

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.018; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.018.

姜雅琼, 王添, 李占斌, 等. 西柳沟流域土壤风蚀时空变化及其对景观格局的响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 14-23.

Jiang Yaqiong, Wang Tian, Li Zhanbin, et al. Spatiotemporal changes of soil wind erosion and its response to landscape pattern in Xiliugou watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 14-23.

西柳沟流域土壤风蚀时空变化及其对景观格局的响应

姜雅琼¹, 王添¹, 李占斌¹, 张晓明², 郭兴月¹, 李鹏¹, 张铁钢³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

3. 中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 探究西柳沟流域土壤风蚀与景观格局的响应关系, 为该地区生态修复提供科学依据。[方法] 基于气象、土壤、植被覆盖、土地利用等数据, 采用修正土壤风蚀模型(RWEQ), 计算分析了 2005—2020 年流域内土壤风蚀量及其影响因子, 阐明了流域内土地利用变化特征。[结果] (1) 2005—2020 年, 西柳沟流域土壤风蚀量呈先增长后下降趋势, 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的平均风蚀量分别为 36.9、39.4、45.3、39.4 t/(hm² · a), 且在空间上总体呈现“北强、南弱”趋势。(2) 气象因子值在 2015 年前后变化显著; 空间上, 其值在流域北部低南部高, 中部变化较大。(3) 流域主要以裸地和低植被覆盖度为主, 占总面积 79% 以上; 土地利用主要以草地为主, 占总面积 82% 以上, 草地面积总体呈增加趋势, 整体较为破碎, 斑块形状向复杂化发展。自 2010 年起, 草地中度、强烈风蚀占比均超过 85%。[结论] 西柳沟流域风蚀量在长期生态保护修复下略有降低, 但在气候变化和人类活动影响下, 未来科学实施生态修复依旧是西柳沟流域的重要研究方向。

关键词: RWEQ 模型; 土壤风蚀; 土地利用; 景观格局

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0014-10

Spatiotemporal changes of soil wind erosion and its response to landscape pattern in Xiliugou watershed

Jiang Yaqiong¹, Wang Tian¹, Li Zhanbin¹, Zhang Xiaoming²,

Guo Xingyue¹, Li Peng¹, Zhang Tiegang³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Inner Mongolia Yin Mountain Northern Foothills Grassland Ecological Hydrology National Field Scientific Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the response relationship between soil wind erosion and landscape pattern in Xiliugou watershed, and to provide scientific basis for ecological restoration in this area. [Methods] Based on meteorological, soil, vegetation cover, land use and remote sensing data, the corrected soil wind erosion model (RWEQ) was used to calculate and analyze the soil wind erosion and its influencing factors in the watershed from 2005 to 2020, and the land use change characteristics in the watershed were clarified. [Results] (1) From 2005 to 2020, the soil wind erosion in Xiliugou showed an increasing trend and then a decreasing trend. The average wind erosion rates in 2005, 2010, 2015 and 2020 were 36.9, 39.4, 45.3 and 39.4 t/(hm² · a), respectively. And the overall spatial trend of erosion rate

收稿日期: 2023-12-18

修回日期: 2024-06-20

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 国家重点研发计划课题(2022YFF1300801); 国家自然科学基金(U2243201, 52009104, 52179043, 52109100)

第一作者: 姜雅琼(1998—), 女, 内蒙古阿拉善人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 565117511@qq.com

通信作者: 王添(1989—), 男, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事流域泥沙与环境水利研究。E-mail: t.wang@xaut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

demonstrated the strong level in the north and the weak level in the south. (2) The values of meteorological factors changed significantly before and after 2015. Spatially, its value was lower in the north and higher in the south, but it varied greatly in the middle part. (3) The basin was dominated by bare land and low vegetation coverage, accounting for more than 79% of the total area. The land use was mainly grassland, accounting for more than 82% of the total area. The overall area of grassland was increasing, the overall was relatively broken, and the shape of patches was becoming complicated. Since 2010, the proportion of moderate and strong wind erosion in grassland had exceeded 85%. [Conclusion] The wind erosion in Xiliugou watershed has slightly decreased under long-term ecological protection and restoration, but in the face of climate change and human activities, scientifically implementing ecological restoration will still be an important research direction for the Xiliugou watershed in the future.

Keywords: RWEQ; soil wind erosion; land use; landscape pattern

土壤风蚀是导致干旱与半干旱地区存在的严重环境问题的原因之一^[1-2],而旱地是对气候变化和人类活动最敏感的地区之一,由风蚀引起的土地退化严重影响着全球范围内的旱地生态系统^[3]。土地利用景观格局是不同土地利用类型的空间组合情况,其合理配置对于推动区域经济和保持社会可持续发展至关重要,同时也深刻影响着区域生态系统服务功能^[4]。随着我国经济改革的逐步发展,城镇化步伐迅速加快,城镇化率从1978年的18%显著提高到2019年的61%左右,在强烈的人类活动的影响下,景观格局发生了变化,景观破碎化等问题也因此产生,严重威胁到区域生物多样性和生境质量。

风蚀是风对土壤颗粒的携带,当风传递到土壤表面的能量足以抵消维持土壤颗粒在表面上的力,即它们的重量和颗粒间的内聚力时,就会发生风蚀^[5]。风蚀是一种自然现象,取决于气象、土壤表面特征、植被覆盖度等自然条件^[6]。土壤风蚀对陆地生态系统的健康和人类社会的发展有许多不利影响^[7],比如显著降低土壤肥力和植物生产力^[8],导致空气质量下降^[9]。此外,地表风蚀形成的细粒物质是大气之中气溶胶的主要来源,同时也是沙尘暴产生的主要原因^[10]。目前,有不少学者利用风蚀模型,评估区域风蚀量并分析其影响因素,为风蚀预测和荒漠化防治提供了依据。在我国北方地区,RWEQ修正风蚀模型被广泛应用于计算风蚀模数,王炳瑞^[11]、马苏等^[1]、邢丽珠等^[12]、郑洋等^[13]利用RWEQ模型对内蒙古不同地区的风蚀模数和防风固沙量进行计算,探究风蚀的驱动因素并解释土地利用变化对土壤风蚀的影响。李涵聪等^[14]根据张家口市地形地貌特征,修正了地表粗糙度的计算方法;利用幂指数函数对风速进行修正,提高迎风坡和坡顶的风速,使风速数据更符合实际情况。

景观指数是对景观格局的不同信息的概括和凝

练,通过计算区域的景观指数可以反映出不同景观在空间上的配置,也能研究景观的空间异质性^[15]。土地利用变化往往影响着景观格局的各类景观指数,也会造成景观破碎化^[16]。随着建设用地的扩大、林地和草地的减少,生境质量降低,加速了生态环境的衰减。现有研究表明,景观格局与土壤侵蚀的变化存在密切的联系。罗佳茹等^[17]、钱佳洋^[18]、马瞳宇等^[19]、邹琴英等^[20]对不同地区评估了区域土壤侵蚀模数,利用Fragstats软件进行景观格局分析,探究侵蚀与景观指数的关系。但是目前景观格局与土壤风蚀的相关研究较少,学者们主要分析景观格局变化对土地利用的影响、景观格局对生态系统服务影响、景观格局与土壤水蚀的关系,然而土壤侵蚀分为土壤水蚀和土壤风蚀,因此本文将土壤风蚀与景观生态结合研究,分析不同土壤风蚀对景观格局变化的响应,揭示土壤风蚀与景观格局之间的动态关系。

西柳沟流域地处黄土丘陵沟壑区、库布齐沙漠风沙区、农田交错区^[21],是黄河“几字弯”十大孔兑之一,属于生态脆弱区,生态环境易受到土壤风蚀的威胁。同时,不合理的土地利用方式和土地利用结构,特别是煤矿开发等生产建设项目的建设,在一定程度上加剧了土壤风蚀。2010年以来,随着库布齐沙漠和十大孔兑流域的综合治理,西柳沟流域的生态环境逐步转好,水土流失面积相应降低,因此采用模型模拟的方法探究近年来土壤风蚀和土地利用关系及对景观格局的响应^[22-24],有助于减少土壤风蚀的不良影响,进一步提升土地防风固沙功能,维持地区生态安全和可持续发展。本文利用RWEQ模型模拟得出西柳沟流域2005—2020年土壤风蚀模数,并将不同的土壤风蚀视为景观过程变化的指标,探究土壤风蚀强度对景观格局的响应关系,以期优化土地利用布局和保护地区生态环境提供参考价值。

1 研究区概况

西柳沟流域位于内蒙古鄂尔多斯高原向河套平原过渡带(东经 $109^{\circ}24' - 110^{\circ}00'$, 北纬 $39^{\circ}47' - 40^{\circ}30'$), 高程范围为 980~1 544 m, 发源于内蒙古鄂尔多斯市东胜区东部山区, 东流折向东北流后流入黄河, 是黄河中游的一级支流。西柳沟流域东西长 24.5 km, 南北长 106.5 km, 流域总面积 1 191.72 km²。流域分为黄土丘陵沟壑区、库布齐沙漠风沙区、农田交错区。流域属半干旱大陆性气候, 多年平均降水量 271.2 mm, 年均风速可达 3.1 m/s^[25]。流域土壤类型主要以筒育栗钙土、筒育砂性土和石灰性疏松岩性土为主^[26]。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究数据主要包括气象、土壤、植被覆盖、土地利用以及遥感影像数据等, 其中土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心, 结合流域边界对西柳沟流域土地利用变化信息提取, 根据土地利用分类系统划分为 6 种土地利用类型。气象数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>); 土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心—基金委/国家地球系统科学数据平台的基于世界土壤数据库(HWSD)中的中国土壤数据集; 植被覆盖数据来源于中国科学院的资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>); DEM 数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。

2.2 土壤风蚀量计算

本研究运用修正风力侵蚀模型(RWEQ)对西柳沟流域土壤风力侵蚀情况进行评估, 该模型具有因子比较全面、组成相对简单、数据采集容易、与地理信息系统亲和力强等优点, 它可以将现场数据与计算机模型相结合来描述物理风蚀过程, 并在实践中得到广泛应用。其计算公式如下:

$$S_L = \frac{2Z}{S^2} Q_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{Z}{S}\right)^2} \quad (1)$$

$$Q_{\max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG) \quad (2)$$

$$S = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)^{-0.3711} \quad (3)$$

式中: S_L 为模拟风蚀量[t/(hm²·a)]; Z 为最大风蚀出现距离(m); Q_{\max} 为最大转移量(kg/m); S 为关键地块长度(m); WF 为气象因子(kg/m); EF 为土壤可蚀性因子, 无量纲; SCF 为土壤结皮因子, 无量纲; K' 为地表粗糙度因子, 无量纲; COG 为植被覆盖因子, 无量纲。

RWEQ 模型的主要因子计算方法如下:

2.2.1 气象因子 气象因子(WF)考虑了风速、土壤湿度、积雪覆盖等气候影响因素, 其计算公式为:

$$WF = \frac{\sum_{i=1}^N U_r (U_r - U_i)^2 \times N_d \times \rho}{N \times g} \times SW \times SD \quad (4)$$

式中: U_r 为 2 m 处的风速(m/s); U_i 为 2 m 处的临界风速, 马苏等^[1]关于鄂尔多斯市防风固沙功能时空变化研究表明, 起沙风速与含水量有关, 含水量为 0.8% 时起沙风速在 4.5~5.0 m/s, 所以研究区临界风速取值 5 m/s; N_d 为观察风速大于临界风速的天数(d); ρ 为空气密度(kg/m³); N 为观测的总天数(d); g 为重力加速度(m/s²); SW 为土壤湿度因子, 无量纲; SD 为积雪覆盖因子, 根据王炳瑞^[11]研究结果, 本文取值为 1。

2.2.2 土壤可蚀性和结皮因子 土壤可蚀性因子(EF)和土壤结皮因子(SCF)考虑了土壤粗砂、粉砂、黏粒等因素, 其计算公式为:

$$EF = \frac{29.09 + 0.311Sa + 0.17Si + 0.33Sa/Cl - 2.59OM - 0.95Ca}{100} \quad (5)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(Cl)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (6)$$

式中: Sa 为土壤粗砂含量(%); Si 为土壤粉砂含量(%); Cl 为土壤黏粒含量(%); OM 为土壤有机质含量(%); Ca 为土壤碳酸钙含量(%)。

2.2.3 地表粗糙度因子 利用 DEM 数据在 ArcGIS 中提取坡度后, 计算得到地表粗糙度因子(K'), 其计算公式为:

$$K' = \cos\left(\text{Slope} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (7)$$

式中: Slope 为地形坡度。

2.2.4 植被覆盖因子 植被覆盖因子(COG)通过下式计算:

$$COG = e^{-0.0438(FVC)} \quad (8)$$

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}} \quad (9)$$

式中: FVC 为植被覆盖度, 通过 MODIS NDVI 数据采用像元二分模型计算得到; $NDVI_{\text{soil}}$ 为无植被覆盖像元的 NDVI 值; $NDVI_{\text{veg}}$ 为完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值。本研究利用代替法截取像元数量累计百分比为 0.5% 和 95% 的 NDVI 值分别作为 $NDVI_{\text{soil}}$ 和 $NDVI_{\text{veg}}$ 的值。

2.3 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵可以定量显示不同景观类型之间的转换情况, 定量描述一定时间序列单元内不同

土地利用类型之间的系统状态和转移状态,综合反映土地利用类型变化的转换量、结构特征和转移方向^[27]。该矩阵数学表达式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: S_{ij} 为研究初期第 i 种土地利用类型转化为研究末期第 j 种土地利用类型的面积; i 和 j 分别为研究初期和研究末期的土地利用类型; n 为土地利用类型数目。

2.4 景观格局指数计算

当研究区内较小和孤立的斑块在景观中占主导地位时,这种现象被称为景观破碎化。景观破碎化通常反映了景观结构的日益破碎化趋势和潜在生态过程的变化。景观破碎化分析是景观生态学研究常用的评估方法,用于表示景观格局并反映景观破碎化程度。而景观指数是反映景观格局结构的定量指标^[28]。景观格局指数的独特生态意义可以划分为不同的维度,其指标可以分为斑块水平指数、斑块类型水平指数和景观水平指数 3 类^[29]。利用相应的景观指数来反映景观破碎化程度,可以揭示景观格局对生境的响应特征^[30],因此,本研究利用 Fragstats 软件生成的景观指数来表示景观模式,考虑到单个斑块的研究分析无法体现景观格局的规律特征,本研究以斑块类型与景观水平指数进行分析。表 1 列出了相应的指标和解释。

3 结果与分析

3.1 土壤风蚀量时空变化特征

2005—2020 年,西柳沟流域土壤风蚀量呈增长

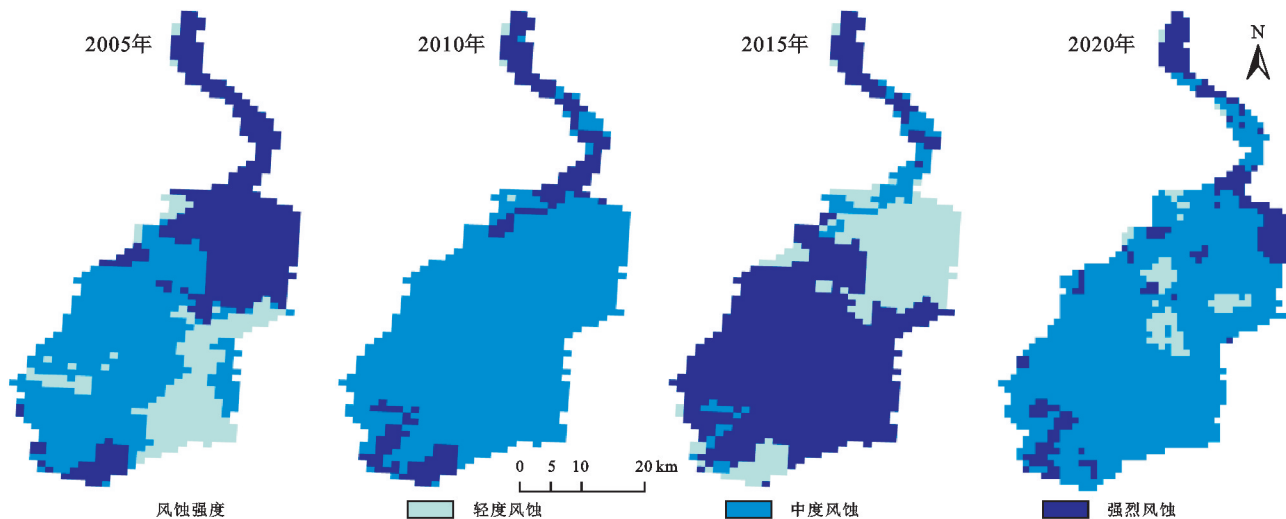


图 1 2005—2020 年土壤风蚀强度

Fig. 1 Soil wind erosion intensity from 2005 to 2020

后下降趋势,2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的平均风蚀量分别为 36.9,39.4,45.3,39.4 t/(hm² · a),其中 2015 年前后变化幅度最大。

基于 RWEQ 模拟所得的土壤风蚀量,可以得出 1 km 栅格大小的风蚀空间分布(图 1),2005—2020 年,西柳沟流域土壤风蚀量在空间上总体呈现“北强,南弱”趋势。2015 年之前,西柳沟流域土壤风蚀高值区主要分布在北部地区;2015 年,高值区由北向南蔓延至中部及南部且范围扩大;2020 年,高值区面积减小,主要分布在北部地区。

表 1 选用指标名称及生态意义

Table 1 Select the index name and ecological significance

| 指标缩写 | 指标名称 | 生态意义 |
|---------|--------|----------------------|
| NP | 斑块数量 | 描述景观的破碎化程度 |
| PD | 斑块密度 | 描述景观的空间异质性 |
| LPI | 最大斑块 | 指数描述景观的优势度 |
| LSI | 景观形状指数 | 描述斑块边界复杂程度,可反映人为影响程度 |
| AI | 集聚度指数 | 描述景观空间集聚性程度 |
| CONTAG | 蔓延度指数 | 描述不同斑块类型的团聚程度 |
| AREA_MN | 平均斑块面积 | 描述景观中斑块的平均面积 |

为了更好地表达风蚀量的空间差异,参照《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》,依据模型模拟的土壤风蚀模数,将土壤风蚀量在 0~25 t/(hm² · a)为轻度风蚀,在 25~50 t/(hm² · a)为中度风蚀,在 50~80 t/(hm² · a)为强烈风蚀^[5,8]。2005 年西柳沟流域以中度和强烈风蚀为主,中度风蚀主要分布在南部地区,强烈风蚀主要分布在北部地区;2010 年主要为中度风蚀,强烈风蚀占据的面积有所减少;2015 年西柳沟流域以强烈风蚀为主,主要分布在南部区域,中部地区出现轻度风蚀;2020 年西柳沟流域以中度风蚀为主,北部地区存在一定面积的强烈风蚀。

3.2 土壤风蚀量主要影响因子变化分析

杜睿哲等^[24]在砒砂岩区风蚀时空变化的研究表明,因研究区土壤和地形没有发生根本性变化,则风蚀动态变化主要取决于气象、植被因子和其他因素的变化,由弹性系数法可知影响风蚀的主要因子为气象因子和植被因子。根据 Pearson 相关分析可知,气象因子与土壤风蚀量相关关系显著($p < 0.05$),相关系

数达到了 0.975;而植被因子相关系数为-0.333。

3.2.1 气象因子 2005—2020 年西柳沟流域气象因子值(图 2)分别为 20.59~28.44,26.45~35.16,26.37~136.68,4.58~52.69,平均值为 26.11,32.24,87.32,33.87,总体来说,气象因子值在 2015 年前后变化显著;空间上,其值在流域北部低南部高,中部变化较大。

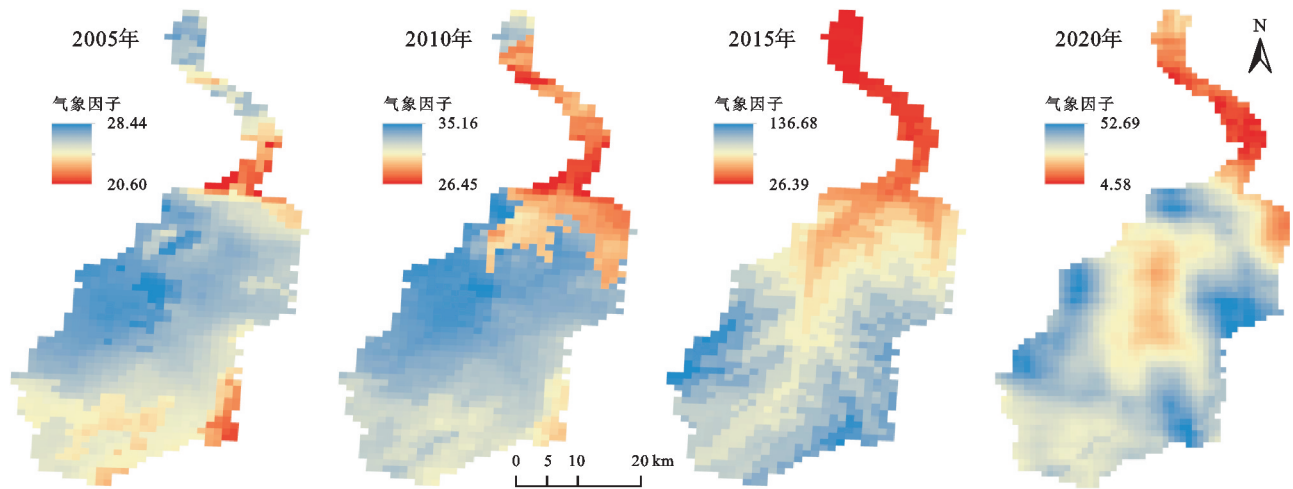


图 2 2005—2020 年气象因子分布

Fig. 2 Distribution of meteorological factors from 2005 to 2020

3.2.2 植被覆盖因子 2005—2020 年西柳沟流域植被覆盖因子值均在 0.95~1,将研究区植被覆盖度划分 4 个等级(图 3): $FVC \leq 10\%$ (裸地)、 $10\% < FVC \leq 30\%$ (低植被覆盖)、 $30\% < FVC \leq 60\%$ (中植被覆盖)、 $FVC > 60\%$ (高植被覆盖)。2005—2020 年西柳沟流域主要以裸地和低植被覆盖度为主,中植被覆盖度以下的植被面积占总面积 79%以上,且植被覆盖度越高其面积比例越小。总体对比来看,2015 年之前流

域中植被覆盖度的面积增加,裸地植被覆盖度的面积有所减少,但在 2020 年中植被覆盖度明显减少,裸地面积增大。在 2005—2015 年,流域植被覆盖度在空间上主要以裸地和低植被覆盖度为主,裸地主要分布在北部靠近中部地区,低植被覆盖区在整个流域均有分布,中、高植被覆盖均分布在北部和南部边远地区;2015—2020 年流域裸地、低植被覆盖区面积突增,占总面积 88%,仅有中植被覆盖分布于北部区域。

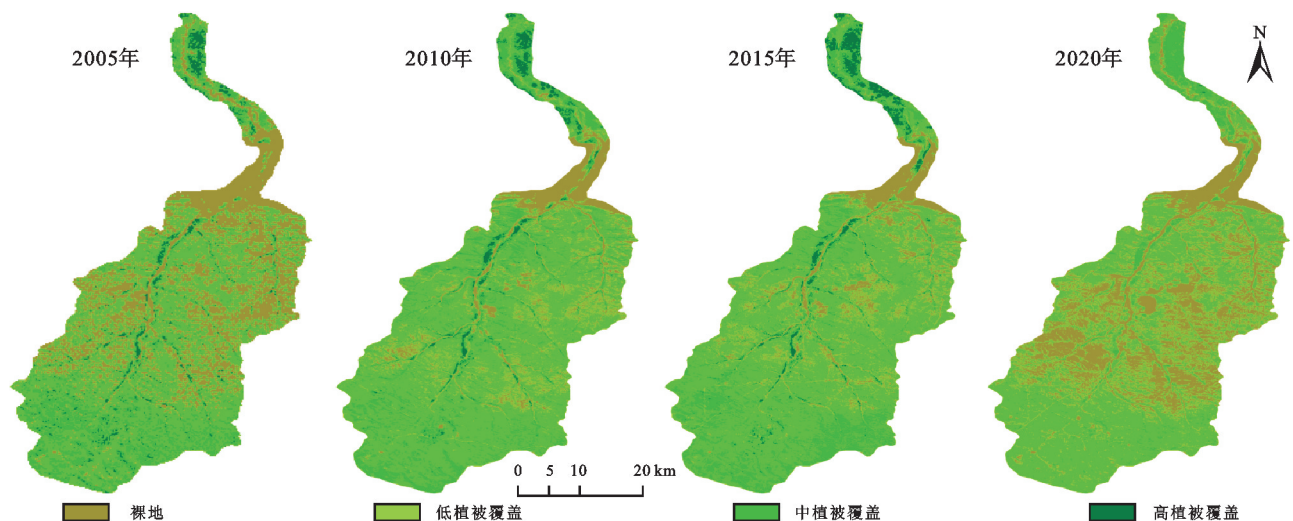


图 3 2005—2020 年植被覆盖度分布

Fig. 3 Vegetation cover distribution map from 2005 to 2020

3.3 土地利用变化特征

3.3.1 土地利用时空变化 西柳沟流域土地利用(表 2)

主要以草地为主,占总面积 82%以上,在流域内大面积分布;其次为耕地和未利用地,两者共占总面积 14%,主

要分布在流域北部;水域面积最少,占比不到总面积 1%。2005—2020 年流域内共有 46.47 km² 的耕地向其他土地类型转变,其他土地类型转化的耕地面积约为 37.16 km²;有 52.33 km² 的草地向其他土地类型转变,其他土地类型转化的草地面积约为 84.51 km²,耕地面积的增加和减少主要是由于草地的面积变化。水域转化

为其他土地类型的面积约为 0.32 km²,其他土地类型的水域转化面积为 0.02 km²,主要转化为草地。建设用地面积增加约为 5.02 km²,主要由耕地与草地输入。未利用地转化为其他土地类型的面积约为 39.79 km²,主要转化为草地。从 2015 年起,土地利用类型中出现了林地,林地面积增加 0.09 km²,主要由草地输入。

表 2 土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transfer matrix

| 年份 | 土地利用 | 2020 年 | | | | | | |
|--------|------|--------|------|---------|------|------|-------|---------|
| | 类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建筑用地 | 未利用地 | 总计 |
| 2005 年 | 耕地 | 77.95 | 0.02 | 45.94 | 0.01 | 0.19 | 0.30 | 124.42 |
| | 草地 | 36.50 | 0.07 | 927.03 | 0.01 | 3.98 | 11.77 | 979.36 |
| | 水域 | 0.07 | — | 0.13 | — | 0.07 | 0.05 | 0.32 |
| | 建筑用地 | 0.01 | — | 0.01 | — | 4.25 | — | 4.27 |
| | 未利用地 | 0.58 | 0.00 | 38.44 | — | 0.78 | 48.43 | 88.22 |
| | 总计 | 115.11 | 0.09 | 1011.54 | 0.02 | 9.27 | 60.56 | 1196.60 |

注:“—”代表未发现。

3.3.2 土地利用景观类型指数 类型水平上的景观格局指数见表 3。在 2005—2020 年,各地类的集聚度指数较高,说明各地类的分布具有较强的空间集聚性,区域整体景观分布均匀。耕地、未利用地斑块数量、斑块密度、形状指数减少,平均斑块面积、集聚度指数增加,表明其斑块破碎化程度降低,空间集聚性增加。林地斑块数量、斑块密度、形状指数明显增多,平均斑块面积、空间集聚度指数略微降低,表明林地破碎化程度增高,斑块边界形状不稳定,空间集聚性降低。这也说明近年来林地以不规则的形状在增长,林地需要得到进一步保护。草地面积总体呈增加趋势,草地斑块数量、斑块密度变化较小,形状指数、平均斑块面积减小,表明草地整体较为破碎,斑块形状向复杂化发展,空间集聚性不变。水域指数均减少,表明其斑块破碎化程度增强,空间集聚性减弱,斑块形状向复杂化发展。这也说明近年来对于水域的保护措施并未起到明显效果。建设用地各指数均增加,表明其斑块破碎化程度较稳定,斑块形状朝向规则化发展。

3.3.3 不同土地利用类型下的土壤风蚀量变化 根据土地利用统计结果,由于林地、水域和建设用地的面积占比小,因此本文仅分析在耕地、草地、未利用地中各等级土壤风蚀量占该地类总风蚀量的面积比。

由表 4 可知,在 2005—2020 年,各地类的土壤风蚀等级中度、强烈风蚀面积最大,占主导地位。耕地土壤风蚀中,中度、强烈风蚀面积持续增加,2020 年比 2005 年分别增加 7.81%,2.45%;轻度风蚀先增加后减少,由 2005 年的 21.71%到 2020 年的 44.43%,并在 2010 年占比达到 100%。草地是整个流域主要的土地利用类型,轻度、中度风蚀面积在 2020 年比 2005 年分别增加

12.15%,11.74%,强烈风蚀先增加后减小,由 2005 年的 57.25%到 2020 年的 89.19%;从 2010 年起,中度、强烈风蚀占比均超过 85%,说明草地在防风固沙治理中扮演了主要角色。未利用地多数分布在强烈风蚀区,在 2010 年占比达到最大 16.95%,在 2020 年降为 12.49%。这说明不合理的土地利用会造成风蚀量的增大,应合理优化草地、耕地布局,加强土地利用的管理与监控。

3.4 土壤风蚀量对景观格局变化的响应

本文将不同的土壤风蚀强度视为景观的一种元素^[15],探寻土壤风蚀对景观格局变化的响应,表明景观格局指数能够较好地反映土壤风蚀变化规律,是提升西柳沟防风固沙治理的重要途径。

土壤风蚀量随着斑块数量、斑块密度以及形状指数的增加而增多。由 2005—2020 年西柳沟流域风蚀景观格局指数(表 5)可知,NP 与 PD 分别是斑块数和斑块密度,反映的是景观的破碎化程度,其值越大,景观破碎度越大。斑块数、斑块密度在 20 年间整体呈上升趋势,反映出 2005—2020 年景观破碎化程度增强,人为因素对西柳沟流域景观格局的影响程度加深。LSI 形状指数的整体上升也反映了整体景观的形状的复杂程度和不规则性不断增强,说明研究区的景观空间形态向着复杂化趋势转变。土壤风蚀量与蔓延度指数、集聚度指数呈负相关。LPI 最大斑块指数、AI 集聚度指数和 CONTAG 蔓延度指数皆表现为增加后降低趋势,说明在空间构型上,优势景观优势度降低,景观聚集度上升,景观分布不均匀,景观形成分散格局,造成空间集聚度减弱。当流域优势种斑块类型内部链接性较好,且与周围相邻斑块空间连接程度较好时,风蚀量会明显减少。

表 3 2005—2020 年西柳沟流域景观类型水平指数

Table 3 Landscape type level index of Xiliugou Basin from 2005 to 2020

| 年份 | 地类 | NP | PD | LSI | AREA_MN | AI |
|------|------|------|--------|---------|----------|---------|
| 2005 | 耕地 | 3726 | 3.1138 | 70.5376 | 3.3392 | 81.2375 |
| | 草地 | 739 | 0.6176 | 38.9943 | 132.5251 | 96.3531 |
| | 水域 | 42 | 0.0351 | 7.3947 | 0.7736 | 64.4737 |
| | 建设用地 | 983 | 0.8215 | 34.6957 | 0.4345 | 50.2886 |
| | 未利用地 | 2153 | 1.7993 | 38.8708 | 4.0977 | 87.8497 |
| 2010 | 耕地 | 3514 | 2.9367 | 66.1220 | 3.1775 | 81.4440 |
| | 草地 | 715 | 0.5975 | 33.5005 | 140.8289 | 96.9237 |
| | 水域 | 34 | 0.0284 | 6.7857 | 0.4897 | 52.6316 |
| | 建设用地 | 1018 | 0.8507 | 34.0686 | 0.6746 | 61.6425 |
| | 未利用地 | 1578 | 1.3187 | 33.1299 | 4.4983 | 88.5118 |
| 2015 | 耕地 | 3967 | 3.3152 | 70.0239 | 3.2065 | 81.5884 |
| | 林地 | 8 | 0.0067 | 3.7222 | 0.8438 | 62.8788 |
| | 草地 | 854 | 0.7137 | 35.3030 | 117.4409 | 96.7463 |
| | 水域 | 23 | 0.0192 | 5.3333 | 0.4030 | 50.8108 |
| | 建设用地 | 1116 | 0.9326 | 35.7513 | 0.7136 | 62.4879 |
| 2020 | 未利用地 | 1409 | 1.1775 | 32.8235 | 4.1396 | 87.4289 |
| | 耕地 | 2690 | 2.2480 | 52.3603 | 4.2792 | 85.5836 |
| | 林地 | 13 | 0.0109 | 4.8500 | 0.6923 | 57.2222 |
| | 草地 | 781 | 0.6527 | 27.2904 | 129.5191 | 97.5170 |
| | 水域 | 11 | 0.0092 | 3.3636 | 0.2455 | 46.9388 |
| | 建设用地 | 1196 | 0.9995 | 37.7980 | 0.7751 | 63.3770 |
| | 未利用地 | 1009 | 0.8432 | 29.2119 | 6.0018 | 89.0776 |

| 表 4 不同土地利用类型下各等级土壤风蚀量 占该地类总风蚀量的面积比 | | | | |
|--|------|--------|-------|-------|
| Table 4 The area ratio of wind erosion of different soil classes to the total wind erosion of different land use types % | | | | |
| 土地类型 | 年份 | 轻度风蚀 | 中度风蚀 | 强烈风蚀 |
| 耕地 | 2005 | 21.71 | 9.63 | 9.11 |
| | 2010 | 100.00 | 16.11 | 16.61 |
| | 2015 | 50.00 | 16.49 | 14.45 |
| | 2020 | 44.43 | 17.44 | 12.22 |
| 草地 | 2005 | 43.42 | 82.79 | 57.25 |
| | 2010 | 0 | 92.91 | 94.75 |
| | 2015 | 50.00 | 94.00 | 85.49 |
| | 2020 | 55.57 | 94.53 | 89.19 |
| 未利用地 | 2005 | 0 | 0.93 | 9.11 |
| | 2010 | 0 | 0.74 | 16.95 |
| | 2015 | 0 | 8.73 | 9.77 |
| | 2020 | 0 | 11.72 | 12.49 |

为了进一步分析西柳沟流域景观格局变化对土壤风蚀量的影响,对斑块数、最大斑块指数、形状指数等景观指数与风蚀量进行相关性分析。根据流域景观指数与土壤风蚀量相关分析可知,斑块数(NP)、斑块密度(PD)与土壤风蚀量呈现正相关关系($R^2>0$),且相关系数均大于 0.6;而蔓延度指数(CONT-

AG)、聚集度指数(AI)与土壤风蚀量呈现负相关关系($R^2<0$)。从 NP,PD 以及 LSI 与风蚀量之间的相关关系来看,随着 NP,PD 以及 LSI 的增大,风蚀量明显增多,表明西柳沟流域人为活动的影响会加强景观破碎化程度,从而导致土壤风蚀量上涨。综合来说,2005—2020 年西柳沟景观破碎化程度整体增长,生态环境略有改善,但仍需要进一步保护,可以从提高景观聚集度指数,降低斑块数量、斑块密度、形状指数的角度,减少土壤风蚀。

表 5 2005—2020 年西柳沟流域风蚀景观格局指数

Table 5 Wind erosion landscape pattern index in Xiliugou from 2005 to 2020

| 年份 | NP | PD | LPI | LSI | CONTAG | AI |
|------|----|-----------|---------|--------|---------|---------|
| 2005 | 21 | 0.0185 | 46.696 | 4.1176 | 47.2029 | 86.3083 |
| 2010 | 13 | 0.0114 | 68.9083 | 3.3529 | 61.8863 | 90.1236 |
| 2015 | 43 | 352031961 | 57.3607 | 5.1987 | 46.6045 | 82.0708 |
| 2020 | 43 | 352031961 | 57.3607 | 5.1987 | 46.6045 | 82.0708 |

4 讨论

2005—2020 年,土地利用类型发生变化,耕地面积和未利用地面积减少,水域面积和林地面积增加。各地类的土壤风蚀等级中度、强烈风蚀面积最大,占主导地位,草地作为西柳沟流域分布面积最大的土地

利用类型,其中度、强烈风蚀占比高于85%,应当优化草地的布局情况,在风蚀等级不同的地区进行差异化的政策管理。

风蚀量与斑块数量、斑块密度以及形状指数呈显著正相关,与蔓延度指数、聚集度指数呈负相关,其中斑块密度的相关系数($R^2=0.68$)最高。小斑块数量增多,斑块形状越复杂,斑块聚集性增强,整体景观破碎化增强连通性降低,其破碎程度将直接影响流域内的土壤风蚀量,因此,减小草地、未利用地等斑块的数量并优化边界形状,有利于降低研究区土壤风蚀量。而受社会经济的影响,随着建筑用地的面积不断增加,建设用地景观优势度的相应增强;而建设用地大多由草地面积和未利用地转化而来,这表明景观格局的破碎化加剧了建设用地对草地和未利用地的侵蚀,草地和未利用地面积减少伴随着草地和未利用地景观优势的减少,以及草地和未利用地的破碎化的增加。此外,对比其他学者的研究成果,削弱未利用地及耕地的景观优势并加强建筑用地的景观优势,将会加速城市化的发展。与此同时,城市化地区的快速发展会对周边环境产生影响,生态环境的变化导致景观格局的相应变化。

西柳沟流域的景观特征不仅包括水域和未利用区域,还包括需要发展经济的城镇地区人与土地的矛盾。因此,随着人类活动的加强和城市化进程的加快,对流域内自然景观的干扰和破坏日益严重,如何保持经济发展并保护自然环境是一个迫切需要解决的问题。考虑到西柳沟流域目前的区域现状,需对土地利用结构进行调整,加快落实退耕还林政策,优化空间资源配置,在满足经济增长要求和改善生境质量之间取得平衡。此外,相关部门应采取扩大绿色廊道、优化景观格局类型、提高斑块扩展和连通程度等策略,引导向高水平生境质量转型。对于西柳沟流域生态系统来说,在防止优势生境斑块被侵占、保证自然保护区一体化优化的同时,优先保护和增强景观斑块至关重要。

5 结论

(1) 2005—2020年西柳沟流域土壤风蚀量呈增长后下降趋势,2015年风蚀量最大,达到45.3 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$),2020年降至39.4 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$),在空间上总体呈现“北强,南弱”趋势。整体流域以中度以上风蚀强度为主。

(2) 西柳沟流域土地利用以草地为主,占总面积82%以上。草地、林地面积总体呈增加趋势,斑块整体较为破碎,斑块形状向复杂化发展,说明近年来林地以不规则的形状在增长,林地需要得到进一步保护。

(3) 在2005—2020年,各地类的土壤风蚀等级

中度、强烈风蚀面积最大,占主导地位。草地的中度、强烈风蚀面积占比均超过85%,未利用地多数分布在强烈风蚀区,说明不合理的土地利用会造成风蚀量的增大,应合理优化草地、耕地布局,加强土地利用的管理与监控。

(4) 土壤风蚀量随着斑块数量、斑块密度以及形状指数的增加而增多,与蔓延度指数、聚集度指数呈负相关。未来可以从提高景观聚集度指数,降低斑块数量、斑块密度、形状指数的角度,减少土壤风蚀,提升土地防风固沙功能,维持西柳沟生态安全和可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 马苏,刘军会,康玉麟,等.鄂尔多斯市防风固沙功能时空变化及驱动因素分析[J].环境科学研究,2022,35(11):2477-2485.
Ma S, Liu J H, Kang Y L, et al. Spatio-temporal changes of sand-fixing function and its driving factors in the Ordos [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(11): 2477-2485.
- [2] Buschiazzo D E, Zobeck T M. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008,33(12): 1839-1850.
- [3] Han Y, Zhao W W, Zhou A, et al. Water and wind erosion response to ecological restoration measures in China's drylands[J]. Geoderma, 2023,435:116514.
- [4] 连虎刚,曲张明,刘春芳,等.北方防沙带河西走廊段景观格局时空演变及其防风固沙服务响应[J].应用生态学报,2023,34(9):2518-2526.
Lian H G, Qu Z M, Liu C F, et al. Spatio-temporal variation of landscape pattern and the response of wind-break and sand fixation service in Hexi Corridor of northern sand fixation belt [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(9):2518-2526.
- [5] Keleş Özgenç E, Uzun O. Impacts of land use/land cover and climate change on landscape sensitivity in Tunca River sub-basin: use in spatial planning and sectoral decision processes[J]. Journal of Environmental Management, 2024,363:121372.
- [6] Todhunter P E, Cihacek L J. Historical reduction of airborne dust in the Red River Valley of the North[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999,54(3):543-551.
- [7] Gholami H, Mohammadifar A, Bui D T, et al. Mapping wind erosion hazard with regression-based machine learning algorithms[J]. Scientific Reports, 2020,10:20494.
- [8] Zhao Y Y, Wu J G, He C Y, et al. Linking wind erosion to ecosystem services in drylands: a landscape ecological approach[J]. Landscape Ecology, 2017,32(12):2399-2417.

- [9] Pi H W, Sharratt B, Lei J Q. Wind erosion and dust emissions in central Asia: spatiotemporal simulations in a typical dust year[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(2):521-534.
- [10] Li H L, Tatarko J, Kucharski M, et al. PM_{2.5} and PM₁₀ emissions from agricultural soils by wind erosion[J]. *Aeolian Research*, 2015, 19:171-182.
- [11] 王炳瑞. 1990—2015 年内蒙古中西部地区风力侵蚀和固沙服务评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- Wang B R. Assessment of wind erosion and sand fixation service in the central and western Inner Mongolia from 1990 to 2015[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [12] 邢丽珠, 张方敏, 邢开成, 等. 基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5):111-119.
- Xing L Z, Zhang F M, Xing K C, et al. Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the Revised Wind Erosion Equation[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(5):111-119.
- [13] 郑洋, 郝润梅, 吴晓光, 等. 典型农牧交错区土地利用变化对土壤风蚀的影响: 以内蒙古四子王旗为例[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(3):575-583.
- Zheng Y, Hao R M, Wu X G, et al. Effects of land use change on soil wind erosion in typical farming-pastoral ecotone: taking Siziwang Banner in Inner Mongolia as example[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(3):575-583.
- [14] 李涵聪, 高吉喜, 陈艳梅. 基于修正风蚀模型(RWEQ)的河北省张家口市防风固沙功能空间格局研究[J]. *环境生态学*, 2023, 5(4):1-9.
- Li H C, Gao J X, Chen Y M. Spatial pattern of wind-break and sand fixation function in Zhangjiakou City, Hebei Province based on the Revised Wind Erosion Model(RWEQ)[J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(4):1-9.
- [15] 李凯, 张北赢. 2000—2020 年延安市土地利用景观格局时空演变及驱动因子[J]. *生态科学*, 2023, 42(6):74-83.
- Li K, Zhang B Y. Spatio-temporal evolution and driving factors of land use landscape pattern in Yanan City from 2000 to 2020[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(6):74-83.
- [16] 赵志强, 许晓龙, 袁青, 等. 2000—2020 年哈尔滨松花江湿地景观格局演变及驱动因素分析[J/OL]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1161.S.20231010.1603.006>.
- Zhao Z Q, Xu X L, Yuan Q, et al. Landscape pattern evolution and driving factors of Songhua River wetland in Harbin from 2000 to 2020[J/OL]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1161.S.20231010.1603.006>.
- [17] 罗佳茹, 李斌斌, 张风宝, 等. 黄丘区特色治理开发小流域土壤侵蚀变化对景观格局演变的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12):4165-4176.
- Luo J R, Li B B, Zhang F B, et al. Responses of soil erosion to changes in landscape pattern and its evolution in watershed in the loess hilly region under characteristic management and development[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12):4165-4176.
- [18] 钱佳洋. 残塬沟壑区永寿县景观格局与土壤侵蚀耦合关系[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Qian J Y. Study on coupling relationship between landscape pattern and soil erosion in Yongshou County, Gully Area of Loess Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [19] 马瞳宇, 张晓萍, 孙艳萍, 等. 水蚀风蚀交错区典型流域景观格局变化对土壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):43-48, 53.
- Ma T Y, Zhang X P, Sun Y P, et al. Influences of landscape pattern change to soil erosion process in water-wind erosion crisscross region, Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):43-48, 53.
- [20] 邹琴英, 师学义, 张臻. 汾河上游土壤侵蚀时空变化及景观格局的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4):15-21.
- Zou Q Y, Shi X Y, Zhang Z. Effects of temporal and spatial changes of soil erosion and landscape pattern in the upper reaches of the Fenhe River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4):15-21.
- [21] 封扬帆, 李鹏, 张祎, 等. 西柳沟流域拦沙坝沟道冲刷减蚀能力模拟[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5):24-31.
- Feng Y F, Li P, Zhang Y, et al. Simulation on the gully erosion reduction ability of check dam in Xiliugou Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):24-31.
- [22] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(6):2248-2260.
- Gao Y L, Li H B. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6):2248-2260.
- [23] 赵晓萌, 程宏, 蒋宁, 等. 京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化[J]. *科学通报*, 2023, 68(Z1):238-253.
- Zhao X M, Cheng H, Jiang N, et al. Spatial and temporal evolution of soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(Z1):238-253.
- [24] 杜睿哲, 李文栋, 高文浩, 等. 气候、地表覆被变化对砬砬砂岩区风蚀时空变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2023,

- 30(5):31-40.
- Du R Z, Li W D, Gao W H, et al. Influence of climate and surface cover changes on spatiotemporal changes of wind erosion in Pisha sandstone area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):31-40.
- [25] 张洋,李鹏,马文东,等.黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀对土地利用变化响应[J].水土保持研究,2022,29(5):70-76,84.
- Zhang Y, Li P, Ma W D, et al. Research on the response of soil erosion to land use change in Xiliugou Watershed of the upper Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):70-76,84.
- [26] 刘蕾,李庆云,刘雪梅,等.黄河上游西柳沟流域淤地坝系对径流影响的模拟分析[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):562-573.
- Liu L, Li Q Y, Liu X M, et al. Simulation of the impact of check dams on runoff in Xiliugou Watershed in the upper Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020,28(3):562-573.
- [27] 毛鸿欣,贾科利,高曦文,等.1980—2018年银川平原土地利用变化时空格局分析[J].科学技术与工程,2020,20(20):8008-8018.
- Mao H X, Jia K L, Gao X W, et al. Spatiotemporal pattern of land use change in Yinchuan Plain from 1980 to 2018[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(20):8008-8018.
- [28] 石善球,柴燕妮.基于地表覆盖数据的生态用地景观格局分析[J].地理空间信息,2021,19(2):5-8,63.
- Shi S Q, Chai Y N. Landscape pattern analysis of ecological land based on land coverage data[J]. Geospatial Information, 2021,19(2):5-8,63.
- [29] 袁轶男,金云峰,聂晓嘉,等.基于Fragstats4的上海市城市景观格局指数动态研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2020,56(6):1157-1162.
- Yuan Y N, Jin Y F, Nie X J, et al. Study on dynamic urban landscape pattern indexes in Shanghai City based on Fragstats4[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2020, 56(6):1157-1162.
- [30] 马晓勇,党晋华,李晓婷,等.太原市近15年城市景观格局时空变化及其驱动力[J].水土保持通报,2018,38(4):308-316.
- Ma X Y, Dang J H, Li X T, et al. Spatial-temporal changes and driving forces of urban landscape pattern in Taiyuan City in last 15 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):308-316.
- ~~~~~
- (上接第13页)
- [16] 高海燕,黄恒君,王宇辰.基于非负矩阵分解的函数型聚类算法[J].统计研究,2020,37(8):91-103.
- Gao H Y, Huang H J, Wang Y C. Functional clustering algorithm based on non-negative matrix factorization[J]. Statistical Research, 2020,37(8):91-103.
- [17] Han Z Q, Zuo Q T, Wang C Q, et al. Impacts of climate change on natural runoff in the Yellow River Basin of China during 1961—2020[J]. Water, 2023,15(5):929.
- [18] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J].水力发电学报,2020,39(8):90-103.
- Feng J H, Zhao G J, Mu X M, et al. Analysis on runoff regime in middle Yellow River and its driving factors[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020,39(8):90-103.
- [19] 贾何佳,李谢辉,文军,等.黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估[J].资源科学,2022,44(6):1292-1304.
- Jia H J, Li X H, Wen J, et al. Runoff change simulation and future trend projection in the source area of the Yellow River[J]. Resources Science, 2022,44(6):1292-1304.
- [20] Zeng B, Zhang F G, Zeng W F, et al. Spatiotemporal heterogeneity in runoff dynamics and its drivers in a water conservation area of the upper Yellow River Basin over the past 35 years[J]. Remote Sensing, 2022,14(15):3628.
- [21] 梁鹏飞,李宗杰,辛惠娟,等.黄河源区径流变化特征及影响因素研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(4):64-71.
- Liang P F, Li Z J, Xin H J, et al. Characteristics of runoff changes and influencing factors in the source region of the Yellow River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(4):64-71.
- [22] 郑金丽,严子奇,李东,等.黄河流域降雨-径流关系时空演变研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):77-85,92.
- Zheng J L, Yan Z Q, Li D, et al. Spatio-temporal evolution of the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021,32(4):77-85,92.