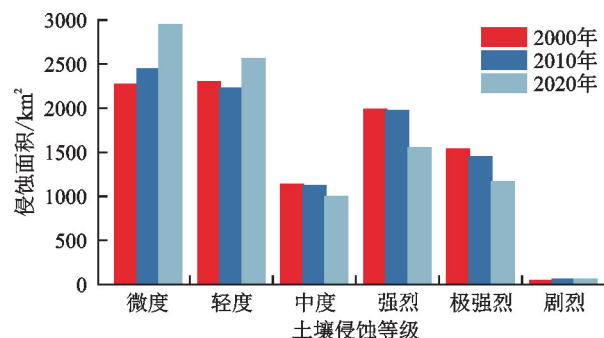


图3 龙川江流域2000—2020年土壤侵蚀面积变化特征

Fig. 3 Changes in soil erosion area in the Longchuan River Basin from 2000 to 2020

基于马尔科夫模型制作了龙川江流域2000—2020年土壤侵蚀面积转移矩阵(图4)。2000—2020年侵蚀等级保持不变的区域面积为6197.03 km²,占比为66.80%,转换面积前3是强烈转为微度、强烈转为轻度、极强烈转为微度,面积分别为492.50,271.66,227.32 km²。中度及以上侵蚀向微度和轻度侵蚀转化面积最多,占到总转化面积的56.34%。总体而言,龙川江流域20年来土壤侵蚀趋势主要是中度侵蚀及以上等级侵蚀向微度和轻度侵蚀转化为主,直观体现龙川江流域土壤侵蚀问题的改善。

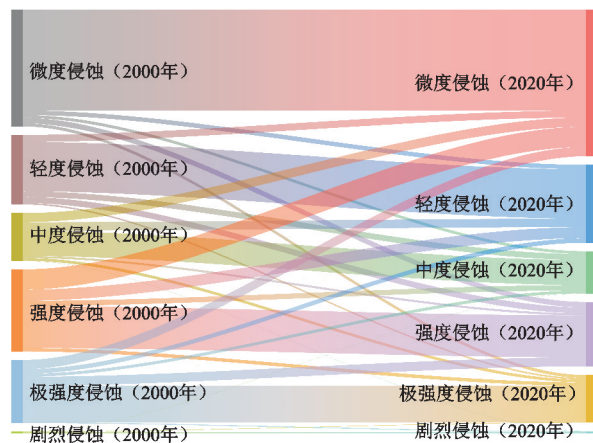


图4 龙川江流域2000—2020年土壤侵蚀面积转移特征

Fig. 4 Characteristics of soil erosion area transfer in the Longchuan River Basin from 2000 to 2020

3.2 龙川江流域土壤侵蚀影响因素

3.2.1 因子探测分析 本研究选取龙川江流域土地利用类型、年平均降雨量、高程、坡度、土壤类型等5项影响因子为自变量X,土地侵蚀状况为因变量Y输入到最优参数地理探测器模型,因子探测结果见图5。 q 值越大,说明因子影响土壤侵蚀的解释力越强。各因子的 q 值从大到小分别为土地利用类型、高程、坡度、年平均降雨量、土壤类型,分别为0.1810,

0.119 5,0.113 9,0.100 4,0.045 4。其中土地利用类型是影响龙川江流域土壤侵蚀变化的主导因子。

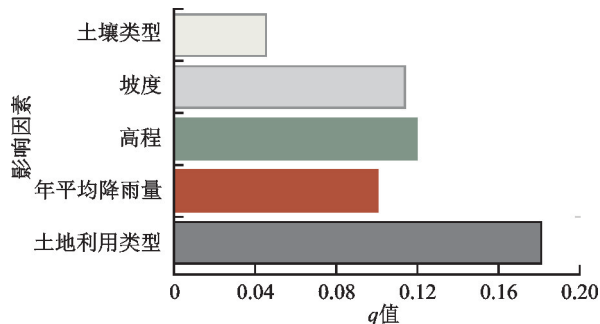


图 5 不同影响因素的单因子探测结果

Fig. 5 Single factor detection results of different influencing factors

为了进一步揭示因子交互作用对土壤侵蚀的影响,使用地理探测器中的交互探测确定 5 个因子之间的交互作用,地理探测器中的交互探测可以评估 2 种因子共同作用时对研究区土壤侵蚀的影响是增强还是削弱。由图 6 可知,各因子交互作用呈现为双因子增强和非线性增强 2 种类型,说明龙川江流域各因子交互作用比单个因子更能解释对土壤侵蚀的影响。其中土地利用类型∩坡度为双因子增强,其他因子之间的交互作用均为非线性增强。从 q 值大小来看,土地利用类型∩坡度的交互作用对研究区土壤侵蚀影响最大, q 值为 0.445 4;其次,坡度与土壤类型及年降雨量进行交互作用时, q 值均在 0.3 以上;其余因子的交互作用 q 值均在 0.2 以上,对比单因子 q 值提升较多,尤其是与坡度因子产生交互作用时,各因子 q 值均有近 1 倍增加,这表明在进行流域水土流失治理时,要充分考虑坡度的分布规律优化治理方案,并注意流域主要的土地利用类型向其他土地利用类型转移,了解各土地利用类型的土壤侵蚀具体情况,从而科学调控土壤侵蚀。

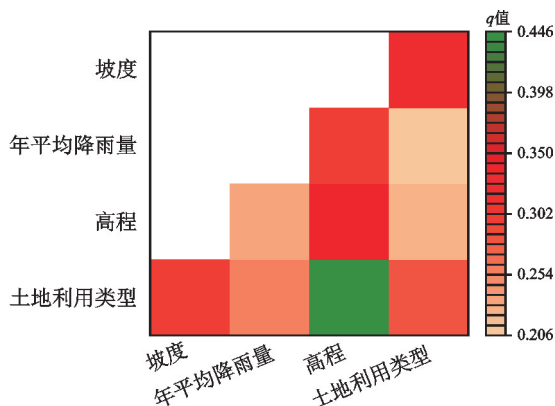


图 6 不同影响因素的交互作用探测结果

Fig. 6 Interaction detection results of different influencing factors

3.2.2 土地利用类型转移分析 通过最优参数地理探测器分析龙川江流域土壤侵蚀时空变化影响因子,

发现影响龙川江流域土壤侵蚀时空变化最强的是土地利用类型,流域土地利用类型面积占比最大的是植被,2020 年林地和草地面积占流域总面积的67.02%,流域的植被面积变化对龙川江土壤利用类型影响较大(图 7)。因此对龙川江流域土地利用类型和土壤侵蚀的转移进行分析,并比较流域内植被空间变化与土壤侵蚀空间变化之间的异同。

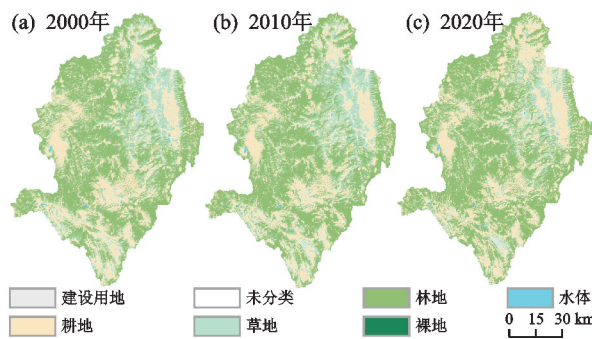


图 7 龙川江流域 2000—2020 年土地利用类型变化特征

Fig. 7 Changes in land use types in the Longchuan River Basin from 2000 to 2020

由图 8 可知,龙川江流域主要土地利用类型为林地和耕地,2000 年面积占比分别为 53.68% 和 29.74%,2020 年面积占比分别为 55.74% 和 32.14%。草地到 2020 年保有量为 771.19 km²,向耕地、建设用地、林地、裸地和水体分别转移 450.26,5.90,246.88,0.11,1.34 km²;耕地到 2020 年保有量为 2 190.81 km²,向草地、建设用地、林地、裸地和水体分别转移 184.90,16.77,356.35,0.12,6.61 km²;林地到 2020 年保有量为 4 556.28 km²,向草地、耕地、建设用地、裸地和水体分别转移 87.17,327.45,0.10,0,0.36 km²。

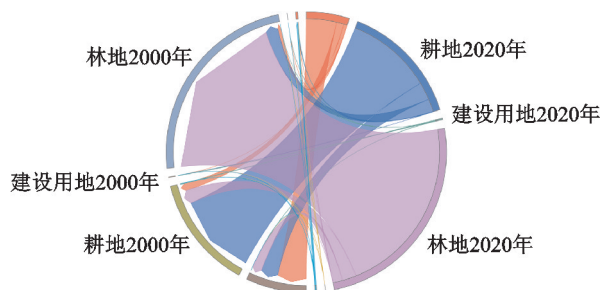


图 8 龙川江流域 2000—2020 年土地利用类型转移特征

Fig. 8 Characteristics of land use type transfer in the Longchuan River Basin from 2000 to 2020

3.2.3 土地利用类型与土壤侵蚀的关系 将龙川江流域 2000 年和 2020 年各个土地利用类型的土壤侵蚀强度及侵蚀面积相减,得到龙川江流域 2000—2020 年土地利用各类型土壤侵蚀变化(图 9),大部分中度及以上的侵蚀面积均有所减少,减少最多的分别是林地的强烈侵蚀和极强烈侵蚀,面积分别减少 274.71,187.44 km²,以及草地的极强烈侵蚀和强烈侵蚀,面积分别减少 161.24,143.19 km²。而增加最

多的是林地的微度侵蚀,面积增加 675.76 km²,其他土地利用类型的土壤侵蚀变化面积较小,共有 1 846.92 km² 的土地发生土壤侵蚀变化,其中 88.53% 发生在林地和草地,直观地体现龙川江流域内植被覆盖对土壤侵蚀的重要影响。从土地利用类型变化和土壤侵蚀变化看来,林地和草地等植被覆盖的增加降低研究区中度及以上等级侵蚀,减少土壤侵蚀面积,缓解龙川江流域土壤侵蚀问题。

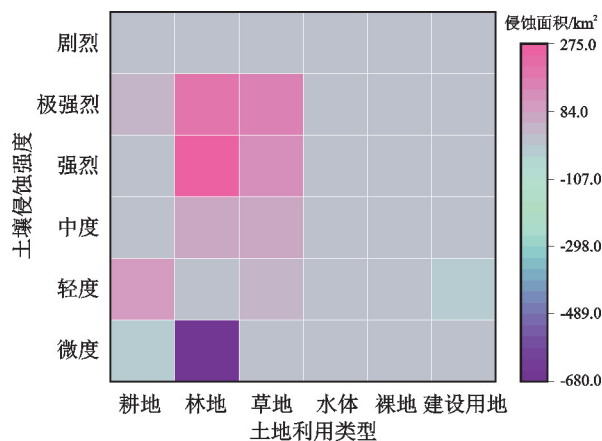


图9 龙川江流域2000—2020年各土地利用类型侵蚀面积变化

Fig. 9 Changes in erosion area of different land use types in the Longchuan River Basin from 2000 to 2020

4 讨论

2000—2020年,龙川江流域的植被总体呈现持续增加的趋势,集中连片分布,分布范围广泛,高聚集格局基本稳定。空间变化最显著的区域是东北部元谋盆地,该区域草地向耕地和林地转化,耕地面积增加较多,而流域内其他区域主要是由耕地向林地和草地转化。流域内元谋盆地的植被覆盖增速小于其他区域,这一情况与图2流域土壤侵蚀空间变化相似,元谋盆地侵蚀情况严重,而其他区域侵蚀情况明显好转。龙川江流域土壤侵蚀时空变化影响解释力最强的是土地利用类型,龙川江流域土地利用类型中植被占绝大部分,2020年占比为67.02%,且研究区植被覆盖时空变化趋势与土壤侵蚀时空变化趋势相似,可以看出研究区的植被变化对土壤侵蚀变化产生影响,近年来水土保持措施推动研究区植被覆盖率的增加。如龙川江流域开展的退耕还林(草)计划、天然林资源保护工程推动流域内耕地向林地、草地的转化。2000年在云南试点退耕还林政策,2002年全面启动退耕还林(草)计划^[30]。此外,当地政府在2013年发布龙川江保护管理条例^[18],并且在之后2019年、2022年、2023年多次发布龙川江流域生态保护政策,因此流域内林地和草地面积和密度持续增加,改善流域内水土流失问题,这与王猛等^[31]研究认为,西南地区土壤保持能力随植被覆盖度等级增加而呈几何增加的结果一致。

果一致。

龙川江流域20年来,土壤侵蚀强度和面积呈现“双降低”的趋势,流域内土壤侵蚀整体状况明显好转,但局部存在严重的水土流失问题,土壤侵蚀严重的区域主要分布在永仁县南部、元谋县西南部、牟定县东北部和禄丰县西北部,整体呈现出由东北向西南减弱的特征。最优参数地理探测器结果表明,土地利用类型是影响龙川江流域土壤侵蚀时空变化的主导因子,土地利用类型的转变影响土壤侵蚀变化,这一结果与丁文荣等^[16]应用土地利用类型转变导致土壤侵蚀强度的改变的结果基本一致。龙川江流域内主要土地利用类型为林地、耕地和草地,20年间,耕地面积增大主要集中在流域东北部的元谋盆地,而草地和林地面积的增加主要分布于其他区域,这一变化与土壤侵蚀空间变化相似,侧面印证土地利用类型是影响土壤侵蚀空间变化的主导因子。地理探测器交互探测表明,土地利用类型和坡度的交互影响对龙川江流域影响最大,这与田培等^[32]的研究结果类似。不同土地利用类型中耕地的土壤侵蚀最为严重,且程度随坡度增加而加强。因此,龙川江流域水土流失治理需在优化土地利用格局时注重坡度的分布规律,从而科学调控土壤侵蚀。

本研究中坡度与其他因子在交互作用时显著提高影响土壤侵蚀时空变化的解释力,流域内土壤侵蚀严重区域大多位于元谋盆地及其周边山地,证明复杂地形加剧水土流失问题,同时也加大水土流失治理的难度。陈思旭等^[33]指出南方石土山区土壤侵蚀随着坡度的上升呈现不同的趋势,SUN等^[34]也在黄土高原有类似的研究结果。本研究对龙川江流域土壤侵蚀时空变化进行分析,但未量化地形因子对土壤侵蚀的影响,主要受制于低精度DEM,这类数据对地形的表达有限甚至存在较大误差,因此在以后的研究中应考虑到DEM分辨率对结果的影响,选择高精度DEM数据,通过探究坡度坡向与海拔等因素对土壤侵蚀的影响,提高研究结果的可靠性。

5 结论

(1)龙川江流域土壤侵蚀主要以微度侵蚀与轻度侵蚀为主,中度侵蚀及以上等级侵蚀主要位于流域东北部元谋盆地。2000—2010年,土壤侵蚀时空变化较小,2010—2020年,中度及以上的侵蚀面积明显减小,共有834.02 km²的中度及以上侵蚀区域转为微度和轻度侵蚀,从空间分布上看,这些变化主要分布于元谋盆地以外的其他区域。

(2)在影响研究区土壤侵蚀方面,土地利用类型是影响研究区土壤侵蚀时空变化的主导因子,影响因

子之间的交互作用强于单一因子,土地利用类型与坡度的交互作用对研究区土壤侵蚀时空变化的影响解释力最强, q 值为 0.45。

(3)植被覆盖是龙川江流域占比最大的土地利用,提高植被覆盖是防治土壤侵蚀最有效的措施,“退耕还林(草)”“生态环境综合治理”等水土保持工程是土壤侵蚀防治的必要措施,未来在龙川江流域应重点关注植被覆盖变化和土地利用类型变化对土壤侵蚀防治的影响。

参考文献:

- [1] 任利东,王丽,林琳,等.农田土壤机械压实研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):610-626.
REN LD, WANG L, LIN L, et al. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: A Review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3):610-626.
- [2] 马含,符素华,董丽霞,等.基于地理探测器的土壤侵蚀空间分异关键影响因子分析[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(2):33-38.
MA H, FU S H, DONG L X, et al. Analysis of key affecting factors in soil erosion spatial differentiation based on GeoDetector[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(2):33-38.
- [3] 吴镇宇,罗梦琦,郭红丽,等.基于地理探测器的江苏省沿江地区土壤侵蚀定量分析[J].水土保持通报,2022,42(2):184-188,387.
WU Z Y, LUO M Q, GUO H L, et al. Quantitative analysis of soil erosion along Yangtze River in Jiangsu Province based on geographic detector[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2):184-188,387.
- [4] 丁杰,杨新兵,朱辰光,等.崇礼清水河流域土壤侵蚀空间格局及其影响因素研究[J].水土保持学报,2018,32(4):73-80.
DING J, YANG X B, ZHU C G, et al. Spatial pattern and influence factors of soil erosion of Qingshui River Basin in Chongli[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4):73-80.
- [5] 余万洋,赵龙山,张劲松,等.黄河小浪底库区土壤侵蚀驱动因子定量归因分析[J].水土保持学报,2023,37(3):155-163,171.
YU W Y, ZHAO L S, ZHANG J S, et al. Quantitative attribution analysis of driving factors of soil erosion in Xiaolangdi Reservoir area of the Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):155-163,171.
- [6] GUO L J, LIU R M, MEN C, et al. Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 779:e146474.
- [7] 查轩,唐克丽,张科利,等.植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,1992,6(2):52-58.
ZHA X, TANG K L, ZHANG K L, et al. The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(2):52-58.
- [8] JIN F M, YANG W C, FU J X, et al. Effects of vegetation and climate on the changes of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 773:e145514.
- [9] GAO J, SHI C Q, YANG J Y, et al. Analysis of spatiotemporal heterogeneity and influencing factors of soil erosion in a typical erosion zone of the southern red soil region, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 154:e110590.
- [10] 姚昆,周兵,何磊,等.基于地理探测器的岷江上游地区土壤侵蚀变化[J].水土保持研究,2022,29(2):85-91.
YAO K, ZHOU B, HE L, et al. Changes in soil erosion in the upper reaches of the Minjiang River based on geo-detector[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):85-91.
- [11] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.
- [12] SONG Y Z, WANG J F, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience and Remote Sensing, 2020, 57(5):593-610.
- [13] WANG L, ZHENG J L, ZHANG B, et al. Short-term morphological evolution of an ephemeral gully in the Dry-hot Valley of Southwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225:e105556.
- [14] 周跃,刘洪江,张军,等.金沙江中下游龙川江流域水土流失动态监测和防治决策系统研究[J].水土保持研究,2004,11(2):4-7.
ZHOU Y, LIU H J, ZHANG J, et al. A preliminary study of dynamic-system establishment for soil erosion inspect in Yunnan Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(2):4-7.
- [15] 孙丽萍,王小丹.基于根系解剖结构的金沙江干热河谷土壤侵蚀速率估算[J].地理科学,2012,32(4):492-498.
SUN L P, WANG X D. Evaluation of soil erosion rate based on anatomical structure of treeroots: A case study in the dry-hot valley of Jinsha River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(4):492-498.
- [16] 丁文荣,周跃,曾和平.龙川江流域土地利用方式与土壤侵蚀关联分析[J].人民长江,2009,40(7):33-35.
DING W R, ZHOU Y, ZENG H P. Correlation analysis

- between land use patterns and soil erosion in Longchuan River Basin[J]. *Yangtze River*, 2009, 40(7): 33-35.
- [17] 周跃, 丁文荣, 曾和平. 云南纵向岭谷区河流输沙量对土地利用变化的响应: 以黑惠江、龙川江、盘龙河流域为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 426-429.
- ZHOU Y, DING W R, ZENG H P. Impact of land use on sediment discharge from rivers in longitudinal valleys in Yunnan: A case study of three river basins[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(5): 426-429.
- [18] 云南省楚雄彝族自治州龙川江保护管理条例(修订)[N]. *楚雄日报(汉)*, 2013-06-25(3).
- Regulations on the protection and management of the Longchuan River in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture, Yunnan Province (Revised) [N]. *Chuxiong Daily (Han)*, 2013-06-25(3).
- [19] 胡琳, 李思悦. 不同空间尺度土地利用结构与景观格局对龙川江流域水质的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(7): 1470-1481.
- HU L, LI S Y. Scale effects of land use structure and landscape pattern on water quality in the Longchuan River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(7): 1470-1481.
- [20] 李灿, 曾和平. 基于面积转移矩阵的龙川江流域土地利用变化研究[J]. *人民长江*, 2018, 49(17): 39-44, 51.
- LI C, ZENG H P. Research on land use change in Longchuan River Basin based on transfer matrix[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(17): 39-44, 51.
- [21] GHOSAL K, DAS BHATTACHARYA S. A review of RUSLE model[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020, 48(4): 689-707.
- [22] ARNOLDUS H M J. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation [M]. De BOODT M, GABRIELS D. *Assessment of Erosion*. Chichester UK: Wiley, 1980.
- [23] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPICa new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [24] MC COOL 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(5): 1387-1396.
- [25] 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.
- [26] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 105-110.
- FU S H, LIU B Y, ZHOU G Y, et al. Calculation tool of topographic factors[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5): 105-110.
- [27] DE ASIS A M, OMASA K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 309-324.
- [28] 覃杰香, 王兆礼. 基于 GIS 和 RUSLE 的从化市土壤侵蚀量预测研究[J]. *人民珠江*, 2011, 32(2): 37-41.
- QIN J X, WANG Z L. Study on prediction of soil erosion in Conghua city based on GIS and RUSLE[J]. *Pearl River*, 2011, 32(2): 37-41.
- [29] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Soil erosion intensity grading standard: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [30] 陈先刚, 张一平, 詹卉. 云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力[J]. *林业科学*, 2008, 44(5): 24-30.
- CHEN X G, ZHANG Y P, ZHAN H. Biomass carbon sequestration potential of trees under the grain for green programs in Yunnan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(5): 24-30.
- [31] 王猛, 王鹤松, 姜超, 等. 基于 RUSLE 和地理探测器模型的西南地区土壤侵蚀格局及定量归因[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(6): 1386-1402.
- WANG M, WANG H S, JIANG C, et al. Spatial soil erosion patterns and quantitative attribution analysis in southwestern China based on RUSLE and geo-detector model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(6): 1386-1402.
- [32] 田培, 贾婷惠, 平耀东, 等. 基于 RUSLE 和地理探测器的鄂西北土壤侵蚀时空分异与归因[J]. *热带地理*, 2023, 43(11): 2216-2228.
- TIAN P, JIA T H, PING Y D, et al. Spatial-temporal differentiation and attribution of soil erosion in northwestern Hubei based on RUSLE and geographic detector[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(11): 2216-2228.
- [33] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1288-1297.
- CHEN S X, YANG X H, XIAO L L, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model[J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [34] SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2014, 121: 151-163.