

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.028

李嘉宁, 张红丽, 田昌园, 等. 长冲河小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性分布特征及耦合关系分析[J]. 水土保持学报, 2024, 28(6): 79-88.

LI Jianing, ZHANG Hongli, TIAN Changyuan, et al. Distribution characteristics and coupling relationship between soil erosion and hydrologic and sediment connectivity in Changchong River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 28(6): 79-88.

## 长冲河小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性 分布特征及耦合关系分析

李嘉宁<sup>1</sup>, 张红丽<sup>2</sup>, 田昌园<sup>1</sup>, 张艺<sup>1</sup>, 查同刚<sup>1</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.水利部水土保持监测中心, 北京 100000)

**摘要:** [目的] 为明确长冲河小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性的分布特征及耦合关系, 为该区的水土流失治理、土壤侵蚀科学防治提供依据。[方法] 通过 GIS 平台, 采用 RUSLE 模型并引入连通性指数(IC)和地形湿度指数(TWI), 定量评估长冲河小流域 2021 年的土壤侵蚀和水文泥沙连通性分布特征, 探讨小流域不同坡度、土地利用、高程和坡向对不同土壤侵蚀强度、水文泥沙连通性等级的影响, 并通过空间自相关分析土壤侵蚀与水文泥沙连通性的耦合关系。[结果] (1) 长冲河小流域平均土壤侵蚀模数为 380 t/(hm<sup>2</sup>·a), 土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主, 整体上由北向南逐渐加剧。(2) 高水文泥沙连通性主要分布在耕地中, 林草地则相反。较高值主要位于长冲河小流域坡度低、易积水的低洼平坦区域, 较低值主要在陡峭山区。(3) 地形因子和土地利用类型显著影响土壤侵蚀和水文泥沙连通性( $p < 0.01$ )。相对较低的土壤侵蚀强度与水文泥沙连通性等级, 较高的侵蚀强度与连通性等级耕地面积占比较高, 而林地和草地面积占比较小; 各水文泥沙连通性等级中, 5°~10°和 10°~15°坡度, 90.30~131.9, 131.96~175.34 m 高程面积占比均较多, 等级越高, 阳坡面积所占比例越高。(4) 土壤侵蚀与水文泥沙连通性呈显著的正相关, 主要体现在坡度、坡向、土地利用和高程上。[结论] 提高长冲河小流域的植被覆盖度、优势度等来降低其水文泥沙连通性可以有效减少土壤侵蚀和产沙, 对小流域的生态环境治理、水沙调控和水土流失科学防治等具有重要影响。

**关键词:** 泥沙连通性; 水文连通性; 土壤侵蚀; RUSLE 模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0079-10

## Distribution Characteristics and Coupling Relationship Between Soil Erosion and Hydrologic and Sediment Connectivity in Changchong River Basin

LI Jianing<sup>1</sup>, ZHANG Hongli<sup>2</sup>, TIAN Changyuan<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, ZHA Tonggang<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100000, China)

**Abstract:** [Objective] To clarify the distribution characteristics and coupling relationship between soil erosion and hydrologic and sediment connectivity in Changchong River Basin, and to provide basis for soil erosion control and soil erosion prevention in this area. [Methods] By using the RUSLE model and introducing the connectivity index (IC) and topographic humidity index (TWI), the distribution characteristics of soil erosion, hydrological and sediment connectivity in the Changchong River Basin in 2021 were quantitatively evaluated by GIS platform. The effects of different slope, land use, elevation and slope direction on soil erosion intensity and hydrologic and sediment connectivity in small catchments were discussed, and the coupling relationship between soil erosion and hydrologic and sediment connectivity was analyzed through spatial autocorrelation. [Results] (1) The average soil erosion modulus in the Changchong River Basin was 380 t/(hm<sup>2</sup>·a), and the soil erosion intensity was mainly slight erosion, which gradually intensified from north to south. (2) The high hydrological and sediment connectivity is mainly distributed in cultivated land,

收稿日期: 2024-06-06

修回日期: 2024-07-04

录用日期: 2024-07-22

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-10-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF130300204)

第一作者: 李嘉宁(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail: ljn33@bjfu.edu.cn

通信作者: 查同刚(1972—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

and the opposite is true in forest and grassland land. The higher value is mainly located in the low-lying flat area with low slope and easy water accumulation, while the lower value is mainly in the steep mountainous area. (3) Topographic factors and land use types significantly affected soil erosion and hydrological and sediment connectivity ( $p < 0.01$ ). The relatively low soil erosion intensity and hydrological and sediment connectivity levels, the higher erosion intensity and connectivity levels accounted for a higher proportion of arable land, but a smaller proportion of woodland and grassland. Among the hydrological and sediment connectivity grades, the proportion of  $5^\circ \sim 10^\circ$  and  $10^\circ \sim 15^\circ$  slope,  $90.30 \sim 131.96$  and  $131.96 \sim 175.34$  m elevation area is higher. The higher the grade, the higher the proportion of sunny slope area is. (4) Soil erosion has a significant positive correlation with hydrologic and sediment connectivity, mainly reflected in slope, slope direction, land use and elevation. [Conclusion] Improving the vegetation coverage and dominance of the Changchong River Basin to reduce its hydrologic and sediment connectivity can effectively reduce soil erosion and sediment production, and has an important impact on the ecological environment management, water and sediment control, and scientific prevention and control of soil and water loss in the small watershed.

**Keywords:** sediment connectivity; hydrological connectivity; soil erosion; RUSLE model

Received: 2024-06-06

Revised: 2024-07-04

Accepted: 2024-07-22

Online(www.cnki.net): 2024-10-14

土壤侵蚀是全球广为关注的热点环境问题之一<sup>[1]</sup>,对农业生产和生态环境平衡具有重要影响<sup>[2]</sup>。水文连通性是由水介导的物质、能量和生物体在水文循环要素之间的运动过程<sup>[3]</sup>,对维持生态系统的生态完整性至关重要<sup>[4]</sup>。泥沙连通性描述的是流域内不同地貌和景观单元间泥沙流动的连续性和关联性,不仅揭示泥沙源汇区之间的迁移路径,而且体现泥沙向流域外迁移的难易程度<sup>[5]</sup>。泥沙连通性是研究“源—汇”耦合关系的关键环节,在土地利用、水土流失方面有着重要的科学意义<sup>[6]</sup>。土壤侵蚀导致地表植被减少和土壤结构破坏,进而影响水文连通性<sup>[7]</sup>。土壤侵蚀还改变地表的微地貌形态,如形成沟壑和沙丘等地貌特征,从而进一步影响水文泥沙连通性的分布和变化<sup>[8]</sup>。对小流域土壤侵蚀现状评价,并探究土壤侵蚀与水文泥沙连通性的耦合关系,可为该区的水土保持、水沙治理等提供理论支撑和科学依据。

已有学者<sup>[9-12]</sup>常用 RUSLE 模型来评估土壤侵蚀情况,且在大别山区应用广泛。对于水文泥沙连通性,许多学者<sup>[13-15]</sup>采用泥沙连通性指数(IC)来评估泥沙空间输移特征,它是衡量结构连通性的一种重要指标,可以从宏观上反映泥沙和径流连通性,是评价流域泥沙连通性的重要手段<sup>[16]</sup>。地形湿度指数(TWI)是一种分析地貌景观与水文通道相对位置的重要工具,它是由 BEVEN 等<sup>[17]</sup>提出的水文预测模型,将河道网络和动态贡献区域的重要分布效应与简单集总参数流域模型的优点结合起来,应用较为广泛<sup>[18-21]</sup>。

长冲河小流域是大别山区以经果林为主的典型

小流域,大别山区是我国重要的生态功能区,也是长江中下游地区重要的生态屏障<sup>[22]</sup>。经果林为主的小流域受人为活动干扰的程度较为强烈,其水文泥沙连通相比自然条件下较为复杂,探究该类区域水文泥沙连通性与土壤侵蚀的关系对于指导水土保持工作具有重要意义。基于此,本文分析长冲河小流域土壤侵蚀、水文泥沙连通性的分布特征,并探究其影响因素,进一步分析该小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性的耦合关系,以期为该小流域土壤侵蚀科学防治、水土资源合理高效利用提供有效参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长冲河小流域( $30.57^\circ\text{—}31.33^\circ\text{N}$ ,  $117.01^\circ\text{—}117.34^\circ\text{E}$ )位于皖西大别山东伸余脉的低山丘陵区,山峦绵延,地势西南高、东北低。该流域面积为  $14.89\text{ km}^2$ ,高程  $40\sim 347\text{ m}$ ,属北亚热带湿润季风气候,年平均气温  $14\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降水量达  $1\ 200\text{ mm}$ ,雨季多集中在 5—8 月。流域内土壤类型为棕壤、黄棕壤和紫色土等,土地利用类型以林地、草地、耕地为主,主要经济作物为油茶和茶叶<sup>[23]</sup>。

### 1.2 数据来源

(1)土地利用分类数据:来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),使用 ENVI 5.1 进行人工解译,通过 LUCC 分类体系对土地利用类型分类(图 1),空间分辨率为  $30\text{ m}$ ;

(2)土壤数据:来源于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)(<http://westdc.westgis.ac>

cn/),空间分辨率为 1 km;

(3)降雨数据:来源于中国地面气象站日值数据集(v3.0)中选取 2021 年、2022 年和 2023 近 3 年长冲河小流域周围 10 个气象站点的日降雨量数据;

(4)数字高程数据(DEM):来源于地理空间数据云,分辨率为 30 m(https://www.gscloud.cn/).最后将所有空间数据均统一到 30 m 的空间分辨率进行计算。

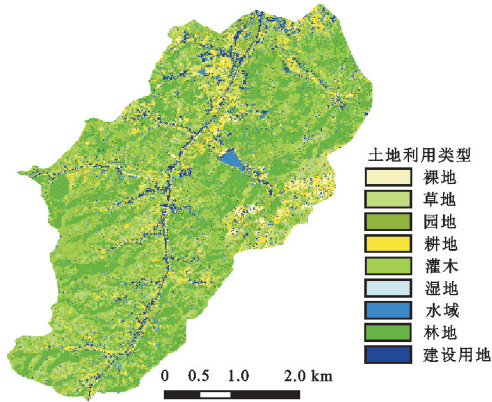


图 1 研究区土地利用概况

Fig.1 Overview of land use in the study area

## 2 研究方法

### 2.1 土壤流失模型计算

本研究使用修正后的土壤流失方程(RUSLE)计算长冲河小流域的土壤侵蚀模数,计算公式为:

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

式中:A 为土壤侵蚀模数[t/(hm<sup>2</sup>·a)];R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[(t·hm<sup>2</sup>·h)/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)];LS 为坡度坡长因子,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。

降雨侵蚀力因子的计算采用章文波等<sup>[24]</sup>建立的全国日降雨数据拟合模型估算降雨侵蚀力,以长冲河小流域周围 10 个雨量站 2021 年、2022 年和 2023 近 3 年逐日降水量资料为基础,其计算模型为:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^K (D_j)^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.836 \cdot 3 + \left( \frac{18.144}{P_{d12}} \right) + \left( \frac{24.455}{P_{y12}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586 \beta^{-7.189} \quad (4)$$

式中:R<sub>i</sub>为第 i 个半月的降雨侵蚀力值[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)];D<sub>j</sub>为半个月第 j 天降雨量,D<sub>j</sub>≥12 mm<sup>[25]</sup>;K 为若干半月时段数,本文将每个月等分为 2 个半月时段;α 和 β 均为模型参数;P<sub>d12</sub>为日降雨量≥12 mm 的日平均降雨量(mm);P<sub>y12</sub>为日降雨量≥12 mm 年平均降雨量(mm)。

土壤可蚀性因子的计算本文采用 WILLIAMS 等<sup>[26]</sup>提出的基于土壤有机碳含量和土壤颗粒组成的

方法,计算公式为:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.025 \cdot 6 \text{SAN} (1 - \text{SIL} / 100)]\} \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left( 1 - \frac{0.75\text{SN}}{\text{SN} + \exp(-5.51 + 22.95\text{SN})} \right) \quad (5)$$

式中:SAN 为土壤砂粒;SIL 为粉粒;CLA 为黏粒;SN 为常数;C 为土壤有机碳(%).

坡度因子的算法是对 MC COOL 等<sup>[27]</sup>和 LIU 等<sup>[28]</sup>提出的坡度算法的改良,根据长冲河小流域 DEM (digital elevation model)数据在 ArcGIS 10.2 软件中提取坡长坡度因子。

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中:S 为坡度因子;θ 为地面坡度;L 为坡长指数;λ 为水平坡长(m)。

植被覆盖和管理因子是既定植被覆盖或田间管理下土壤侵蚀与裸地土壤侵蚀之比,根据蔡崇法等<sup>[29]</sup>得到 FVC 与 C 值的对应关系,及使用范围。计算公式为:

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

$$C = \begin{cases} 1 & \text{FVC} \leq 0.095 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg \text{FVC} & 0.095 < \text{FVC} < 0.783 \\ 0 & \text{FVC} > 0.783 \end{cases} \quad (9)$$

根据有关学者<sup>[30]</sup>的研究成果并结合当地实际情况对水土保持因子 P 进行赋值,建设用地和水域取 0,耕地取 0.4,湿地取 0.15,草地和林地取 1。

### 2.2 泥沙连通性指数

基于 BORSELLI 等<sup>[31]</sup>的研究结果,采用 IC 连通性指数来量化流域的泥沙连通性,其表达式见公式(10),其由上坡贡献区域(D<sub>up</sub>)和下坡流域(D<sub>dn</sub>)计算得出。本研究中林草地和灌木的权重因子 W 使用土壤流失方程(RUSLE)中的植被管理与覆盖因子 C 值。

$$\text{IC} = \lg \frac{D_{\text{up}}}{D_{\text{dn}}} = \lg \frac{\overline{W} \overline{S} \sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}} \quad (10)$$

式中:D<sub>up</sub>为上坡贡献区域,表示上坡集水区泥沙向下游输移的可能性;D<sub>dn</sub>为下坡流域,表示下坡泥沙输移区到达最近泥沙汇的可能性;A 为上坡贡献面积(m<sup>2</sup>); $\overline{W}$ 为上坡贡献面积的平均权重因子(无量纲);

$\bar{S}$  为上坡贡献面积的平均坡度(m/m);  $d_i$  为第  $i$  个单元沿下坡方向的流动路径长度(m);  $W_i$  和  $S_i$  分别为第  $i$  个单元的权重和坡度。

### 2.3 地形湿度指数

地形湿度指数(TWI)是一种在水文模型应用中广泛推广的测量方法,是水文参数,是一种用于识别地表水文连通性的指标,主要通过结合局部上坡贡献面积和坡度,量化于地形对水文作用过程的控制<sup>[32]</sup>,地形湿度指数的计算见公式(11)。

$$TWI = \ln \left( \frac{\alpha}{\tan \beta} \right) \quad (11)$$

式中: $\alpha$  为流经地表  $i$  点的单位等高线长度上的汇流面积( $m^2/m$ ),表示上坡的面积; $\beta$  为该点坡度( $^\circ$ )。利用 ArcGIS 中的水文统计工具计算每个单元的水流方向和累积量。

### 2.4 空间自相关分析

空间自相关分析是一种用于研究地理数据中,某一变量在空间上的分布特征及其相互依赖关系的统计方法。指空间上相邻或接近的位置上的数据值之间可能存在某种依赖或相似性,而这种依赖或相似性会随着距离的增加而减弱或消失<sup>[33]</sup>。Moran's  $I$  指数是最常用的空间自相关指数之一,用于评估属性在研究区域内的要素之间是否存在聚类、离散或随机的空间过程。通过 GeoDial 18 软件进行空间自相关分析,计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (12)$$

式中: $n$  为空间单元总数;位于坐标位置  $i$  的属性值记为  $x_i$ ,坐标位置  $j$  的属性值则记为  $x_j$ ;  $W_{ij}$  为空间权重矩阵; $S^2$  为样本方差。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤侵蚀、水文泥沙连通性的空间分布特征

3.1.1 土壤侵蚀的空间分布特征 长冲河小流域 2021 年平均土壤侵蚀模数为  $380 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,土壤侵蚀模数为  $0 \sim 19\,254 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,对应侵蚀总量约  $6.25 \times 10^6 \text{ t}$ ,总体属微度侵蚀区。依据水利部颁布的《(SL 190—2007)土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[34]</sup> 进行分类,将其分为 6 个不同级别,分别是微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀及剧烈侵蚀(图 2),整体分布趋势为强烈及以上侵蚀强度主要在中南部,微度侵蚀占比最多,由北向南逐渐加剧。由表 1 可知,长冲河小流域属于微度侵蚀的面积最高,为  $1\,311.21 \text{ hm}^2$ ,其面积占流域面积的 88.09%,相反剧烈侵蚀面积最低,为  $0.54 \text{ hm}^2$ ,其面积占流域面积的 0.04%。

微度、轻度和中度侵蚀三者总面积为  $1\,459.89 \text{ hm}^2$ ,占侵蚀总面积的 98.86%。因此,该流域土壤侵蚀主要以中度以下强度侵蚀为主,微度侵蚀占比最大。

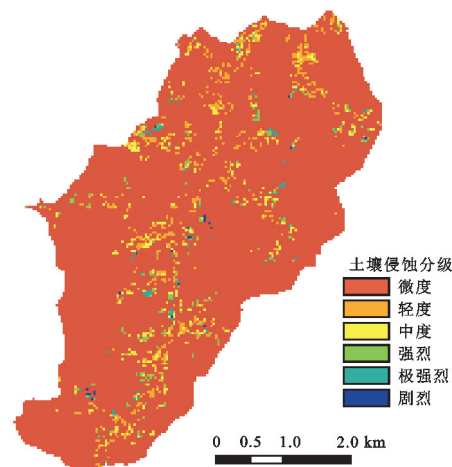


图 2 长冲河小流域土壤侵蚀强度等级分布

Fig.2 Distribution map of soil erosion intensity in Changchong River watershed

表 1 长冲河小流域土壤侵蚀量

Table 1 Soil erosion statistics in Changchong River watershed

侵蚀等级	侵蚀模数/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	侵蚀面积/ $\text{hm}^2$	面积占比/%
微度侵蚀	<5	1 311.21	88.09
轻度侵蚀	5~25	89.82	6.03
中度侵蚀	25~50	58.86	3.95
强烈侵蚀	50~80	18.45	1.24
极强烈侵蚀	80~150	9.63	0.65
剧烈侵蚀	>150	0.54	0.04

3.1.2 水文连通性空间分布特征 长冲河小流域的水文连通性分布特征见图 3。湿度指数(TWI)为  $3.81 \sim 20.78$ ,空间分布整体呈北部高南部低的趋势,长冲河小流域 TWI 较高值区( $9.53 \sim 20.78$ )主要出现在容易积水的低洼区域及具有低坡度特征的平坦地形区。在平坦地区,由于坡度较小,地势较为平坦,更容易积水并形成汇水区,有利于水流的积聚和汇流,因此,TWI 的高值往往出现在这些区域;而 TWI 较低值区( $3.81 \sim 7.54$ )则通常出现在具有陡峭、分叉等特点的区域,如河谷、山脊,这些地区由于地形的凸起而不易积水,水流也倾向于沿着较陡峭的路径流动。

3.1.3 泥沙连通性的空间分布特征 长冲河小流域泥沙连通性指数值为  $-3.44 \sim 7.15$ (图 4),标准偏差为 1.14,平均值为 2.69。其中泥沙连通性指数最大值( $3.99 \sim 7.15$ )的占比为 13.93%,主要位于耕地中。是由于该区域整体较平整、泥沙连通性强,再加上植被覆盖率低,因此泥沙容易汇入到河网中,造成泥沙连通性较高的现象。较大值( $2.08 \sim 3.99$ )占比为 58.8%,主要位于建设用地,建设用地区域土地硬化率高。泥沙连通性指数较小值( $-3.44 \sim 2.08$ )占比

为 27.26%，主要出现在植被覆盖较高、生态质量较好的林地、草地和灌木。

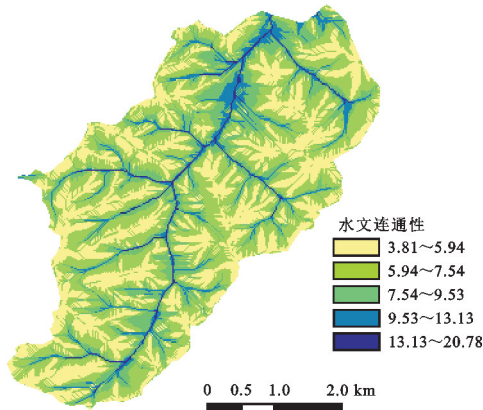


图 3 长冲河小流域湿度指数(TWI)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of humidity index (TWI) in Changchong River watershed

### 3.2 土壤侵蚀、水文泥沙连通性的土地利用和地形分异特征

3.2.1 不同土壤侵蚀强度的土地利用和地形分异特征 从图 5 可以看出,在不同土壤侵蚀强度等级中,各土地利用类型面积占比存在差异,其中面积占比最多的是耕地。相对较高的侵蚀强度中耕地、茶园面积占比较高,林地和草地面积占比较低。5°~10°,10°~15°

坡度的面积占比在各土壤侵蚀强度中较多。在0~5°坡度,土壤侵蚀强度为轻度的面积占比高于微度面积占比。阴坡面积占比保持稳定,阳坡的面积占比逐渐增加,土壤侵蚀强度也越剧烈。高程为 90.30~131.96, 131.96~175.34 m 的面积占比在各土壤侵蚀强度中较多,在 40.98~90.30 m 高程范围中处于轻度及以上的面积占比随着高程面积占比减少而降低。

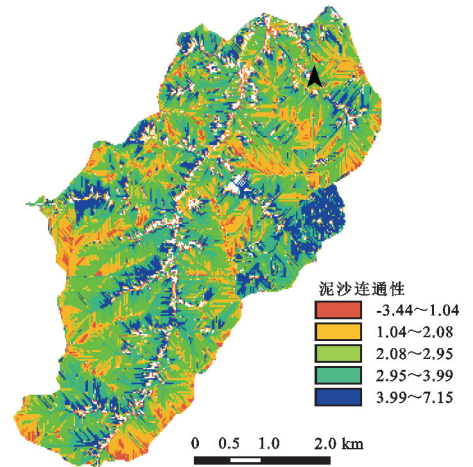


图 4 长冲河小流域泥沙连通性指数(IC)的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of sediment connectivity index (IC) in Changchong River watershed

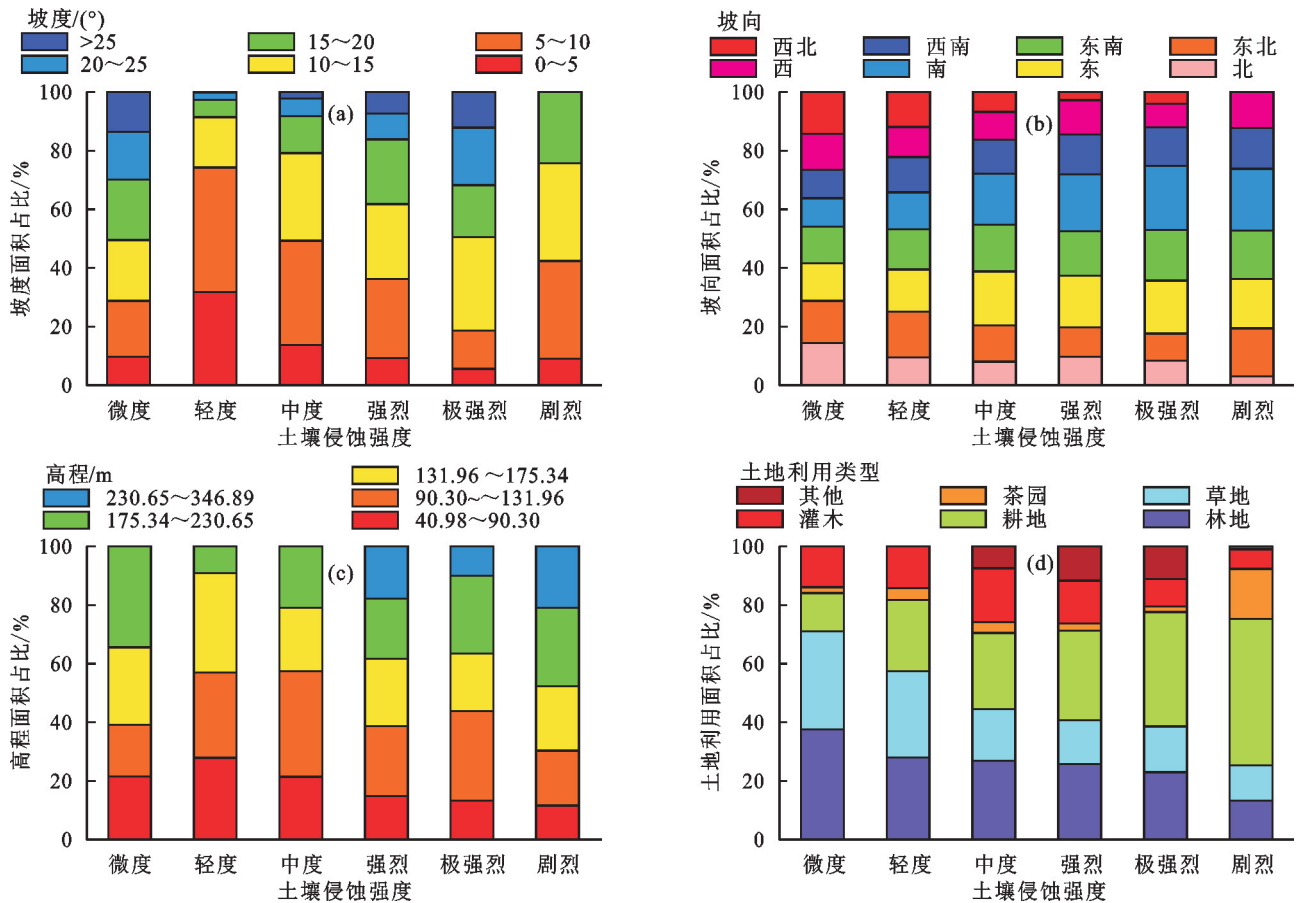


图 5 不同土壤侵蚀强度下坡度、土地利用、高程和坡向面积占比

Fig.5 The proportion of slope, land use, elevation and slope area under different soil erosion intensity

3.2.2 不同水文连通性等级的土地利用和地形分异特征 从图 6 可以看出,与较低的水文连通性等级相比,较高的水文连通性等级中耕地、茶园、其他地类面积占比较高,而林草地面积占比较低。 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度的面积占比在各水文连通性等级中均较多。

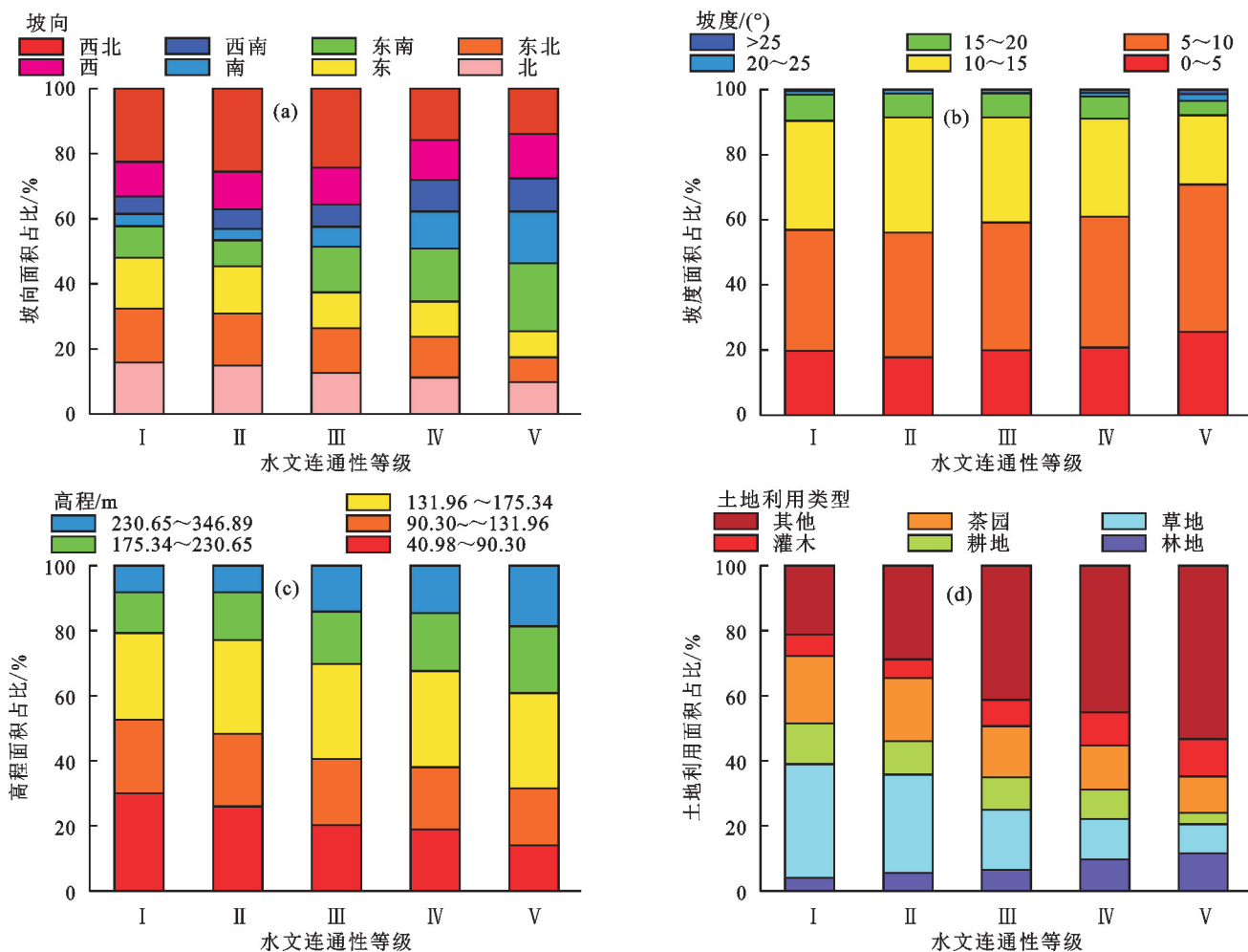


图 6 不同水文连通性等级下坡度、土地利用、高程和坡向面积占比

Fig.6 The proportion of slope, land use, elevation and slope area under different hydrological connectivity grades

3.2.3 不同泥沙连通性等级的土地利用和地形分异特征 将长冲河小流域泥沙连通性值由低到高平均分为 5 个等级:  $-3.44\sim 1.04$ (I),  $1.04\sim 2.08$ (II),  $2.08\sim 2.95$ (III),  $2.95\sim 3.99$ (IV) 和  $3.99\sim 7.15$ (V), 进而探讨不同坡度、土地利用、高程、坡向对泥沙连通性的影响。由图 7 可知,不同泥沙连通性等级下的坡度与土地利用面积占比呈显著差异。在所有泥沙连通性等级中, $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度和  $90.30\sim 131.96$ 、 $131.96\sim 175.34$  m 高程的面积占比均较多。低泥沙连通性中林草地面积占比较高。在  $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$  坡度中,泥沙连通性等级(II~IV)随着坡度面积占比增加而升高。不同坡向中,泥沙连通性等级随着阳坡(南、西南)的面积增加而升高。

### 3.3 土壤侵蚀与水文泥沙连通性的耦合关系分析

长冲河小流域水文泥沙连通性与土壤侵蚀影响因素,如坡度、土地利用、高程和坡向的双变量空间自

在不同的水文连通性等级中,连通性越高, $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 、 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 坡度的面积占比越高。高程在  $131.96\sim 175.34$  m 的面积占比在所有水文连通性等级中最多。在不同坡向中,阴坡面积占比随着水文连通性等级升高而降低,阳坡则相反。

相关分析(表 2)得出,这些影响因素整体上都与水文泥沙连通性呈显著正相关,其中土地利用与水文连通性的相关系数最高,与泥沙连通性具有较高的相关性,莫兰指数分别为 0.043,0.035。

土地利用可以从多方面来影响水文泥沙连通性,涉及到不同土地利用类型、地表微地形特征和气候变化等因素;高程与泥沙连通性相关系数最高,莫兰指数为 0.036,与水文连通性相关性较高,莫兰指数为 0.034,主要体现在不同海拔高度,水流直接影响和调节物质、能量和有机的转移过程,关系到水循环和生物地球化学过程;坡度因子水文泥沙连通性莫兰指数分别为 0.015,0.018,在不同坡度梯度下,水文连通性和对植被格局、土壤侵蚀存在一定联系,水文连通性通过影响流域内物质、能量和信息传递与交换进而不断影响土壤侵蚀过程。

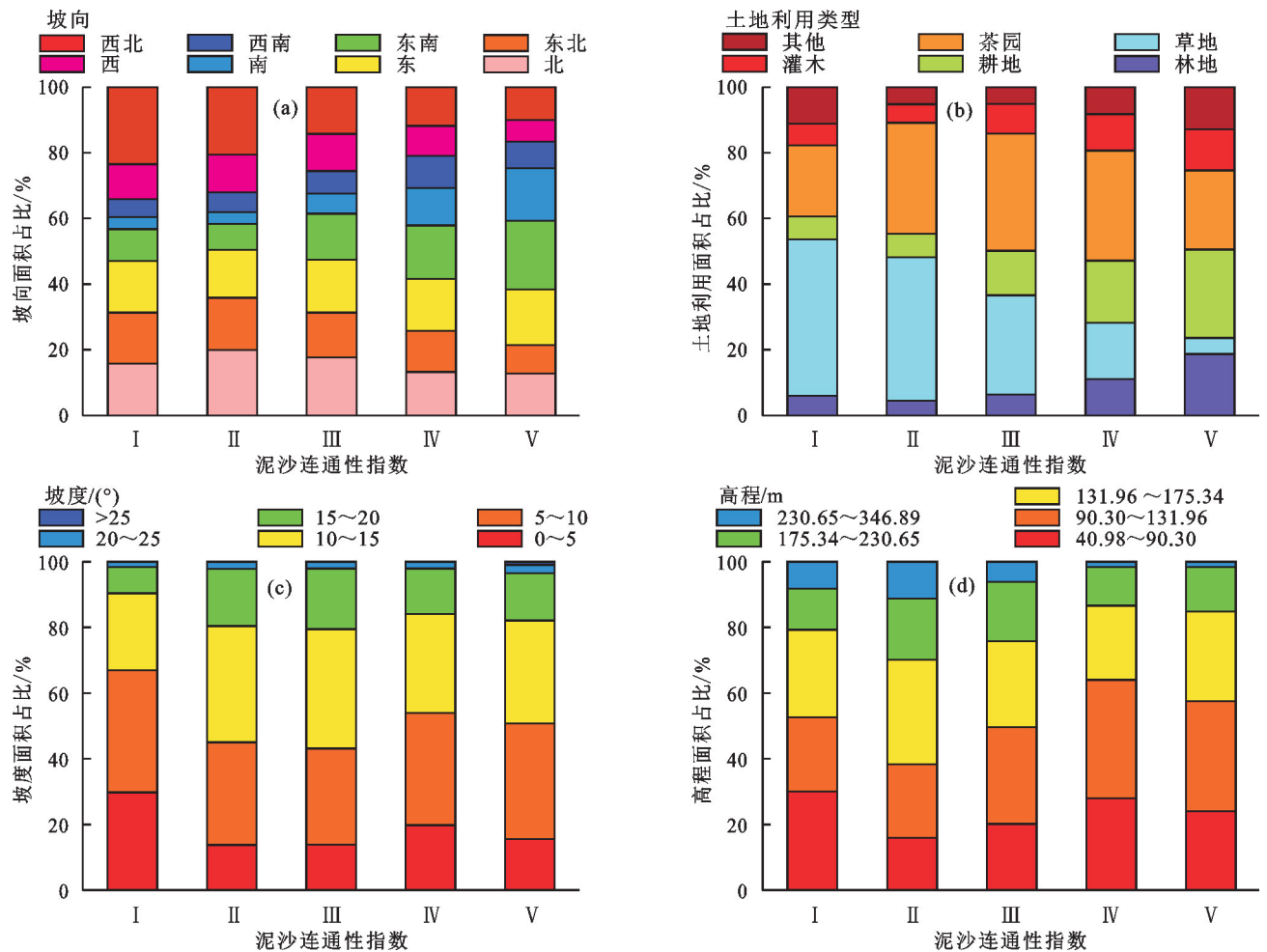


图 7 不同泥沙连通性等级的坡度、土地利用、高程和坡向面积占比

Fig.7 The proportion of slope, land use, elevation and slope area of different sediment connectivity grades

表 2 土壤侵蚀影响因素与水文泥沙连通性双变量空间自相关分析

Table 2 Bivariate spatial autocorrelation analysis of soil erosion influencing factors and hydrologic and sediment connectivity

土壤侵蚀影响因素	水文连通性		泥沙连通性	
	Moran's I	相关系数	Moran's I	相关系数
坡度	0.015	0.056 **	0.018	0.062 **
土地利用	0.043	0.083 **	0.035	0.074 **
高程	0.034	0.067 **	0.036	0.065 **
坡向	0.021	0.074 **	0.019	0.082 **

注: \*\* 表示相关性显著 ( $p < 0.01$ )。

### 4 讨论

长冲河小流域整体上属微度侵蚀,其土地利用类型、坡度、坡向、高程影响土壤侵蚀特征变化,可能是由于小流域内的地形、气候条件及人类活动等因素的综合作用引起。邓威等<sup>[35]</sup>评估了安徽省合肥市苦驴河上游小流域 2020 年土壤侵蚀及其养分流失特征,得出主要为微度和轻度侵蚀;赵明松等<sup>[36]</sup>通过研究皖西大别山区的土壤侵蚀空间特征,得出区域以微度和轻度侵蚀为主,上

述研究结果均证明本研究结果的可靠性。

本研究发现,土地利用类型是影响水文泥沙连通性和土壤侵蚀变化的重要因素。王佳楠等<sup>[37]</sup>通过对辽西低山丘陵区土壤侵蚀和泥沙连通性的研究得出,土地利用类型对于土壤侵蚀与泥沙连通性耦合关系具有重要影响,坡耕地具有高泥沙连通性,而林草地泥沙连通性较低,与本研究对长冲河小流域的分析结果一致。林草地往往具有较低的水文泥沙连通性,这是由于林草地、灌木的植被覆盖度较高,水分保持能力和水沙拦截能力较强,地表的植被、枯落物可以削弱径流流速,减少土壤侵蚀的发生,而耕地的土壤固持作用低于林草地,植被覆盖度低,尤其在强降雨条件下,径流容易冲刷地表造成水土流失。植被对生态水文有很强的调节作用,如植物冠层截留、凋落物贮水等。提高土壤入渗能力,增加地面粗糙度,延长径流可以使水文泥沙连通性降低,减少土壤侵蚀,这与袁亚男<sup>[38]</sup>对听水河流域土地利用及水文连通性分布变化的研究结果一致。

长冲河小流域属于亚热带季风气候,降雨直接冲击土壤表面随后在地表形成径流产生冲刷作用,引发

土壤侵蚀。在坡度较缓区域内,土壤侵蚀强度、水文泥沙连通性等级随着坡度增加而逐渐升高,主要是由于坡度增加,径流速度加快,径流量增大,从而增强径流对土壤的冲刷和搬运能力,与黄振华等<sup>[39]</sup>在安徽省青弋江流域的研究结果一致。坡向也是影响水文泥沙连通性、土壤侵蚀的重要因子。本研究得出,在各土壤侵蚀强度和水文泥沙连通性等级中,各等级越高,阳坡面积所占比例越高,主要是由于阳坡容易受到强烈的太阳辐射,使土壤可蚀性下降,造成水土流失风险增大,而在阴坡则相反,往往具有更低的泥沙连通性。本研究还发现,该小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性存在耦合关系,呈显著的正相关,主要体现在土地利用、坡度、坡向和海拔等影响因素。一方面,土壤侵蚀导致大量泥沙进入水体,改变水体的泥沙负荷和输移特性,从而影响水文泥沙连通性;另一方面,水文泥沙连通性的强弱也影响土壤侵蚀的强度和分布,如在径流较强的地区,泥沙容易被冲刷和搬运,从而加剧土壤侵蚀<sup>[40]</sup>。

## 5 结论

(1)长冲河小流域平均土壤侵蚀模数为 380 t/(hm<sup>2</sup>·a),为微度侵蚀,土壤侵蚀主要发生在地形起伏大、坡度大、降水量高、植被覆盖条件较差的区域。长冲河小流域泥沙连通性平均值为 2.69,标准偏差为 1.14,耕地往往具有高连通性,林地、草地具有低连通性。长冲河小流域水文连通性整体上呈北部高、南部低的特征。

(2)地形因子和土地利用类型对土壤侵蚀和水文泥沙连通性均产生显著影响,相对较低的土壤侵蚀强度与水文泥沙连通性等级,较高的侵蚀强度与连通性等级耕地面积占比较高,而林地和草地面积占比较小。5°~10°,10°~15°坡度和 90.30~131.96,131.96~175.34 m 高程面积在各土壤侵蚀强度和水文泥沙连通性等级中占比均较多;在 0~5°坡度中,土壤侵蚀强度为轻度的面积占比高于微度面积占比,泥沙连通性等级(Ⅱ~Ⅳ)随着坡度面积占比增加而升高;在各水文连通性等级中,等级越高,0~5°和 5°~10°坡度的面积占比越高;各等级越高,阳坡面积所占比例越高。

(3)空间自相关分析得出,土壤侵蚀的影响因素包括土地利用、坡度、坡向和高程与水文泥沙连通性均呈显著的空间正相关性,各影响因素与水文连通性的空间自相关性强弱依次为土地利用>高程>坡向>坡度;与泥沙连通性的空间自相关性强弱依次为高程>土地利用>坡向>坡度,土地利用与高程是影

响水文泥沙连通性的主导因素,土壤侵蚀与水文泥沙连通性存在密切的联系。通过提高植被覆盖度、优势度、采取合理的土地利用方式和生态修复措施等降低小流域水文泥沙连通性可以有效减少土壤侵蚀和水土流失的影响。

### 参考文献:

- [1] ZHAO G, MU X, WEN Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.  
LI Z B, ZHU B B, LI P. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 802-809.
- [3] AMOROS C, BORNETTE G. Connectivity and bio complexity in waterbodies of riverine floodplains[J]. Freshwater Biology, 2002, 47(4): 761-776.
- [4] SØRENSEN R, ZINKO U, SEIBERT J. On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(1): 101-112.
- [5] 严晰芹,焦菊英,唐柄哲,等.泥沙连通性研究方法进展[J].泥沙研究,2021,46(2):59-65.  
YAN X Q, JIAO J Y, TANG B Z, et al. Review on study approaches of sediment connectivity[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2): 59-65.
- [6] 张光辉.从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J].水科学进展,2021,32(2):295-308.  
ZHANG G H. Understanding sediment connectivity from soil erosion perspective[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 295-308.
- [7] 陈良,胡砚霞,李振炜,等.基于土壤侵蚀角度的坡面水文连通性研究进展[J].水文,2023,43(6):14-19.  
CHEN L, HU Y X, LI Z W, et al. Research progress of slope hydrological connectivity based on soil erosion[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(6): 14-19.
- [8] 白雷超.黄土丘陵沟壑区淤地坝泥沙连通方式及其对拦沙效益的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.  
BAI L C. Sediment connectivity mode of silt-dam in loess hilly and gully region and its influence on sediment retention efficiency[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [9] 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 D L, ZHANG B, WU L P, et al. Temporal and



- spatial changes of soil erosion and its driving factors in Longchuan River Basin in recent 20 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 29-37.
- [10] 王丽园, 赵体侠, 朱文博, 等. 基于 RUSLE 模型的秦岭—大巴山地土壤侵蚀时空特征分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 113-121.  
WANG L Y, ZHAO T X, ZHU W B, et al. The spatiotemporal characteristics of soil erosion in the Qinling-Daba Mountains based on RUSLE model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 113-121.
- [11] JIANG C, LI D Q, GAO Y N, et al. Spatiotemporal variability of streamflow and attribution in the Three-Rivers Headwater Region, Northwest China[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, 7(3): 637-649.
- [12] 田昌园, 张红丽, 汪军红, 等. 近 30 年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 37-44.  
TIAN C Y, ZHANG H L, WANG J H, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 37-44.
- [13] 王镛华, 信忠保, 梁潇瑜. 植被和梯田对黄土高原小流域泥沙连通性的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3756-3765.  
WANG R H, XIN Z B, LIANG X Y. Effects of terrace and vegetation on sediment connectivity in a small watershed on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3756-3765.
- [14] 冯斌, 张学伍, 徐敏, 等. 土地利用变化对泥沙连通性及泥沙输移的影响: 以重庆市涪陵页岩气开采区为例[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 171-179.  
FENG B, ZHANG X W, XU M, et al. Effects of landscape pattern change on sediment connectivity and sediment transport: Taking Fuling shale gas production area in Fuling area of Chongqing City as a case area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 171-179.
- [15] 马勇勇. 王茂沟流域生态建设对水沙连通性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.  
MA Y Y. Impact of ecological construction on water-sediment connectivity in Wangmaogou Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [16] 刘宇. 土壤侵蚀研究中的景观连通度: 概念、作用及定量[J]. *地理研究*, 2016, 35(1): 195-202.  
LIU Y. Landscape connectivity in soil erosion research: Concepts, implication and quantification[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 195-202.
- [17] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [18] 江雯, 胡玉乾, 汪军红, 等. 安徽大别山区天然降雨对典型植被水土流失影响研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(2): 265-273.  
JIANG W, HU Y Q, WANG J H, et al. Natural rainfall affects soil erosion of typical vegetation in Dabie Mountains, Anhui Province[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(2): 265-273.
- [19] 张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(6): 116-123.  
ZHANG C X, YANG Q K, LI R. Advancement in topographic wetness index and its application[J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(6): 116-123.
- [20] WESTERN A W, GRAYSON R B, BLÖSCHL G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 797-810.
- [21] BARLING R D, MOORE I D, GRAYSON R B. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 1029-1044.
- [22] 赵传普, 王晖, 杜晨曦, 等. 淮河流域桐柏山大别山国家级水土流失重点预防区水土流失状况分析[J]. *中国水土保持*, 2023(2): 1-3.  
ZHAO C P, WANG H, DU C X, et al. Soil and water loss in the national key prevention area of soil erosion in Tongbai Mountain and Dabie Mountain in Huaihe River Basin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(2): 1-3.
- [23] 邵万, 贾尚宏, 金乃玲, 等. 安徽省特色保护类村庄规划探索与实践: 以合肥市庐江县长冲村为例[J]. *城市建筑*, 2021, 18(6): 15-19.  
SHAO W, JIA S H, JIN N L, et al. Exploration and practice of planning of characteristic protection villages in Anhui Province: A case of Changchong Village, Lujiang county, Hefei city[J]. *Urbanism and Architecture*, 2021, 18(6): 15-19.
- [24] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.  
ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.
- [25] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 6-11.  
XIE Y, LIU B Y, ZHANG W B. Study on standard of

- erosive rainfall[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(4): 6-11.
- [26] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion-sediment yield models[J]. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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 Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [30] 聂泽栋, 蔡士雪. 基于 RUSLE 模型的安徽郎溪县土壤侵蚀时空变化及其影响因素分析[J]. *安徽地质*, 2023, 33(2): 162-170.
- NIE Z D, CAI S X. Temporal and spatial changes of soil erosion and its influencing factors in Langxi County, Anhui Province based on RUSLE model[J]. *Geology of Anhui*, 2023, 33(2): 162-170.
- [31] BORSELLI L, CASSI P, TORRI D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. *Catena*, 2008, 75(3): 268-277.
- [32] 乔冰洁, 杨勤科, 王春梅, 等. 梯田对侵蚀地形指标的影响: 以黄土丘陵第 2 副区为例[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 184-193.
- QIAO B J, YANG Q K, WANG C M, et al. Influence of terrace on erosional topographic index: Taking the second sub-region of loess hill as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 184-193.
- [33] 李序颖, 顾岚. 空间自回归模型及其估计[J]. *统计研究*, 2004, 21(6): 48-51.
- LI X Y, GU L. Space autoregressive model and the relevant estimation[J]. *Statistical Research*, 2004, 21(6): 48-51.
- [34] 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. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [35] 邓威, 汪晶晶, 白云, 等. 苦驴河上游小流域土壤侵蚀及其养分流失特征[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 85-90.
- DENG W, WANG J J, BAI Y, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in small watershed on upper reaches of Kulü River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1): 85-90.
- [36] 赵明松, 李德成, 程先富, 等. 皖西大别山区土壤侵蚀空间分布特征及与地形的关系[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(3): 265-270.
- ZHAO M S, LI D C, CHENG X F, et al. Spatial characteristics of soil erosion and its relationship to topography in Dabie Mountains of West Anhui[J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2017, 40(3): 265-270.
- [37] 王佳楠, 贾燕锋, 范昊明. 辽西低山棕壤丘陵区小流域泥沙连通性与土壤侵蚀的空间分布特征[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 726-732.
- WANG J N, JIA Y F, FAN H M. Spatial distribution characteristics of sediment connectivity and soil erosion in small watershed in brown soil hilly region of low mountains in western Liaoning Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3): 726-732.
- [38] 袁亚男. 昕水河流域土地利用与植被变化对水文连通性影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- YUAN Y N. Impact of land use and vegetation change on hydrological connectivity in Xinshui River Basin[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [39] 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*, 2019, 37(5): 189-197.
- [40] 朱金凤. 昕水河流域泥沙连通性的时空变化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- ZHU J F. Spatiotemporal variation of sediment connectivity in Xinshui River Basin[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.