

DOI: 10.16843/j.sswc.2024061

引用格式: 王淼, 牛健植, 杨涛, 等. 黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性变化 [J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(2): 55–65. WANG Miao, NIU Jianzhi, YANG Tao, et al. Variation of soil erosion sensitivity in plentiful and coarse sediment area of the middle Yellow River [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(2): 55–65.

# 黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性变化

王淼<sup>1</sup>, 牛健植<sup>1,2,3,4†</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 王迪<sup>1</sup>, 苗禹博<sup>5</sup>, 贾梦柔<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 100083, 北京; 2. 林木资源高效生产全国重点实验室, 100083, 北京; 3. 水土保持与荒漠化防治国家林业局重点实验室, 100083, 北京; 4. 林业生态工程教育部工程研究中心, 100083, 北京; 5. 国家林业和草原局林草调查规划院, 100714, 北京)

**摘要:** 黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀十分严重。为明晰区域土壤侵蚀发生的潜在几率, 笔者应用修正通用土壤流失方程(RUSLE)与 ArcGIS, 综合评价土壤侵蚀敏感性(2010、2015 和 2020 年), 并识别敏感性关键因子。结果如下: 1) 研究区土壤侵蚀敏感性整体由东南至西北呈现降低趋势, 中部、东部地区为极敏感和高度敏感主要分布区。2) 2010—2020 年土壤侵蚀敏感性整体上表现为先增后减。研究区西侧敏感性等级较低, 研究区南部、北部以及东部偏南区域表现出较为明显的等级降低, 约占研究区面积的 21%; 东南部与东部偏北区域敏感性等级有所增加, 约占研究区面积的 15.8%。3) 植被覆盖度  $C$  因子主要在不敏感具有较大影响; 土壤可蚀性  $K$  因子控制着研究区中部与东部绝大部分区域, 主要为轻度及以上敏感等级, 在各影响因子排序中均  $> 90%$ ; 降雨侵蚀力  $R$  因子在研究区东部与西部对植被覆盖不足与土壤破坏严重地区具有较大影响; 地形起伏度  $LS$  因子对整个研究区土壤侵蚀的影响较小。此结果可为未来区域防治、水土保持治理规划提供理论支撑。

**关键词:** 修正通用土壤流失方程(RUSLE); 土壤侵蚀敏感性; 时空变化; 关键因子识别; 黄河中游多沙粗沙区  
**中图分类号:** S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2025)02-0055-11

## Variation of soil erosion sensitivity in plentiful and coarse sediment area of the middle Yellow River

WANG Miao<sup>1</sup>, NIU Jianzhi<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>, MIAO Yubo<sup>5</sup>, JIA Mengrou<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, 100083, Beijing, China; 3. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation and Desertification Combating, 100083, Beijing, China; 4. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China; 5. Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration of P. R. China, 100714, Beijing, China)

**Abstract:** [Background] The plentiful and coarse sediment area of the middle Yellow River is the main source of sediment, and the annual average sediment transport load is 1.182 billion tons, accounting for 73.9% of the total sediment flow into the Yellow River. Soil erosion in this area is very serious and the ecological environment is fragile, causing heavy ecological pressure, which not only threatens the local ecological security, but also has a great impact on the downstream river, posing a serious threat to human production and life. [Methods] In order to quantify the potential probability of regional soil erosion and identify the key factors of soil erosion, revised universal soil loss equation (RUSLE) and ArcGIS technology were applied in this study to comprehensively evaluate the sensitivity

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-11-19

项目名称: 国家重点研发计划项目“黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀协同治理技术与示范”(2022YFF1300804)

第一作者简介: 王淼(2000—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀。E-mail: 451179481@qq.com

†通信作者简介: 牛健植(1974—), 女, 博士, 教授。主要研究方向: 土壤侵蚀, 森林水文。E-mail: nexk@bjfu.edu.cn

of soil erosion. The key sensitivity factors were also identified by superposition ranking analysis (2010, 2015, and 2020). Visualization of the spatial and temporal distribution of soil erosion sensitivity and key sensitivity factors was achieved. [Results] 1) Soil erosion sensitivity showed a decreasing trend from southeast to northwest. The extremely sensitive and highly sensitive areas were mainly found in the central and eastern parts of the study area, while moderate sensitive areas showed a large staggered distribution. 2) From 2010 to 2020, the overall soil erosion sensitivity increased first and then decreased. The west of the study area showed relatively stable low sensitivity, the south, north and some eastern regions of the study area showed a relatively obvious decline, mainly due to the increase of insensitive (6.0%), and the southeast and other eastern areas of the study area increased, mainly due to the expansion of highly sensitive and extremely sensitive areas (1.2%). 3)  $C$  factor mainly had a great influence in insensitive areas;  $K$  factor controlled most of the central and eastern regions of the study area with the grade higher than slightly sensitive. In the western part of the study area, the combination of  $R$  and  $C$  factor increased the risk of soil erosion in the area with insufficient vegetation cover, and in the eastern part, the combination of  $R$  and  $K$  factor had a greater impact on the area with serious soil damage. The  $LS$  factor had minor effect on soil erosion in the whole study area. [Conclusions] In summary, soil erosion sensitivity in plentiful and coarse sediment area of the middle Yellow River decreased overall, while soil erosion sensitivity in the central and eastern parts was higher, which was mainly affected by  $K$  and  $R$  factors. The research results provided theoretical guidance for the delineation of key soil erosion protection zones, meanwhile providing support for the targeted management of regional soil erosion.

**Keywords:** revised universal soil loss equation (RUSLE); soil erosion sensitivity; spatio-temporal variation; key factor identification; plentiful and coarse sediment area of middle Yellow River

土壤侵蚀影响生态环境质量,对人类生产生活构成了巨大的威胁,是造成土层变薄、土壤退化,危及农业生产的重大灾害<sup>[1-2]</sup>。截至 2022 年,全国水土流失面积 265.34 万 km<sup>2</sup>,水力侵蚀面积为 109.06 万 km<sup>2</sup>,风力侵蚀面积 156.28 万 km<sup>2</sup>,分别占水土流失总面积的 41.10% 和 58.90%<sup>[3]</sup>。土壤侵蚀敏感性表示在各种自然要素的作用下土壤侵蚀发生的潜在几率和程度<sup>[4]</sup>。研究分析土壤侵蚀敏感性有利于确定土壤侵蚀易发区域,防治土壤侵蚀发生。国内外学者<sup>[5-6]</sup>针对土壤侵蚀敏感性开展了诸多研究,提出了经验模型和物理模型 2 类评估方式。其中经验模型参数更简单、资料来源更丰富、计算更便捷,如 20 世纪 60 年代美国通用土壤流失方程 USLE<sup>[7]</sup>、刘宝元等<sup>[8]</sup>提出的中国土壤流失预测方程 CLSE 以及修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RULSE)<sup>[9]</sup>。RULSE 目前已被广泛应用于水土流失、监测预报以及敏感分析<sup>[10-11]</sup>,其内嵌的降雨侵蚀力因子( $R$ )、地形起伏度因子( $LS$ )、土壤可蚀性因子( $K$ )及植被覆盖度因子( $C$ ),均被视为影响土壤侵蚀敏感性分析的核心要素。目前土壤侵蚀敏感性研究主要聚焦于 3 个关

键领域: 1)土壤侵蚀敏感性时空分布变化研究<sup>[12-13]</sup>; 2)土壤侵蚀敏感性影响因子研究,如运用叠加排序方法定量识别关键因子<sup>[14]</sup>,或将土地利用变化纳入考量范畴,探究其对土壤侵蚀敏感性分布的影响<sup>[15]</sup>; 3)土壤侵蚀敏感性预测研究, Ping 等<sup>[16]</sup>结合 RUSLE 与 LSTM 模型预测了湖北省 2025 年土壤侵蚀敏感性; 郝姗姗等<sup>[17]</sup>结合 RUSLE 与 BP 神经网络预测了黄土丘陵区土壤侵蚀各影响因子的显著性。

黄河中游多沙粗沙区作为黄河泥沙的主要来源地,生态环境脆弱、流域生态屏障功能不强<sup>[18]</sup>。自 2010 年以来,该区降雨侵蚀力以及植被覆盖较之历史时期均发生变化<sup>[19-20]</sup>。为准确把握土壤侵蚀的现状与潜在风险,对现时期土壤侵蚀敏感性进行详尽评价变得尤为迫切。此外,深入识别并分析影响土壤侵蚀敏感性的关键因子,特别是加强对多因子组合机制的探究,对于制定科学合理的防治策略具有关键意义。笔者基于 RULSE 构建黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性评价指标体系,结合 ArcGIS 评价土壤侵蚀敏感性,阐明其时空变化规律,识别土壤侵蚀敏感性关键因子。研究将可为黄

河中游多沙粗沙区土壤侵蚀重点保护区域划定、水土保持治理提供理论指导,为区域可持续发展提供科学依据与决策支持。

递减,多年平均降水量 450 mm 左右,多集中于汛期。地表沟壑纵横,平均沟壑密度为 2~5 km/km<sup>2</sup>。地表物质主要为沙黄土,土质疏松,且地表植被覆盖稀疏,土壤侵蚀严重。

### 1 研究区概况

黄河中游多沙粗沙区(E 106°57'~111°58',N 35°54'~40°15')是指多年平均输沙模数大于 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a),且粗泥沙(粒径 d≥0.05 mm)输沙模数 > 1 300 t/(km<sup>2</sup>·a)的区域<sup>[21]</sup>,面积约 7.86 万 km<sup>2</sup>。该区域(图 1)属于干旱半干旱区,降水由东南至西北

### 2 数据来源与研究方法

表 1 详细列出来该研究所用数据。采用修正通用土壤流失方程和综合评价法对土壤侵蚀敏感性进行评价,该方法在本研究区域已经应用<sup>[22]</sup>。笔者选取降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、

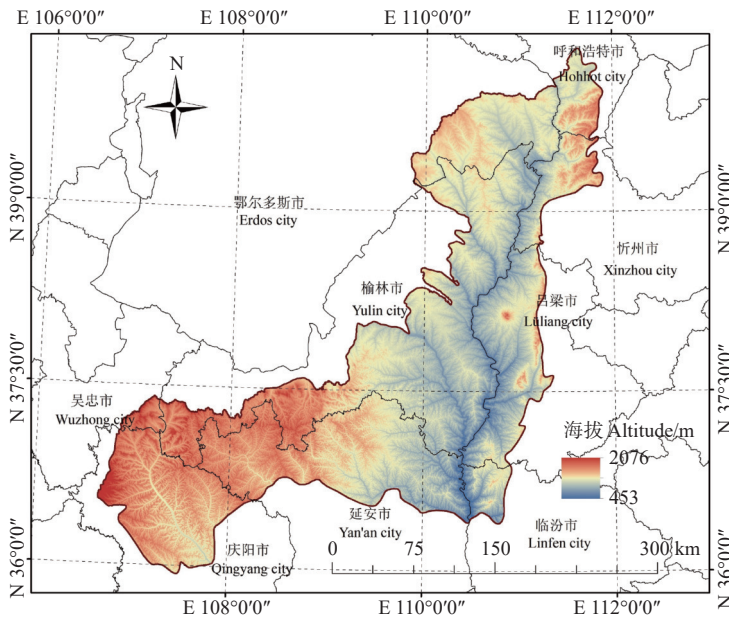


图 1 黄河中游多沙粗沙区区位图

Fig. 1 Map of plentiful and coarse sediment area in the middle reaches of the Yellow River

表 1 数据来源

Tab. 1 Data source

数据名称 Data name	时空分辨率 Resolution ratio	数据来源 Data sources
黄河中游多沙粗沙区基础边界数据集 The boundary data of the high and coarse sediment yield in the middle Yellow River	—	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 National Cryosphere Desert Data Center ( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )
基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1) Chinese soil dataset based on the World Soil Database (HWSD) (v1.1)	1 : 1×10 <sup>6</sup>	
中国地面气候资料日值数据集 Daily meteorological dataset of China National Surface Weather Station	—	国家气象科学数据中心 National Meteorological Science Data Center ( <a href="https://data.cma.cn/">https://data.cma.cn/</a> )
Aster GDEM数字高程影像 Aster GDEM digital elevation data	30 m	地理空间数据云 GSCloud ( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )
2000—2022年中国30 m年最大NDVI数据集 The annual largest NDVI dataset of 30 m in China from 2000 to 2022	30 m	国家生态科学数据中心 National Ecosystem Science Data Center ( <a href="http://www.nesdc.org.cn">http://www.nesdc.org.cn</a> )

地形起伏度因子( $LS$ )和植被覆盖度因子( $C$ )为评价指标,计算式如下

$$S_j = \sqrt[4]{S_R S_K S_{LS} S_C} \quad (1)$$

式中:  $S_j$ 为空间单元土壤侵蚀敏感性指数;  $S_R$ 、 $S_K$ 、 $S_{LS}$ 和 $S_C$ 分别为 $R$ 、 $K$ 、 $LS$ 、 $C$ 因子敏感性等级值;量纲均为1。

依托《生态功能区划技术暂行规程》和相关研

究成果<sup>[23-25]</sup>构建研究区土壤侵蚀敏感性评价分级赋值(表2)。该规程已在研究区邻近地区得到广泛应用<sup>[26-27]</sup>。统一所有数据空间投影坐标系为WGS 1984 UTM Zone 49N,空间分辨率为30 m×30 m,并基于ArcGIS重分类和栅格计算器功能获得土壤侵蚀敏感性综合评价结果,利用自然断点法Natural Breaks(Jenks)进行分级。

表2 评价指标及分级赋值

Tab. 2 Evaluation index and classification standard

敏感等级 Sensitivity	降雨侵蚀力 Rainfall erosivity $R$ (MJ·mm/(hm <sup>2</sup> ·h·a))	土壤可蚀性 Soil erodibility $K$	地形起伏度 Relief degree of land surface $LS$	植被覆盖度 Vegetation coverage $C$	赋值 Assigned value
不敏感 Insensitive	0 ~ 800	0 ~ 0.016	0 ~ 3.5	0 ~ 0.01	1
轻度敏感 Slightly sensitive	> 800 ~ 1 000	> 0.016 ~ 0.018	> 3.5 ~ 10.5	> 0.01 ~ 0.09	3
中度敏感 Moderately sensitive	> 1 000 ~ 1 500	> 0.018 ~ 0.020	> 10.5 ~ 16.5	> 0.09 ~ 0.20	5
高度敏感 Highly sensitive	> 1 500 ~ 2 000	> 0.020 ~ 0.022	> 16.5 ~ 24.5	> 0.20 ~ 0.45	7
极敏感 Extremely sensitive	> 2 000	> 0.022	> 24.5	> 0.45	9

1)  $R$ 因子。采用章文波等<sup>[28]</sup>提出的日降雨侵蚀力模型计算:

$$R_j = \alpha \sum_{i=1}^n (P_i)^\beta; \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.189}; \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_d} + \frac{24.455}{P_y} \quad (4)$$

式中:  $R_j$ 为第 $j$ 个半月的 $R$ 因子, MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a);  $n$ 为第 $j$ 个半月内的侵蚀性降雨(日降雨量 $\geq 12$  mm)发生时间, d;  $P_i$ 为第 $j$ 个半月内第 $i$ 日的侵蚀性日降雨量, mm;  $\alpha$ 、 $\beta$ 为模型参数,量纲为1;  $P_d$ 为侵蚀性降雨的日均值, mm;  $P_y$ 为侵蚀性降雨的年均值, mm。

2)  $K$ 因子。采用Sharpley等<sup>[29-31]</sup>修正后的EPIC模型公式计算 $K$ 因子并转换成国际单位:

$$K_{EPIC} = \left(0.2 + 0.3 \exp\left(-0.0256 S_{sand} \left(1 - \frac{S_{silt}}{100}\right)\right)\right) \times \left(\frac{S_{silt}}{S_{clay} + S_{silt}}\right)^{0.3} \times \left(1.0 - \frac{0.25 S_{om}}{S_{om} - \exp(3.72 - 2.95 S_{om})}\right) \times \left(1.0 - \frac{0.7 S_{nl}}{S_{nl} + \exp(-5.51 + 22.9 S_{nl})}\right); \quad (5)$$

$$K = (-0.01383 + 0.51575 K_{EPIC}) \times 0.1317 \quad (6)$$

式中:  $S_{sand}$ 、 $S_{silt}$ 、 $S_{clay}$ 和 $S_{om}$ 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机质质量分数, %;  $S_{nl}$ 为砂粒剩余比例, %,其公式为:  $S_{nl} = 1 - S_{sand}/100$ 。

3)  $LS$ 因子。采用Liu等<sup>[32-33]</sup>提出的公式计算 $LS$ 因子,计算式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \quad m = \begin{cases} 0.5, \theta > 5^\circ \\ 0.4, 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.3, 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.2, \theta \leq 1^\circ \end{cases}; \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin\theta + 0.03, \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin\theta - 0.50, 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin\theta - 0.96, \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\lambda$ 为水平坡长, m;  $m$ 为坡长指数,量纲为1;  $\theta$ 为坡度值, (°)。

4)  $C$ 因子。采用蔡崇法等<sup>[34]</sup>提出的 $C$ 值确定方法,计算式为:

$$C = \begin{cases} 1, f_g = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \log_{10} f_g, 0 < f_g \leq 78.3\% \\ 0, f_g > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式中 $f_g$ 为植被覆盖度, %。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤侵蚀敏感性单因子

由图2可知,研究区内降雨侵蚀力与土壤可蚀性相对敏感性等级较高。除降雨较少的2015年外,降雨侵蚀力敏感性普遍处于中度敏感及以上水平,2010年和2020年比例高达74.3%和79.6%;其空间分布上主要表现为自东南向西北递减。 $K$ 因子在研究区内大部分区域表现为极敏感,占总面积的57.4%,面积为4.5万km<sup>2</sup>,主要分布于研究区的中部、东部以及南部,并与小部分中度敏感、不敏感交错分布;不敏感面积为2.3万km<sup>2</sup>,比例仅次于极敏

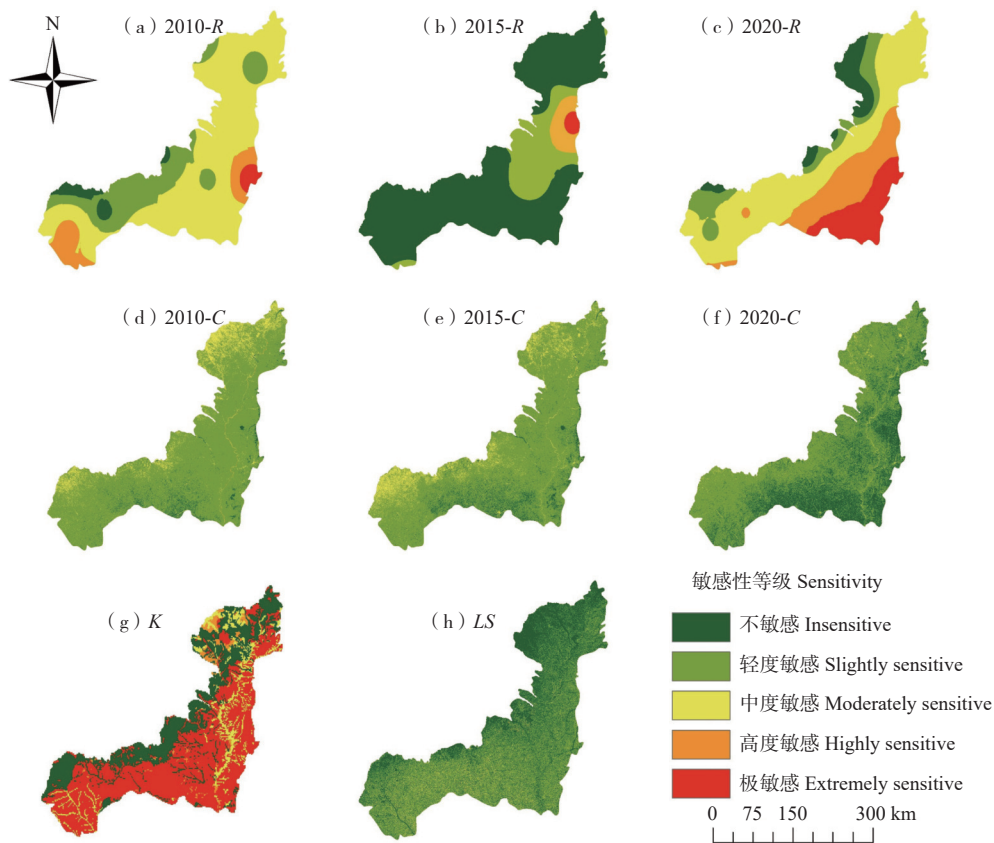


图2 土壤侵蚀敏感性单因子空间分布状况

Fig. 2 Spatial pattern of single variable of soil erosion sensitivity

感,且在研究区西部呈现条带状分布;研究区北部则表现为多种敏感等级的交错分布。

研究区内整体 *LS* 因子与 *C* 因子敏感性较低。*LS* 因子不敏感与轻度敏感占绝大多数,面积均为 3.6 万  $\text{km}^2$ , 占总面积的 92%。南部地区 *LS* 因子敏感性等级相对较高,可能更容易受到侵蚀的影响。此外,*C* 因子空间分布上表现为与 *R* 因子类似的地带性规律,即敏感性等级自东南至西北递增。该因子整体表现为良好且具有向好态势,不敏感比例由 2010 年的 3.6% 增长至 2020 年的 30.4%;中度敏感面积比例降低 8.8%;高度敏感与极敏感极少,3 期均不足研究区面积 0.01%。

### 3.2 土壤侵蚀敏感性综合评价

由表 3 可知,2010 年中度敏感面积比例最大,为 32.9%;2015 年和 2020 年不敏感面积比例最大,分别为 57.0% 和 35.9%。10 年间轻度敏感与中度敏感面积总体表现为减少趋势,其面积比例分别减少 4.2% 和 3.0%;不敏感、高度敏感与极敏感均表现为增加趋势,其面积比例分别增加 6.0%、1.1% 和 0.1%。不敏感与轻度敏感所占面积都表现为先

增后减,中度敏感及以上等级敏感则表现为先减后增。

结合图 3 和图 4 可知,2010 年至 2015 年土壤侵蚀敏感性转移趋势整体向好,29.8% 的不敏感等级未发生改变,轻度敏感转变为不敏感和中度敏感转变为轻度敏感比例次之,分别为 19.6% 和 18.2%。2015—2020 年以不敏感与轻度敏感的敏感性非越级增加较为明显,比例分别为 15.2% 和 18.0%。高度敏感与极敏感在 2010 年时表现为西南部与东部部分地区的集中分布,约占 9.4%;2015 年这部分集中分布区敏感性等级均明显降低,且集中分布区转移至东侧偏北部区域。到 2020 年,研究区东部、东南部敏感性等级增加至高度敏感与极敏感的区域占总面积 10.4%。同时,近 25% 的地区等级由不敏感、轻度敏感增加至中度敏感,主要在研究区东部、东南部与高度敏感、极敏感交错分布。

### 3.3 土壤侵蚀敏感性关键影响因子分析

为精确评估土壤侵蚀敏感性,明确土壤侵蚀敏感关键因子,基于 3 期敏感性结果,利用叠加排序

表 3 2010—2020 年土壤侵蚀敏感性评价

Tab. 3 Comprehensive evaluation of soil erosion sensitivity from 2010 to 2020

敏感性等级 Sensitivity	2010		2015		2020	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例
	Area/km <sup>2</sup>	Proportion/%	Area/km <sup>2</sup>	Proportion/%	Area/km <sup>2</sup>	Proportion/%
不敏感 Insensitive	23 438	29.9	44 723	57.0	28 163	35.9
轻度敏感 Slightly sensitive	21 640	27.6	25 648	32.7	18 332	23.4
中度敏感 Moderately sensitive	25 855	32.9	7 462	9.5	23 445	29.9
高度敏感 Highly sensitive	6 591	8.4	605	0.7	7 504	9.5
极敏感 Extremely sensitive	966	1.2	53	0.1	1 046	1.3

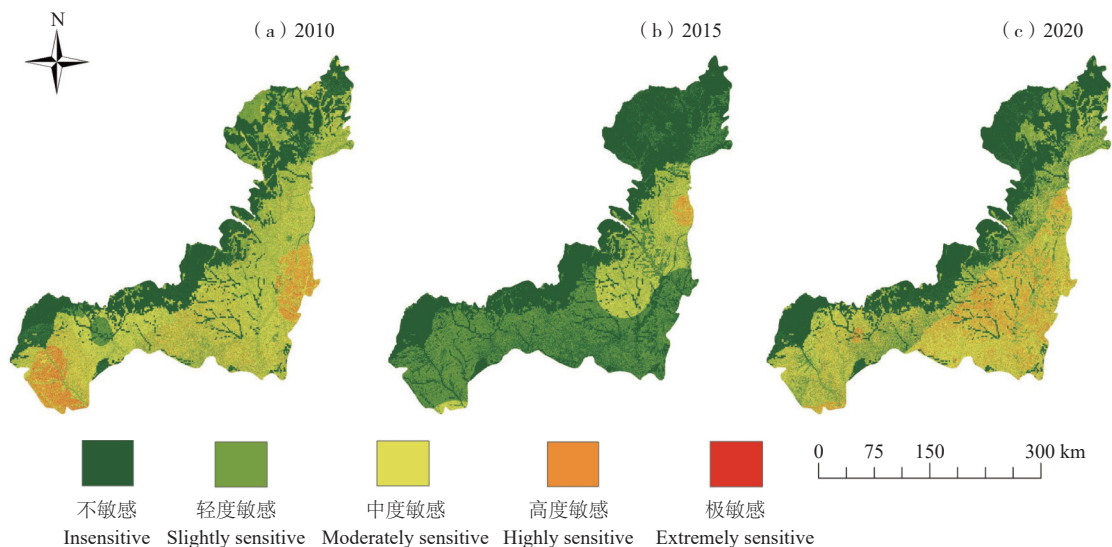
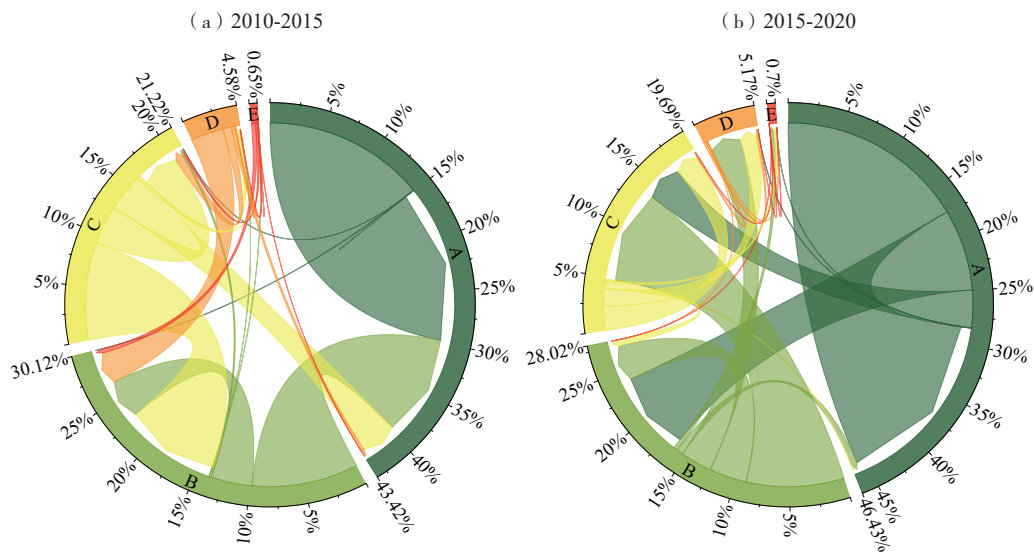


图 3 黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性等级时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal variation of soil erosion sensitivity of plentiful and coarse sediment area in the middle reaches of the Yellow River



A: 不敏感; B: 轻度敏感; C: 中度敏感; D: 高度敏感; E: 极敏感。下同。A refers to insensitive; B refers to slightly sensitive; C refers to moderately sensitive; D refers to highly sensitive; E refers to extremely sensitive. The same below.

图 4 2010—2020 年土壤侵蚀敏感性等级转移弦图

Fig. 4 Transfer string map of soil erosion sensitivity from 2010 to 2020

进行分析,得到黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感关键因子控制面积比例情况(图 5)以及空间格局分布情况(图 6),能够为区域按需治理提供理论支持。

由图 5 可知,在 3 期不敏感等级区域中,*R* 因子表现为先减后增,比例分别为 79.59%、8.21% 和 66.98%,除去降雨较少的 2015 年,*R* 因子控制面积比例均远超其他因子; *C* 因子次之,其 3 期比例分别为 49.21%、51.07% 和 32.92%,说明植被覆盖情况有所好转,不过在 *R* 因子较大的情况下植被覆盖不足的区域仍然面临着较高的土壤侵蚀风险。在轻度敏感及以上等级中,3 期各敏感等级下 *K* 因子控制面积比例均为 90% 以上,占据主体地位。其中, *R-K*、*LS-K* 组合因子控制面积都随着敏感性等级增加而增加。除 2015 外, *R-K* 因子同等敏感等级下各期比例均表现为增加; *LS-K* 因子则在降雨相对较少的 2015 年控制面积总比例相对较大,说明 *K* 因子

是控制研究区内大部分区域土壤侵蚀的关键因子; *LS* 因子由于其自有的重力势能差成为影响土壤侵蚀敏感性内部动力因子; *R* 因子则提供了土壤侵蚀的外部动力,进一步加剧土壤抗蚀性差、地形起伏度较大地区的土壤侵蚀风险。

由图 6 可知, *LS* 因子控制面积较小,主要分布于研究区西部与北部,同地势较高区域与河道有较高的重合度。 *C* 因子对土壤侵蚀敏感性影响明显的地区主要分布于研究区西部与北部,且 10 年来 *C* 因子控制面积表现为减少趋势,说明这部分区域植被覆盖度情况虽有改善但仍不如研究区中部以及东部地区。 *K* 因子控制着研究区中部与东部绝大部分区域。 *R* 因子主要影响研究区东部与西部地区,在研究区西部 *R* 因子多与 *C* 因子、*LS* 因子组合发挥作用,在空间上与不敏感分布重合度较高,而在研究区东部 *R* 因子多与 *K* 因子组合,在空间上与高

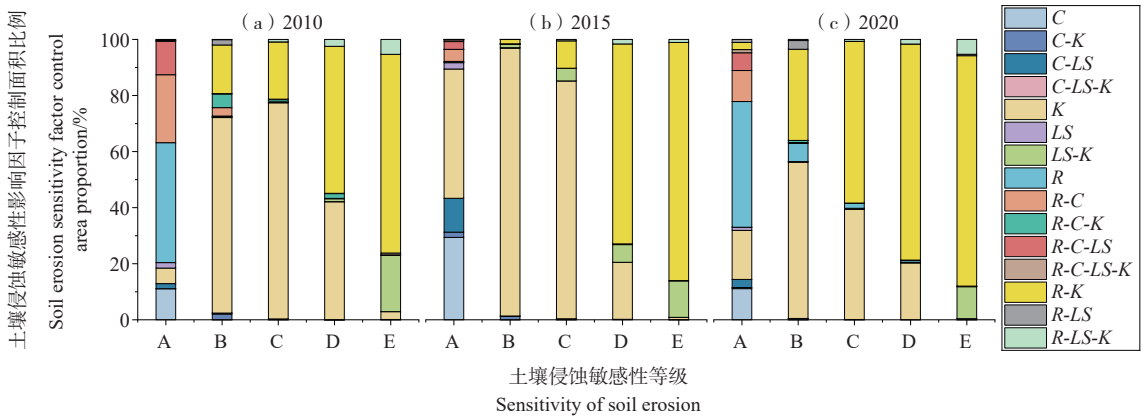


图 5 2010—2020 年土壤侵蚀敏感性影响因子控制面积比例情况  
Fig. 5 Soil erosion sensitivity factor control area proportion from 2010 to 2020

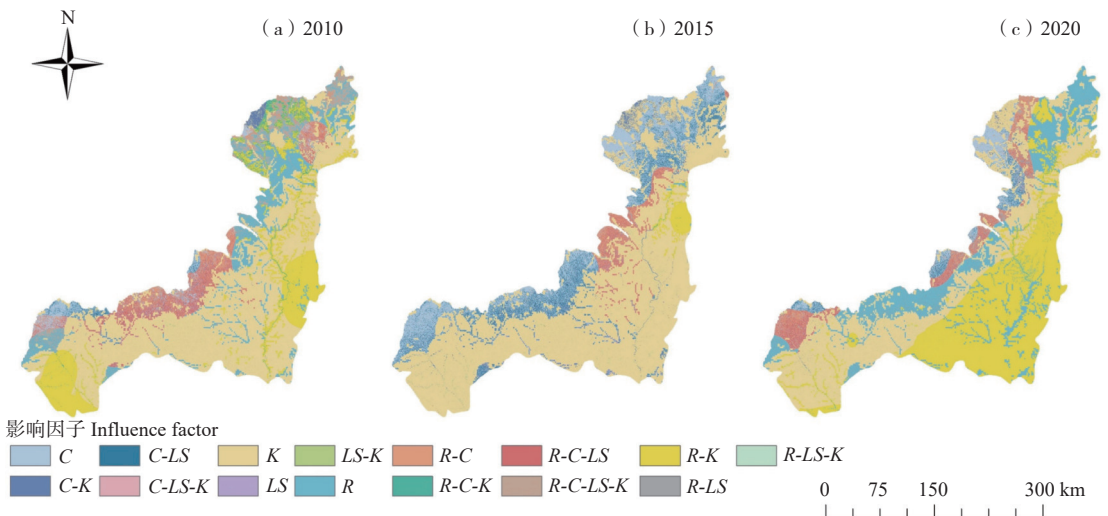


图 6 土壤侵蚀敏感性影响因子识别  
Fig. 6 Identification of influencing factors of soil erosion sensitivity

度敏感、极敏感有着较高的重合度。

## 4 讨论

### 4.1 土壤侵蚀敏感性变化

本研究发现,2010—2020 年土壤侵蚀敏感性等级整体降低,并在空间分布上呈现东高西低、南高北低的特点。这与刘琳等<sup>[13]</sup>总结得出的 2000—2007 年土壤侵蚀敏感性显著降低的趋势相同。2010—2015 年研究区土壤侵蚀敏感性等级表现为全区域、大幅度地降低,然而 2015—2020 年研究区土壤侵蚀敏感性整体有所回升。对影响土壤侵蚀敏感性的各因子进行分析,土壤与地形地貌虽然对土壤侵蚀敏感性影响有着明显影响,但是在相当一定时间通常保持稳定,且研究期内黄河中游多沙粗沙区植被覆盖情况整体向好,只有  $R$  因子在研究期内发生较大变化,即 2015 年时年降雨量减少,因此降雨侵蚀力也对应更小,当年土壤侵蚀敏感性出现明显降低。

研究区敏感性等级降低的区域主要为庆阳市、吕梁市中部以及内蒙古。这些地区近年来林草覆盖率提高,土壤侵蚀敏感性因此降低;敏感性等级增加的区域主要为延安市北部、吕梁市西北部与黄河干流两岸 4 市相交地带,虽然这部分地区近年来重视植被建设,植被覆盖情况有所改善,但长时间的降雨侵蚀力增加仍然导致该区域的土壤侵蚀敏感性增加<sup>[35]</sup>。

### 4.2 土壤侵蚀敏感性关键因子

本研究发现,研究区  $K$  因子整体较高,土壤抗蚀性能差,与张科利等<sup>[36]</sup>在黄土高原地区开展的土壤可蚀性研究结果一致。此外, $R$  因子广泛地影响着整个研究区,与  $K$ 、 $C$  因子的组合对土壤侵蚀敏感性也具有较大影响。 $C$  因子作为土壤侵蚀阻抗因子,能够有效抑制土壤侵蚀的发生。研究时段内,以  $C$  因子为关键影响因子的区域面积随时间推移而减少,说明退耕还林还草工程取得良好成效。但 2015 年时在延安市北部、榆林市南部与东南部仍然出现  $C$  因子敏感性等级增加的情况。这与白欣等<sup>[37]</sup>和杨鹏辉等<sup>[38]</sup>研究中指出的该部分地区植被覆盖表现出持续性退化趋势的结论互相印证,进一步说明仍需巩固退耕还林成果,保护研究区植被,并在考虑研究区植被水资源承载力的基础上进一步探索植被覆盖发展的可能。 $LS$  因子作为影响土壤侵蚀敏感性的内部动力因素,主要分布在不敏感与轻度敏感的部分地区,对于研究区影响相对较小。

### 4.3 敏感区治理措施探讨

根据黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性关键影响因子识别结果探讨典型地区治理措施,主要包括以下 3 个区域:1)延安市西北部。该区整体敏感性相对较低,但植被覆盖维持在中等水平,存在进一步改善空间与潜力。研究期内土壤侵蚀敏感性关键因子经历了由单一  $K$  因子至  $R$ - $K$  组合因子的转变。这说明作为影响当地植被覆盖主要气候因子的  $R$  因子发挥作用日益明显<sup>[39]</sup>。未来针对该区域的生态治理策略应聚焦于 2 大核心方向:一是增强植被覆盖,二是优化土壤质量。一方面要加强对现有植被的维护与管理,进一步巩固退耕还林项目的实施成果,另一方面需注重土壤质量的全面提升,争取建地保地相结合,改善土壤养分状况。2)黄河干流两岸的 4 市相交地带。本区域核心任务依然聚焦于植被覆盖度的提升与土壤质量的改良。鉴于该地域特有的地形特征,即坡度陡峭、沟壑纵横,故而在治理策略中必须强化生态环境综合治理的力度,以有效遏制人类活动对地质环境造成的潜在破坏。此外,为进一步完善水土保持工程体系,需在沟道区域科学布设谷坊、淤地坝等拦沙蓄水工程,加大坡面治理力度。3)吕梁市西北部。该区敏感性等级相对较高,且关键影响因子明确指向  $R$ - $K$  组合因子,加之人口相对密集而经济相对欠发达的现状,治理策略的制定需综合考虑多方面因素。在上述增强植被覆盖、改良土壤性状以及加大坡面治理力度的基础上,应针对品种不佳、经济效益低、成活率低的经济林进行改良,提升林木品质与产量,实现水土保持效益与经济效益的双赢。

## 5 结论与展望

1)黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性整体由东南至西北呈现降低趋势,中部、东部地区为土壤侵蚀极敏感和高度敏感主要分布区域,与中度敏感在地理空间上呈现出大面积的交错分布态势。

2)研究期内,土壤侵蚀敏感性整体上表现为先增后减。研究区西侧表现为相对稳定的低敏感,研究区的南部、北部以及东部偏南区域表现出较为明显的等级降低,主要为不敏感的增加(6.0%)。研究区的东南部与东部偏北区域敏感性等级有所增加,主要为高度敏感与极敏感面积的扩大(1.2%)。

3) $C$  因子主要在不敏感区具有较大影响; $K$  因子控制着研究区中部与东部绝大部分区域,主要为轻度及以上敏感等级; $R$  因子主要在研究区东部与

西部与  $K$ 、 $C$  因子组合对土壤破坏严重与植被覆盖不足地区具有较大影响;  $LS$  因子对整个研究区土壤侵蚀的影响相对较小。

本研究仍存在数据精度不足问题, 如目前土壤数据分辨率较低, 对其识别与计算存在较大局限性。未来可通过区域土壤调查从而获取更精细的土壤数据, 以便研究结论更适用实际工作指导, 为黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀防治提供更为可靠的依据。

## 6 参考文献

- [1] QIAO Yuliang, QIAO Yun. Fast soil erosion investigation and dynamic analysis in the Loess Plateau of China by using information composite technique[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 29(1): 85.
- [2] ZHAO Guangju, MU Xingmin, WEN Zhongming, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 2022 年全国水土流失动态监测显示我国水土流失状况持续改善 生态系统质量稳步提升 [EB/OL]. (2023-08-15)[2023-12-28]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content\\_6898436.htm/](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content_6898436.htm/).  
Central People's Government of the People's Republic of China. Dynamic monitoring of soil and water loss in China in 2022 shows continuous improvement of soil and water loss in China and steady improvement of ecosystem quality[EB/OL]. (2023-08-15)[2023-12-28]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content\\_6898436.htm/](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content_6898436.htm/).
- [4] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 14. WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, XIAO Han, et al. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 14.
- [5] 罗志军, 张俊. 土壤侵蚀模型的研究现状与展望 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(27): 8574. LUO Zhijun, ZHANG Jun. Research situation and prospect of soil erosion model in the world[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(27): 8574.
- [6] QIN Wei, GUO Qiankun, CAO Wenhong, et al. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182: 10.
- [7] LANE L J, RENARD K G, FOSTER G R, et al. Development and application of modern soil erosion prediction technology - the USDA experience[J]. *Soil Research*, 1992, 30(6): 893.
- [8] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 143. LIU Baoyuan, XIE Yun, ZHANG Keli. Soil loss prediction model[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2001: 143.
- [9] RENARD K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington, US: Agriculture Handbook, 1997: 1.
- [10] 池金沼, 刘殿君, 于洋, 等. 黄河流域十大孔兑土地利用变化的土壤侵蚀效应 [J]. *泥沙研究*, 2023, 48(6): 16. CHI Jinming, LIU Dianjun, YU Yang, et al. Effects of land-use changes on soil erosion in Ten Tributaries of the Yellow River Basin[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(6): 16.
- [11] 张卓佩, 牛健植, 樊登星, 等. 黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 85. ZHANG Zhuopei, NIU Jianzhi, FAN Dengxing, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 85.
- [12] NIYONSENGA J D, MUGABOWINDEKWE M, MUPENZI C. Spatial analysis of soil erosion sensitivity using the revised universal soil loss equation model in Nyamasheke District, Western Province of Rwanda[J]. *Transactions in GIS*, 2021, 25(2): 735.
- [13] 刘琳, 刘雪华. 黄土高原北部多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性变化评价 [C]//2010 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 上海: 中国环境科学学会, 2010: 571. LIU Lin, LIU Xuehua. Evaluation of soil erosion sensitivity change in the sandy and coarse area in the northern part of the Loess Plateau[C]//2010 Chinese Society of Environmental Sciences Annual Conference Proceedings (Vol. 4). Shanghai: Chinese Society for Environmental Sciences, 2010: 571.
- [14] 乔治, 徐新良. 东北林草交错区土壤侵蚀敏感性评价及关键因子识别 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1349. QIAO Zhi, XU Xinliang. Assessment of soil erosion sensitivity and key factors identification in the wood-grass ecotone of Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1349.
- [15] ZHANG Jinxin, LI Hui, ZHANG Xiufang, et al.

- Sensitivity evaluation of soil erosion based on land use types: A case study of Minjiang River Basin[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 38(5): 5697.
- [16] PING Yaodong, TIAN Pei, LUO Li, et al. Soil erosion sensitivity and prediction for hilly areas of Hubei province, China, using combined RUSLE and LSTM models[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(2): 829.
- [17] 郝姗姗, 李梦华, 马永强, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀因子敏感性分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(2): 77.
- HAO Shanshan, LI Menghua, MA Yongqiang, et al. Significance analysis of soil erosion factors in loess hilly gully region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2): 77.
- [18] 刘颢, 张茂省, 冯立, 等. 榆林黄河中游粗泥沙区生态问题与生态格局构建 [J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 58.
- LIU Hao, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Ecological problems, systematically protection and restoration strategies of Yulin coarse sand area in the Middle Yellow River[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 58.
- [19] 李锋. 1998-2020 年黄河流域径流与降水演变规律研究 [J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(19): 91.
- LI Feng. Study on the evolution of runoff and precipitation in the Yellow River Basin from 1998 to 2020[J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(19): 91.
- [20] 李双双, 段生勇, 胡佳岚, 等. 黄土高原植被变化主导空间模态及其影响因素 [J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1768.
- LI Shuangshuang, DUAN Shengyong, HU Jialan, et al. Identifying the spatio-temporal pattern of vegetation change and influencing factors on the Loess Plateau between 2000 and 2022[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7): 1768.
- [21] 李素雅, 马红斌, 李红星, 等. 黄河中游多沙粗沙区基础边界数据集 [J]. *中国科学数据*, 2021, 6(3): 151.
- LI Suya, MA Hongbin, LI Hongxing, et al. The boundary dataset of high and coarse sediment yield in the middle reaches of the Yellow River[J]. *China Scientific Data*, 2021, 6(3): 151.
- [22] 李军, 曹明明, 邱海军, 等. 基于 GIS 的西安市土地生态环境敏感性评价研究 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(1): 121.
- LI Jun, CAO Mingming, QIU Haijun, et al. The assessment of GIS-based land eco-environmental sensitivity of Xi'an City[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(1): 121.
- [23] 徐剑春, 王博, 罗进选. 基于 GIS 的小流域尺度水土流失敏感性评价: 以通渭县牛谷河项目区为例 [J]. *中国水土保持*, 2021(1): 37.
- XU Jianchun, WANG Bo, LUO Jinxuan. Sensitivity evaluation of soil and water loss in small watersheds based on GIS[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(1): 37.
- [24] 王文静. 陕北黄土高原地区水土流失敏感性评价 [D]. 西安: 西北大学, 2016: 8.
- WANG Wenjing. Assessment of sensitivity of water and soil loss on the Loess Plateau in North Shaanxi Province[D]. Xi'an: Northwest University, 2016: 8.
- [25] 李钺, 李俊祥, 朱飞鸽, 等. 基于 RUSLE 的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1577.
- LI Cheng, LI Junxiang, ZHU Feige, et al. Sensitivity evaluation and key sensitive factors identification of soil erosion around Hangzhou Bay based on RUSLE[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1577.
- [26] 邓晓红, 宋玉琳, 李宗省, 等. 河西地区生态敏感性演变格局及分区治理 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(5): 232.
- DENG Xiaohong, SONG Yulin, LI Zongxing, et al. Evolution pattern of terrestrial ecological sensitivity in the Hexi region and its zoning governance[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(5): 232.
- [27] 郗欣. 黄土高原区土地退化敏感性时空变异特征及其驱动因素 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022: 21.
- QIE Xin. Spatial-temporal variation characteristics of land degradation sensitivity and its driving factors over Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022: 21.
- [28] 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.
- ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705.
- [29] SHARPLEY A N, WILLIAMS J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. II: User manual[R]. Washington, USA: US Department of Agriculture, 1990: 26.
- [30] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7.
- ZHANG Keli, PENG Wenying, YANG Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 7.

- [31] 汪邦稳. 安徽省土壤可蚀性  $K$  值及其分布特征 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(6): 132.  
WANG Bangwen. Soil erodibility  $K$  values and its distribution in Anhui province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6): 132.
- [32] LIU Baoyuan, NEARING M A, SHI P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759.
- [33] LIU Baoyuan, NEARING M A, RISSE L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835.
- [34] 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.  
CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, 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.
- [35] WANG Wenting, YIN Shuiqing, GAO Ge, et al. Increasing trends in rainfall erosivity in the Yellow River basin from 1971 to 2020[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127851.
- [36] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1687.  
ZHANG Keli, CAI Yongming, LIU Baoyuan, et al. Evaluation of soil erodibility on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1687.
- [37] 白欣, 贺炳彦, 高婷, 等. 基于 GEE 云平台的榆林市植被覆盖度时空变化研究 [J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(16): 70.  
BAI Xin, HE Bingyan, GAO Ting, et al. Research on the temporal and spatial changes of vegetation coverage in Yulin based on GEE cloud platform[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(16): 70.
- [38] 杨鹏辉, 田佳, 张楠, 等. 1990—2022 年黄河流域植被时空变化特征及未来趋势预测 [J]. *生态学报*, 2024, 44(19): 8542.  
YANG Penghui, TIAN Jia, ZHANG Nan, et al. Characteristics of spatio-temporal changes and future trends forecast of vegetation cover in the Yellow River Basin from 1990 to 2022[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19): 8542.
- [39] 周璐红, 张康. 2000—2020 年延安市植被覆盖时空变化及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(4): 356.  
ZHOU Luhong, ZHANG Kang. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its influencing factors in Yan'an city from 2000 to 2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 356.