

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.038.

吕伟涛, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 基于CSLE模型的黄河上游龙羊峡至积石峡段流域土壤侵蚀评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 11-23.

Lü Weitao, Hu Xiasong, Liu Changyi, et al. CSLE Mode-Based Assessment of the Soil Erosion Along the Longyangxia Gorge and Jishixia Gorge in the Upper Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 11-23.

## 基于CSLE模型的黄河上游龙羊峡至 积石峡段流域土壤侵蚀评价

吕伟涛<sup>1</sup>, 胡夏嵩<sup>1</sup>, 刘昌义<sup>1</sup>, 付江涛<sup>2</sup>, 邢光延<sup>3</sup>, 赵吉美<sup>3</sup>, 何伟鹏<sup>1</sup>, 杨馥铖<sup>1</sup>

(1.青海大学 地质工程系, 西宁 810016; 2.青海大学 农林科学院, 西宁 810016; 3.青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

**摘要:** [目的]研究黄河上游龙羊峡至积石峡段流域 2017—2021 年土壤侵蚀特征, 揭示区内植被在防治土壤侵蚀中的贡献, 进而为黄河上游流域开展植被水土保持与生态安全保护的合理实施提供科技支撑。[方法]以位于黄河上游的龙羊峡至积石峡段流域为研究区, 基于 CSLE 模型分别以空间插值法和地图代数法, 探讨了区内土壤侵蚀、各年份植被覆盖度空间分布, 以及植被覆盖度时空变化空间分布特征; 在此基础上, 分析了区内植被有效防治土壤侵蚀过程中的减蚀作用。[结果]区内 2017—2021 年黄河上游龙羊峡至积石峡段流域土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀作用为主, 5 个不同年份其平均土壤侵蚀模数分别为 21.329, 55.518, 23.394, 21.490, 21.650 t/(km<sup>2</sup>·a)。[结论]2017—2021 年区内发生中度和强度侵蚀区域主要集中在极低植被覆盖度区, 其中微度侵蚀区域的植被覆盖度普遍较高, 结果表明区内植被能有效减少土壤侵蚀现象的发生。

**关键词:** 黄河上游; 土壤侵蚀; 地图代数; 空间插值; 植被覆盖度; 时空变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0011-13

## CSLE Mode-Based Assessment of the Soil Erosion Along the Longyangxia Gorge and Jishixia Gorge in the Upper Yellow River

Lü Weitao<sup>1</sup>, Hu Xiasong<sup>1</sup>, Liu Changyi<sup>1</sup>, Fu Jiangtao<sup>2</sup>,

Xing Guangyan<sup>3</sup>, Zhao Jimei<sup>3</sup>, He Weipeng<sup>1</sup>, Yang Fucheng<sup>1</sup>

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016,

China; 2. Academy of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** [Objective] The aims are to study the soil erosion characteristics of Longyang Gorge to Jishi Gorge in the upper reaches of the Yellow River from 2017 to 2021, reveal the contribution of vegetation in soil erosion prevention and control, and provide scientific and technological support for the rational implementation of vegetation soil and water conservation and ecological security protection in the upper reaches of the Yellow River basin. [Methods] The section from Jishixia Gorge to Longyangxia Gorge of the Yellow River was chosen as the study area, and based on CSLE modes, methods of using spatial interception and map algebra were adapted to obtain soil erosion and vegetation coverage in this region and the spatial-temporary variation of the prementioned data. [Results] On these basis, the contribution of the vegetation to conserving soil was assessed, and the corresponding results showed that from 2017 to 2021, slight erosion and light erosion were the predominant erosion intensities, and the corresponding erosion moduli were 21.329, 55.518, 23.394,

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2022-12-15

资助项目: 国家自然科学基金(42041006); 青海省自然科学基金(2020-ZJ-906); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)

第一作者: 吕伟涛(1999—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: 1055541638@qq.com

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 博士, 教授, 主要从事地质工程与环境地质等领域教学和科研工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

21.490, 21.650 t/(km<sup>2</sup> · a), respectively. [Conclusion] Additionally moderate and heavy erosion generally occurs in regions with sparse vegetation coverage, and regions suffering a slight erosion are generally characterized with high coverage, which verifies the role vegetation in reducing soil erosion. The vegetation can effectively reduce the occurrence of soil erosion.

**Keywords:** upper region of the Yellow River; soil erosion; map algebra; spatial interception; vegetation coverage; spatial-temporary variation

黄河作为世界第五大河流,同时也是含沙量最大的河流,其产沙量占到全球河流系统总产沙量的 6%,水土流失是黄河流域最主要的生态问题之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着区域经济发展与人为活动增加,黄河流域生态环境发生了显著的变化,主要表现为水源涵养能力下降,河川径流变化加剧,土壤侵蚀严重,一定程度制约了流域地区可持续发展<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀还会引起黄河流域地区的土地资源破坏、加快草地退化和降低土壤肥力等一系列的生态和环境问题<sup>[3]</sup>。其中,位于黄河上游的龙羊峡至积石峡段流域地区,地处我国地貌单元第一阶梯青藏高原向第二阶梯黄土高原的过渡地带,受地形落差大、植被生长稀疏、土质疏松、降雨集中以及坡度陡峭等诸多因素影响,黄河沿岸、贵南地区中部、龙羊峡北岸等部分地区土壤侵蚀现象十分严重<sup>[4-6]</sup>。每遇强降雨,洪水挟带大量泥沙,不仅严重淤积黄河河段,冲毁当地道路,造成交通堵塞,而且严重制约周边地区经济社会发展,威胁当地居民群众的生产生活和生命财产安全<sup>[7]</sup>。

有关土壤侵蚀研究方面,土壤侵蚀模型已被广泛用于区域土壤侵蚀成因、过程机理及其定量评价等研究之中,20 世纪 30 年代以来,国内外学者陆续提出了各具特色的土壤侵蚀物理模型或经验模型<sup>[8]</sup>。Wischmeier 等<sup>[9]</sup>提出了用于计算土壤侵蚀模数的通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation),并作为用来计算美国范围内年平均土壤流失量的通用计算模型;在此之后的相关研究表明,该模型不适宜用于计算耕地、田埂区域的土壤侵蚀模数<sup>[10]</sup>,为此美国农业部于 1997 年在通用土壤流失模型(USLE)基础上进行了修订,建立并正式实施适用范围更广的修正模型,即 RUSLE 模型(revised universal soil loss equation)<sup>[11]</sup>。此外,刘宝元等<sup>[12]</sup>以 32 948 个调查单元的土壤侵蚀影响因子调查信息为基础,利用中国土壤流失方程 CSLE(Chinese soil loss equation)评价国内不同行政区域的土壤侵蚀强度,再采用统计学方法汇总统计国内不同行政区域水蚀强度分级面积,形成了国内 32 948 个调查单元的基础信息档案,从而为今后水力侵蚀动态评价打下了坚实基础。在上述基础上,国内外学者先后开展

了大量研究并得到较为丰富的研究成果。例如郝姗姗等<sup>[13]</sup>使用 BP 神经网络方法对黄土丘陵区土壤侵蚀因子进行敏感性分析,结果表明 BP 神经网络模型能有效预测土壤侵蚀影响因子的显著性。Eugeniusz 等<sup>[14]</sup>以波兰喀尔巴阡山脉为试验区,依据马铃薯、谷物和草地试验地的降水参数、土壤条件、植物生长阶段和农业措施等数据,并基于 RUSLE 模型评估喀尔巴阡山脉的土壤侵蚀动态,结果表明种植马铃薯试验地的年平均土壤侵蚀量为 25.67 t/(hm<sup>2</sup> · a),分别较谷地和草地的土壤侵蚀量高 95.4%,99.7%。Peng 等<sup>[15]</sup>以我国西北部祁连山国家公园(QLMNP)为研究区,采用 RUSLE 模型来评估 1982—2020 年该区域产生的土壤侵蚀率,并通过对比实际情景和降雨径流侵蚀因子 *R* 固定、覆盖和管理因子 *C* 固定、预防措施因子 *P* 固定、植被未覆盖和水土保持措施 4 种理想情景之间的差异,以及不同的 RUSLE 模型输入参数来检测土壤侵蚀的驱动机制,结果表明极端降水是土壤侵蚀的主要驱动因素。

此外,黄河流域土壤侵蚀研究方面,武翠翠等<sup>[16]</sup>以黄河流域兰州段为研究区,采用改进的加权土壤侵蚀(RUSLE)模型,运用地理信息系统(GIS)和遥感技术评价该区域土壤侵蚀敏感性,结果表明该区域土壤侵蚀极敏感区和重度敏感区占区域总面积的 42.73%,中度敏感区占 45.60%,轻度敏感区和不敏感区占 11.67%。杨洁等<sup>[17]</sup>以黄河流域为研究区,运用 InVEST 模型评估黄河流域 2000 年、2005 年、2010 年、2018 年土壤侵蚀量并分析时空变化特征,结果表明 18 a 间黄河流域土壤侵蚀总量共减少  $8.4 \times 10^7$  t,土壤侵蚀模数共减少 87.42 t/(km<sup>2</sup> · a)。

综合以上,有关土壤侵蚀方面的已有研究成果,更多的是从空间维度分析单一年份不同土地利用类型、坡度、措施种类等的土壤侵蚀强度特征,而采用多年时间维度分析植被覆盖度不同时空变化下的土壤侵蚀特征方面的研究相对较少。基于此,本研究基于 CSLE 模型分别以空间插值法和地图代数法,定量计算黄河上游龙羊峡至积石峡段流域 2017—2021 年各年产生的土壤侵蚀模数并分析其 5 a 间土壤侵蚀的

变化特征,同时分析不同土地利用类型、不同坡度、不同植被覆盖度变化趋势对土壤侵蚀的影响。本研究结果为合理分析龙羊峡至积石峡段流域土壤侵蚀状况和土壤侵蚀定量预报提供数据支撑,进而为黄河上游流域开展植被水土保持措施的合理实施与生态安全保护,提供理论依据和实际指导。

## 1 研究区概况

本研究选取位于黄河上游龙羊峡至积石峡段流域作为研究区,研究区位于青海省东部,该河段流域行政区域隶属青海省共和县部分区域、贵南、贵德、尖扎、化隆和循化县6个县范围,其地理坐标为 $100^{\circ}$ — $103^{\circ}30'E$ ,  $35^{\circ}40'$ — $36^{\circ}10'N$ ;研究区面积约为 $18\,000\text{ km}^2$ ,区内平均

海拔为 $3\,132\text{ m}$ ,研究区地理位置及其地貌侵蚀特征如图1所示。

研究区位于黄河上游峡谷段,黄河干流两侧河床比降大、落差集中、河道深窄、两岸陡峻、基岩裸露,形成了陡峻高耸的山岳与断陷盆地和深切峡谷相间的地形特点<sup>[18]</sup>;此外区内地表土壤疏松、气候干旱且蒸发量大,植被单一稀疏,每逢夏季遇暴雨等极端气象条件易形成滑坡、泥石流和土壤侵蚀等地质灾害。根据已有气象记录,区内在2017—2021年降雨主要集中在每年5—9月份,多年平均降雨量为 $634.2\text{ mm}$ ,年平均蒸发量为 $1\,054.17\text{ mm}$ 。此外,因区内地势较为陡峭,植被生长稀疏且植被覆盖度相对较低,并在长期雨水侵蚀下,地表形成规模不同的冲沟现象(图1)。

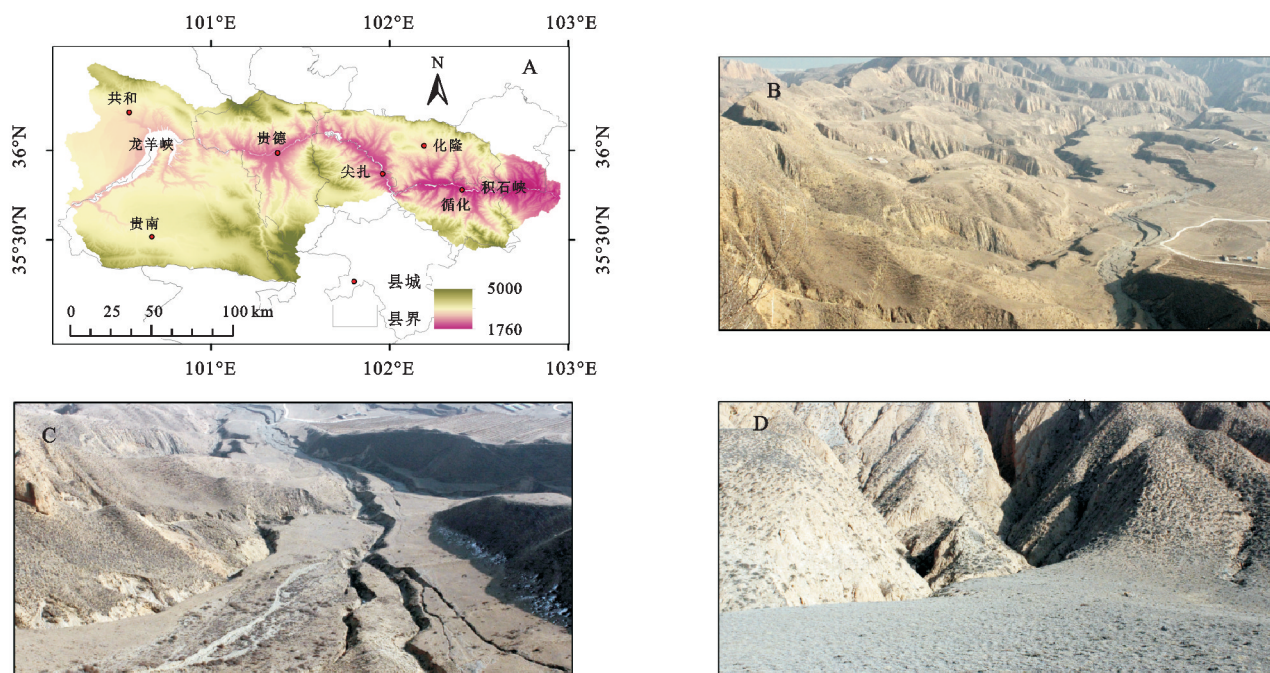


图1 研究区地理位置及其地貌侵蚀特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geographical location and geomorphic erosion characteristics of the study area

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

本研究所用数据主要包括以下部分:(1)降雨数据,来自于NOAA网站,利用ArcGIS软件采用克里金插值法对区内降雨数据进行插值,并生成分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的研究区年降雨量栅格图;(2)遥感影像数据,采用2017—2021年区内龙羊峡至积石峡段流域6—9月的Landsat 8 OLI遥感影像,来源于美国USGS网站,其分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ;(3)土地利用类型数据,来源于ZENODO网站,其分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ;(4)数字高程模型(DEM)数据,来源于地理空间数据云网站。

### 2.2 研究方法

研究区黄河上游龙羊峡至积石峡段流域其土壤侵蚀模数,采用我国土壤流失方程(CSLE)进行定量计算,其模型公式为<sup>[19]</sup>:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: $A$ 为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ,表示单位面积坡面年平均土壤流失量; $R$ 为降雨侵蚀力因子 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ; $K$ 为土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ; $L$ 为坡长因子,无量纲; $S$ 为坡度因子,无量纲; $B$ 为生物措施因子,无量纲; $E$ 为工程措施因子,无量纲; $T$ 为耕作措施因子,无量纲。

根据公式(1)计算要求,在计算土壤侵蚀模数 $A$ 时,若土地利用类型为耕地时,计算时在 $B$ 因子、 $E$



因子两者中,选取  $E$  因子与  $R, K, SL, T$  因子相乘;若土地利用类型为非耕地时,则选取  $B$  因子与  $R, K, SL, T$  因子相乘。研究区耕地主要以土坎水平梯田为主,当土地利用类型为耕地时  $T$  值取 0.084,土地利用类型为非耕地时其值取为 1<sup>[20]</sup>,这里为便于计算,本研究将  $B, E, T$  因子合成一栅格图层(BET 因子);同时,根据国内行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—96),将区内土壤侵蚀划分为:微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀、剧烈侵蚀 6 个等级(表 1)<sup>[21]</sup>。

表 1 土壤侵蚀强度分级结果

Table 1 Grading results of soil erosion intensity

侵蚀强度级别	侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
微度侵蚀	<5
轻度侵蚀	10~25
中度侵蚀	25~50
强度侵蚀	50~80
极强度侵蚀	80~150
剧烈侵蚀	>150

2.2.1 降雨侵蚀因子  $R$  计算 已有研究表明,降雨是引起土壤侵蚀的最主要因素之一,该因子主要反映降雨对土壤的侵蚀能力,一般采用降雨量、降雨强度等参数来进行估算。故本研究采用年降雨量估算模型计算  $R$  因子,其计算模型如下<sup>[22]</sup>:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.51 \lg(p_i^2/p) - 0.08188} \quad (2)$$

式中: $R$  为降雨侵蚀因子; $p_i$  为  $n$  年第  $i$  个月的月平均降水量(mm); $p$  为  $n$  年的年平均降雨量(mm)。

2.2.2 土壤可蚀性因子  $K$  计算 土壤侵蚀因子  $K$  是从土壤本身性质出发,反映了土壤抵抗侵蚀的能力大小,本研究  $K$  值采用 EPIC 方程进行计算,利用区内 HWSO 数据提取砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量,计算得出  $K$  值并使用 ArcGIS 对计算结果进行克里金插值,获得区内整个面上的  $K$  值。 $K$  因子的计算公式如下所示<sup>[23]</sup>:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.025 S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7S_{n1}}{S_{n1} + \exp(-5.51 + 22.9S_{n1})} \right] \quad (3)$$

$$S_{n1} = 1 - S_a/100 \quad (4)$$

式中: $S_a$  为砂粒(0.05~2 mm)百分含量(%); $S_i$  为粉粒(0.002~0.05 mm)百分含量(%); $C_i$  为黏粒(<0.002

mm)百分含量(%); $C$  为有机碳含量(%)。

2.2.3 坡度及坡长因子  $SL$  的估算 坡度因子与坡长因子反映了研究区坡度与坡长对土壤侵蚀的影响程度,本研究中所涉及的坡度因子  $S$  采用 Liu 等<sup>[24]</sup>提出的算法计算,其计算公式如下:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta \leq 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ < \theta < 10^\circ \\ 1.9 \sin \theta + 0.56 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\theta$  为 DEM 提取的坡度值。

本研究中的坡长因子  $L$  计算公式如下<sup>[25-26]</sup>:

$$\beta = \left( \frac{\sin \theta}{0.0896} \right) / [3 \times (\sin \theta) 0.8 + 0.56] \quad (6)$$

$$m = \beta / (\beta + 1) \quad (7)$$

$$\lambda = l \times \cos \theta \quad (8)$$

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (9)$$

式中: $L$  为坡长因子; $\theta$  与公式(5)相同; $\lambda$  为水平投影坡长; $l$  为地表沿流向的水流长度; $\beta$  为细沟侵蚀量与细沟侵蚀间侵蚀量的比值; $m$  为坡长因子指数。

2.2.4 生物措施因子  $B$  的估算 本研究有关区内的植被覆盖度采用归一化植被覆盖指数进行计算,归一化植被覆盖指数  $F_C$  计算公式为<sup>[27]</sup>:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (10)$$

$$F_C = \begin{cases} 1 & NDVI > NDVI_{veg} \\ \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} & NDVI_{soil} < NDVI < NDVI_{veg} \\ 0 & NDVI < NDVI_{soil} \end{cases} \quad (11)$$

式中:NDVI 为植被覆盖指数;NIR 为近红外波段;RED 为红光波段;NDVI<sub>soil</sub> 为 NDVI 值的最小值;NDVI<sub>veg</sub> 为 NDVI 的最大值; $F_C$  为归一化植被覆盖指数。

本研究结合区内龙羊峡至积石峡段流域土地利用类型数据,参阅周桢等<sup>[28]</sup>相关研究成果,并根据区内不同土地利用类型和不同的植被覆盖确定  $B$  因子的值,其结果见表 2。

2.2.5 耕作措施因子  $E$  的估算 本研究中有耕作因子  $E$  的赋值参阅游浩妍等<sup>[29]</sup>的相关研究成果。首先,根据不同土地利用类型,将区内分土地划分为耕地与非耕地两种类型,然后将耕地的坡度按照 $[0^\circ, 5^\circ], (5^\circ, 10^\circ], (10^\circ, 15^\circ], (15^\circ, 20^\circ], (20^\circ, 25^\circ], (25^\circ, 90^\circ]$ 依次划分为 6 等级;最后再根据区内不同土地类型与不同坡度确定因子  $T$  的值,见表 3。

2.2.6 植被覆盖时空变化计算 本研究采用一元线性回归分析方法,计算区内 2017—2021 年植被覆盖

度逐像元变化趋势斜率值,计算公式如下<sup>[30]</sup>:

$$Z = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times F_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n F_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (12)$$

式中: $Z$  为变化趋势斜率; $n$  为时间点数量; $i$  为时间; $F_i$  为各像元植被覆盖度统计量。采用  $F$  检验法检验区内 2017—2021 年植被覆盖度逐像元变化趋势斜率的显著性。本研究中其样本容量取值为 5,且选取显著性水平  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.05$ ,通过查表得, $F_{0.01}(1,3)=34.1$ , $F_{0.05}(1,3)=10.1$ 。由此,将区内植被覆盖度逐像元变化趋势斜率分为 5 个不同等级,即显著减少( $Z<0,F\geq 34.1$ )、轻微减少( $Z<0,10.1\leq F<34.1$ )、基本不变( $F<10.1$ )、轻微增加( $Z>0,10.1\leq F<34.1$ )、显著增加( $Z>0,F\geq 34.1$ )<sup>[25]</sup>。

3 结果与分析

3.1 各因子空间分布及其特征

3.1.1  $R$  因子的空间分布及特征 区内 2017—2021 年降雨侵蚀因子  $R$  空间分布如图 2 所示,由该图可知,区内 2018 年降雨侵蚀因子显著大于其他年份,且 2018 年区内  $R$  因子的平均值为  $1\,799.64\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。进一步分析可知,区内 2017—2018 年降雨侵蚀因子  $R$  呈增加的变化趋势,其增长幅度

为 38.19%;2018—2021 年降雨侵蚀因子  $R$  则表现出呈降低的变化趋势,其减少幅度为 34.57%。此外,区内流域中下游地区所具有的降雨侵蚀因子相对较高,而流域上游地区其降雨侵蚀因子则相对较低,且整体表现出呈东高西低的空间分布规律。

表 2 研究区生物措施因子  $B$  赋值标准

Table 2 Evaluation criteria of biological measures factor  $B$  in the study area

土地利用类型	植被覆盖度/%	生物措施因子 $B$
林地	0~20	0.100
	21~40	0.080
	41~60	0.060
	61~80	0.020
	81~100	0.004
建设用地	—	0.900
水体	—	1.000
	0~20	0.450
	21~40	0.240
	41~60	0.150
	61~80	0.090
耕地	81~100	0.043
	—	0.230

注:表中“—”指当土地利用类型为建设用地、水体、耕地时不考虑植被覆盖度(据周桢等<sup>[28]</sup>)。

表 3 研究区措施因子  $E$  赋值

Table 3 Assignment table of measure factor  $E$  in the study area

坡度范围/(°)	[0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]	(25,90]
耕作措施因子	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

3.1.2  $K$  因子的空间分布及特征 由图 3 可知,区内流域中部地区的土壤可蚀性  $K$  因子较低,其值在 0.01~0.025。而流域东部和西部区域地区的土壤可蚀性  $K$  因子相对较高,其值为 0.03~0.045。其空间分布特征主要表现出呈现“东西两边高,中间部位低”的分布规律。

3.1.3  $SL$  因子的空间分布及特征 如图 4 所示,流域中下游地区主要分布以高山地貌为主,其地势较为陡峭,流域上游地区地势相对较为平缓。流域内中下游地区其坡度相对较大,而上游地区其坡度较小。故区内坡度因子  $S$  大体上反映出流域中下游地区其坡度因子相对较大,流域上游地区坡度因子则较小。此外,区内  $L$  坡长因子介于 1.00~3.56;进一步分析可知,在空间分布上,流域内上游地区其坡长因子  $L$  值相对较小,而中下游地区其坡长因子  $L$  值相对较大。产生该种变化规律的主要原因在于流域上游地区其

地势相对较平缓且水平投影坡长较小,故该区域的  $L$  也较小;而中下游地区水平投影坡长较大,故该区域的  $L$  亦表现出较大的特征。

3.1.4  $BET$  因子的空间分布及特征 如图 5 所示,2017—2021 年区内  $BET$  因子空间分布上呈现出“南北两边小,中间部位大”的分布规律,即表现在区内流域中部黄河沿岸地区与贵南地区的  $BET$  因子值相对较大,其值为 0.24~0.90,流域南部区域与流域北部区域  $BET$  因子值相对较小,其值为 0.004~0.15。此外,通过进一步对比区内 5 a 间各年的  $BET$  因子值可知,黄河沿岸与流域南部区域内的  $BET$  因子值受 2018 年强降雨影响由原来的 0.24 增加至 0.45,2018—2021 年  $BET$  因子值则由 0.45 减少至 0.24。产生这种变化的主要原因在于,区内黄河沿岸与流域南部区域植被覆盖度相对较低,且 2017—2018 年黄河沿岸与流域南部区域的植被覆盖度减少 0.2,其减少幅度为 40%。

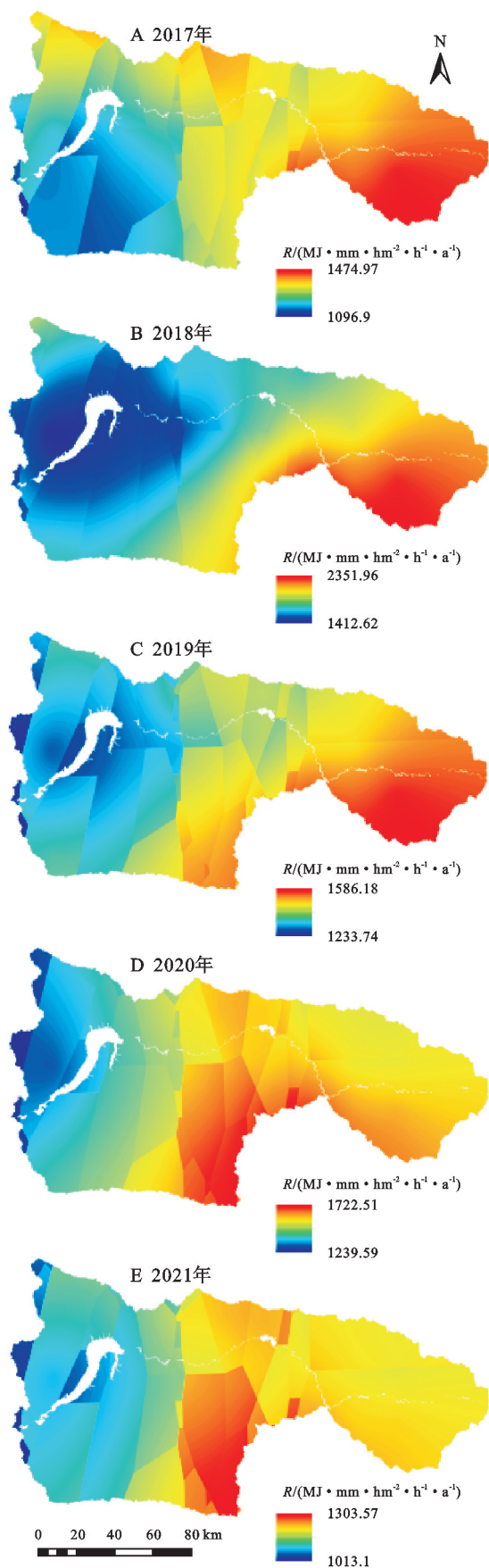


图 2 研究区 2017—2021 年降雨侵蚀  $R$  因子空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of  $R$  factor of rainfall erosion in the study area during 2017—2021

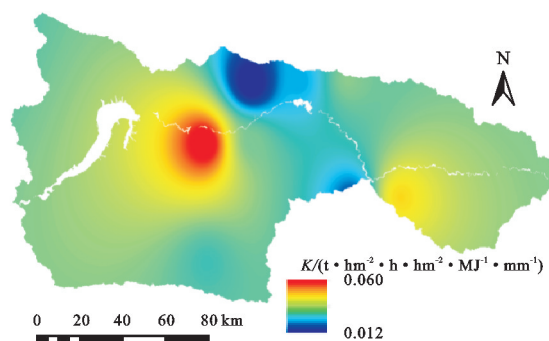


图 3 研究区  $K$  因子空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of  $K$  factor in the study area

### 3.2 土壤侵蚀模数及其特征

由图 6 可知,区内土壤侵蚀主要以微度侵蚀与轻度侵蚀为主,占总面积的 80%,其他类型面积之和仅占总面积的不足 20%。通过计算得到区内 2017—2021 年其年平均土壤侵蚀模数分别为 21.329, 55.518, 23.394, 21.890, 21.650  $t/(hm^2 \cdot a)$ ;进一步分析得到,2017—2021 年区内土壤侵蚀模数的整体每年增加速率为 0.064  $t/(hm^2 \cdot a)$ ,由此可知,2017—2021 年区内土壤侵蚀处于轻微增加,其土壤侵蚀变化主要分为 2 个阶段,即表现在 2017—2018 年为土壤侵蚀加重阶段,年平均土壤侵蚀模数增幅为 160.293%;2018—2021 年则为土壤侵蚀减轻阶段,其年平均土壤侵蚀模数降低幅度为 61.003%。通过进一步对比分析图 2 所示区内 2017—2021 年降雨侵蚀  $R$  因子空间分布特征结果可知,区内土壤侵蚀波动变化主要与降雨量的变化有关,表现在当区内降雨量出现波动时,例如 2017—2018 年区内降雨量增大,则土壤侵蚀亦随之增大,2018—2021 年区内降雨量减少,表现出区内土壤侵蚀作用也随之减少。

此外,通过对比区内 2017—2021 年不同土壤侵蚀等级的面积占比结果可知,2017—2018 年发生的微度侵蚀面积逐年减少,即由 5 279.36  $km^2$  下降至 484.62  $km^2$ ,其中 2018—2021 年则由 484.62  $km^2$  上升至 5 646.45  $km^2$ 。由表 4 进一步分析表明,区内 2017—2018 年极强度侵蚀、剧烈侵蚀面积占比呈逐年增加的变化趋势,极强度侵蚀、剧烈侵蚀面积占比分别由 2.81% 增加至 9.96%, 1.39% 增加至 6.31%,其增幅分别为 254.45%, 353.96%;其中,2018—2021 年极强度侵蚀、剧烈侵蚀面积占比则分别由 9.96% 减少至 3.01%, 6.31% 降低至 1.53%,其增幅与降幅幅度分别为 69.78%, 75.75%。

另外,结合区内植被分布特征,通过对比区内 2017—2018 年 5 种不同 NDVI 等级区域其土壤侵蚀等级的变化特征可知,2017—2018 年随着区域内降雨量增加,极高覆盖度区域内 29.12% 区域其土壤侵



蚀等级呈增加趋势,其中 933.71 km<sup>2</sup> 区域的土壤侵蚀由微度侵蚀增强为轻度侵蚀,占总面积的 20.35%。而极低覆盖度区域内有 31.04% 区域的土壤侵蚀等级表现为增加状态,其中微度侵蚀增强为轻度侵蚀的面积仅有 24.56 km<sup>2</sup>,占总面积的 1.42%;与此同时,当区内降雨量增加时,植被覆盖度愈低其区域内的土壤侵蚀等级愈呈易于提高,表现出植被覆盖度高的区域能一定程度上减少土壤侵蚀等级的提升。综上所述,2017—2021 年区内土壤侵蚀现象呈现先增后减的变化趋势,且当降雨量增加时,区内植物能一定程度起到有效减少土壤侵蚀的作用。

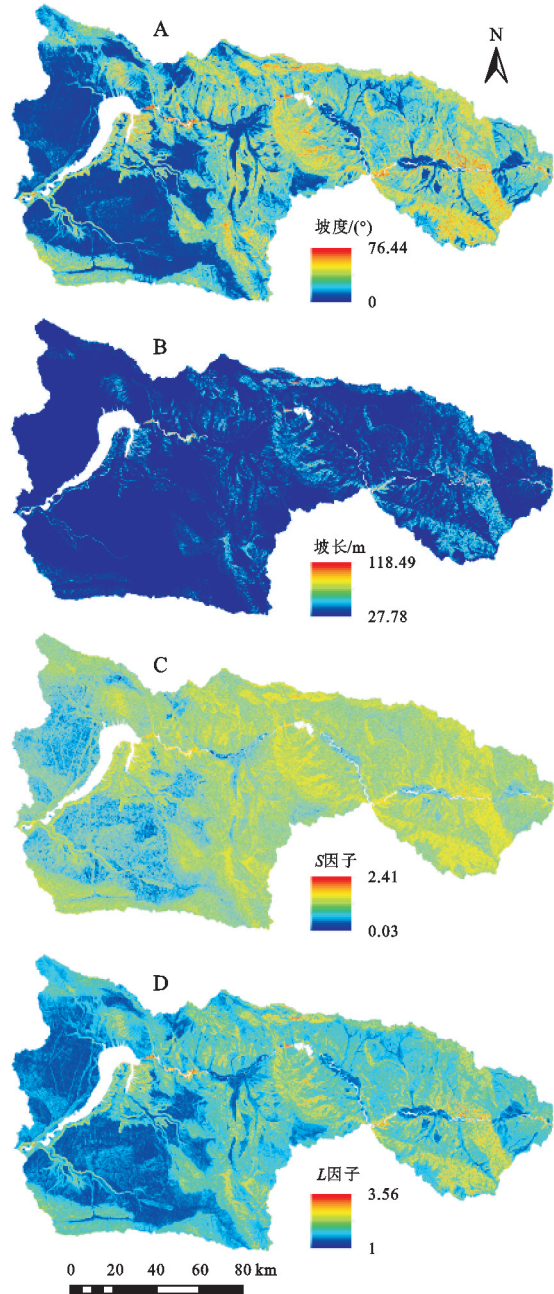


图 4 研究区坡度、坡长、S 因子、L 因子空间分布规律及特征  
Fig. 4 Spatial distribution rules and characteristics of slope, slope length, S factor and L factor in the study area

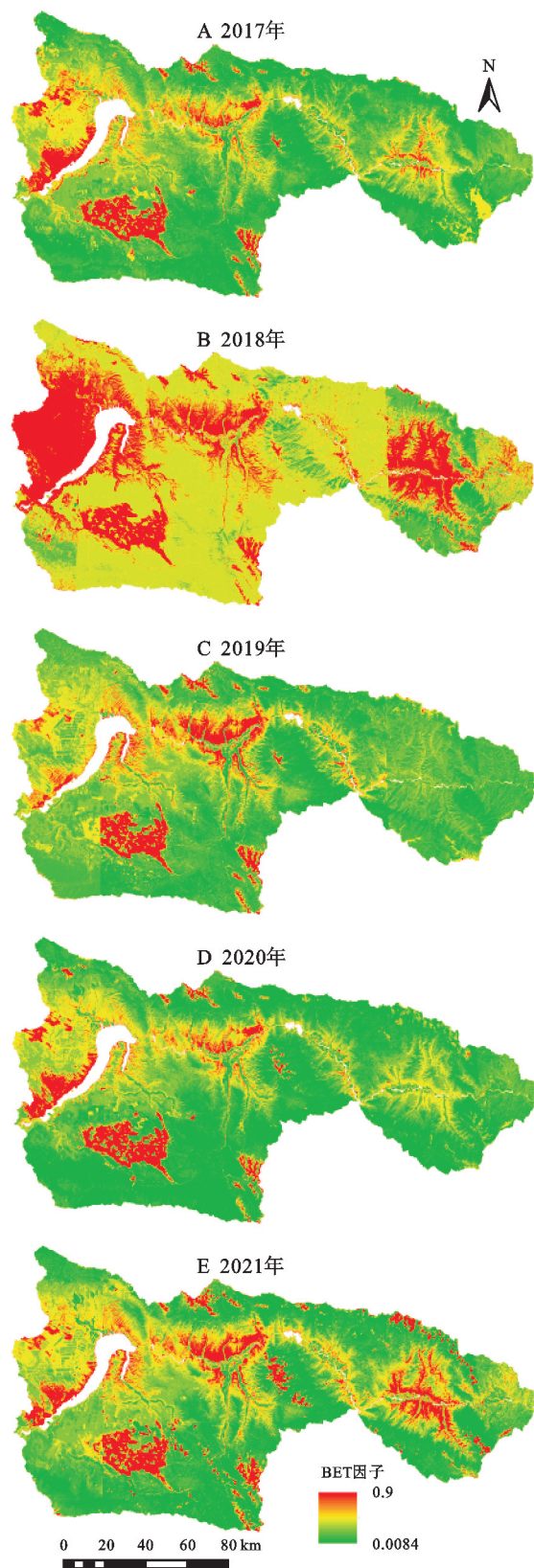


图 5 2017—2021 年研究区 BET 因子空间分布规律及其特征  
Fig. 5 Spatial distribution and characteristics of BET factor in the study area from 2017 to 2021

3.3 不同土地利用类型对土壤侵蚀的影响

区内 2017—2021 年各年不同土地利用类型下土壤侵蚀等级面积占比结果见表 5。区内 5 a 间耕地、

林地(本文中的林地泛指的是乔木林地)、灌木与裸地分布面积均表现出呈增加的变化趋势;其中,2017年间区内耕地、林地、灌木与裸地面积与2021年间区内耕地、林地、灌木与裸地面积相比较其增幅分别为3.90%,1.70%,2.04%,0.68%。此外,2017—2021年间区内草地与冰川面积则呈减少的变化趋势,其减少幅度分别为3.23%,83.33%,其中冰川面积由原来11.07 km<sup>2</sup>减少至0.61 km<sup>2</sup>;与此同时,受气候变暖与冰川面积减少的共同影响,2017—2021年间区内水域分布面积呈现增加的变化趋势,表现在水域面积占比由2.31%增加至2.59%。

相类似地,通过进一步对比分析2017—2021年间区内不同土地利用类型下土壤侵蚀特征。由表5可知,区内耕地、林地、灌木、草地和裸地中,其中林地其微度侵蚀面积占比最大为40%~50%,微度侵蚀面积占比排序由大至小依次为林地、耕地、灌木、草地、裸地。进一步分析还可知,区内耕地、林地、灌木、草地和裸地中,其裸地区域内剧烈侵蚀面积占比最大为3%~8%,轻度侵蚀面积占比由大至小依次为裸地、草地、灌木、耕地、林地。

由图7可知,通过分析区内裸地、草地、耕地、灌木、林地等区域中度侵蚀面积占比可知,中度侵蚀主要发生在裸地、草地与耕地区域,其中2017—2021年裸地区域中度侵蚀面积占比分别为29.48%,33.02%,27.58%,31.26%,26.03%;进一步分析得到,2017—2021年裸地强度侵蚀面积占比最大,其值分别为10.81%,15.85%,10.19%,12.76%,9.33%;另外,区内2021年耕地、林地、灌木、草地和裸地区域剧烈侵蚀面积占比由小至大依次为林地、灌木、耕地、草地、裸地,其面积占比分别为0.62%,0.80%,0.81%,1.51%,3.05%。通过上述对比分析,区内耕地、林地、灌木、草地和裸地5种土地利用类型区域的各年平均侵蚀模数,表现出林地区域平均侵蚀模数低于灌木区域,耕地区域平均侵蚀模数低于灌木区域,灌木区域平均侵蚀模数低于草地区域,以及草地区域的平均侵蚀模数低于裸地区域的变化特征。其中冰川与裸地区域的年平均土壤侵蚀模数最大,其主要原因在于冰川和裸地区域NDVI值相对较低,因此该区域的B因子相对较大,且该区域的土壤抗侵蚀能力较其他土地利用类型区域相对较低,且其K因子较大。因此,区内冰川与裸地区域的年平均土壤侵蚀模数,较其他土地利用类型区域相比较则表现出相对较大的特征。

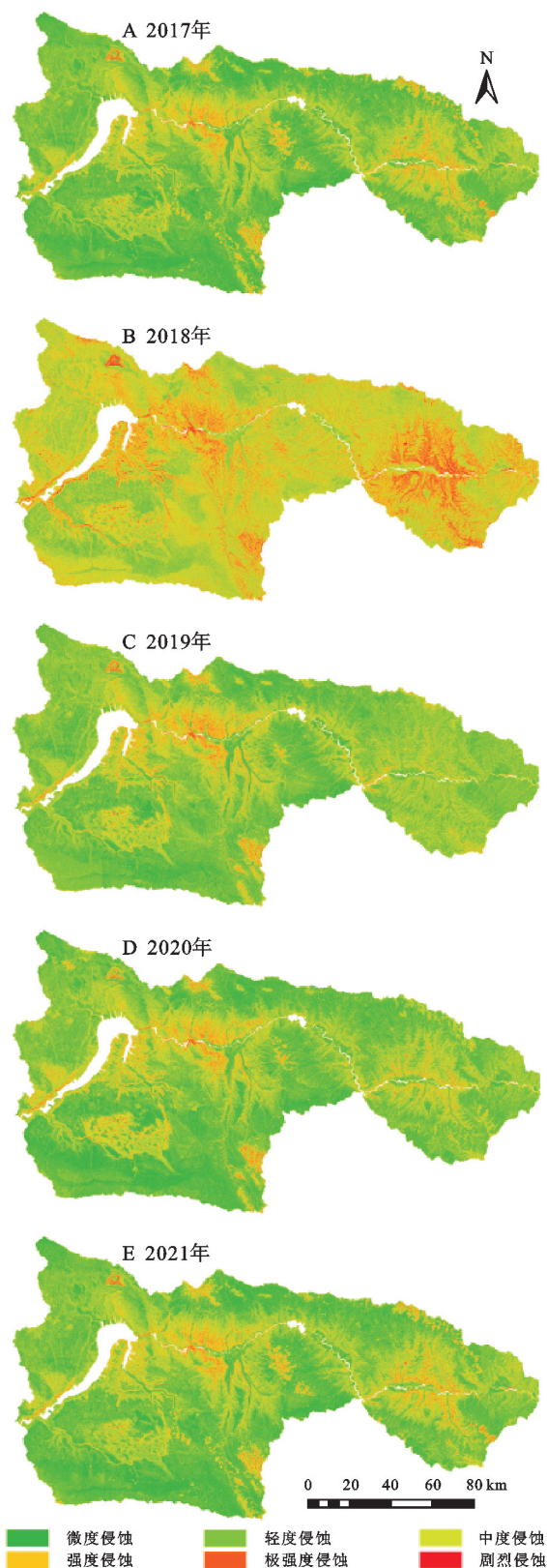


图6 研究区2017—2021年5种不同土壤侵蚀等级分布规律及其特征

Fig. 6 Distribution and characteristics of five different soil erosion levels in the study area during 2017–2021

### 3.4 不同坡度的土壤侵蚀分布规律及其特征

由图8所示,区内当坡度为 $[0^{\circ}, 5^{\circ}]$ 时,区域内强



度、极强度和剧烈侵蚀的面积占比只占总面积的 2.5%~8.5%;同时,通过对比不同坡度区域内的微度侵蚀面积占比可知,随着坡度增加区内微度侵蚀面积占比则呈现下降趋势,其降低幅度为 70%~90%。进一步分析得到 2017 年间区内的强度、极强度,剧烈侵蚀面积占比随坡度增加分别由 1.31%增加至 7.75%,0.70%增加至 4.97%,0.29%增加至 1.44%,2018 年间区内的强度、极强度,剧烈侵蚀面积占比随坡度增加分别由 4.39%增加至 21.45%,2.75%增加至 17.24%,1.40%增加至 9.18%,2019 年间区内的强度、极强度、剧烈侵蚀面积占比随着坡度的增加由 1.76%增加至 7.87%,0.81%增加至 5.24%,0.32%增加至 1.69%,2020 年间区内的强度、极强度、剧烈侵蚀面积占比随着坡度的增加由 1.44%增加至 7.79%,0.78%增加至 4.99%,0.33%增加至 1.66%,2021 年间区内的强度、极强度、剧烈侵蚀面积占比随着坡度

的增加由 1.21%增加至 8.09%,0.68%增加至 5.56%,0.28%增加至 1.73%。综上所述,区内坡度愈大,其发生强度、极强度、剧烈侵蚀概率亦愈大;反之,坡度较小地段发生中度、强度、极强度土壤侵蚀概率则相应愈小。

表 4 研究区 2017—2021 年 5 种不同土壤侵蚀等级面积占比模拟结果

Table 4 Simulation results of area proportions of five different soil erosion classes in the study area during 2017—2021

%					
土壤侵蚀等级	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
微度	27.62	2.54	22.20	29.26	29.54
轻度	51.43	40.46	54.58	49.37	49.13
中度	12.38	27.44	13.65	12.35	12.35
强度	4.36	13.29	4.80	4.53	4.44
极强度	2.81	9.96	3.15	2.95	3.01
剧烈	1.39	6.31	1.62	1.54	1.53

表 5 研究区 2017—2021 年 7 种不同土地利用类型面积占比及其区内平均侵蚀模数计算结果

Table 5 Calculation results of area proportion of seven different land use types and average erosion modulus in the study area during 2017—2021

年份	土地利用类型	面积占比/%	平均侵蚀模数/(t·hm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	年份	土地利用类型	面积占比/%	平均侵蚀模数/(t·hm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
2017 年	耕地	5.64	15.23	2020 年	耕地	5.89	13.36
	林地	2.94	13.06		林地	3.00	12.75
	灌木	1.47	16.35		灌木	1.50	17.22
	草地	83.96	20.38		草地	81.21	20.71
	冰川	0.06	62.90		冰川	0.01	51.55
	裸地	5.88	45.08		裸地	5.93	51.55
2018 年	耕地	5.65	46.69	2021 年	耕地	5.86	13.54
	林地	3.01	46.14		林地	2.99	11.37
	灌木	1.45	48.17		灌木	1.50	17.18
	草地	83.81	56.04		草地	81.25	21.36
	冰川	0.02	88.03		冰川	0.01	39.24
	裸地	6.02	61.93		裸地	5.92	39.24
2019 年	耕地	5.68	15.17				
	林地	2.97	11.68				
	灌木	1.44	16.66				
	草地	81.55	22.98				
	冰川	0.01	43.92				
	裸地	5.90	43.92				

注:林地泛指的是乔木林地。

此外,由于坡度(5°,10°)区域的植被覆盖度普遍较低,加之受 2018 年强降雨的影响,区内部分植被覆盖度较低区域其土壤侵蚀由微度侵蚀上升至中度侵蚀、强度侵蚀和极强度侵蚀,其结果使得该年(5°,10°)坡度区域内微度侵蚀面积占比相对较低,而强度侵蚀、极强度侵

蚀和剧烈侵蚀的面积占比相对较大。强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀区域大多分布在坡度大于 20°的区域内。由以上分析可知,坡度是影响区内土壤侵蚀的主要因素之一,坡度较大区域内其土壤侵蚀现象相对严重,而坡度较小区域内其土壤侵蚀作用相对轻微。

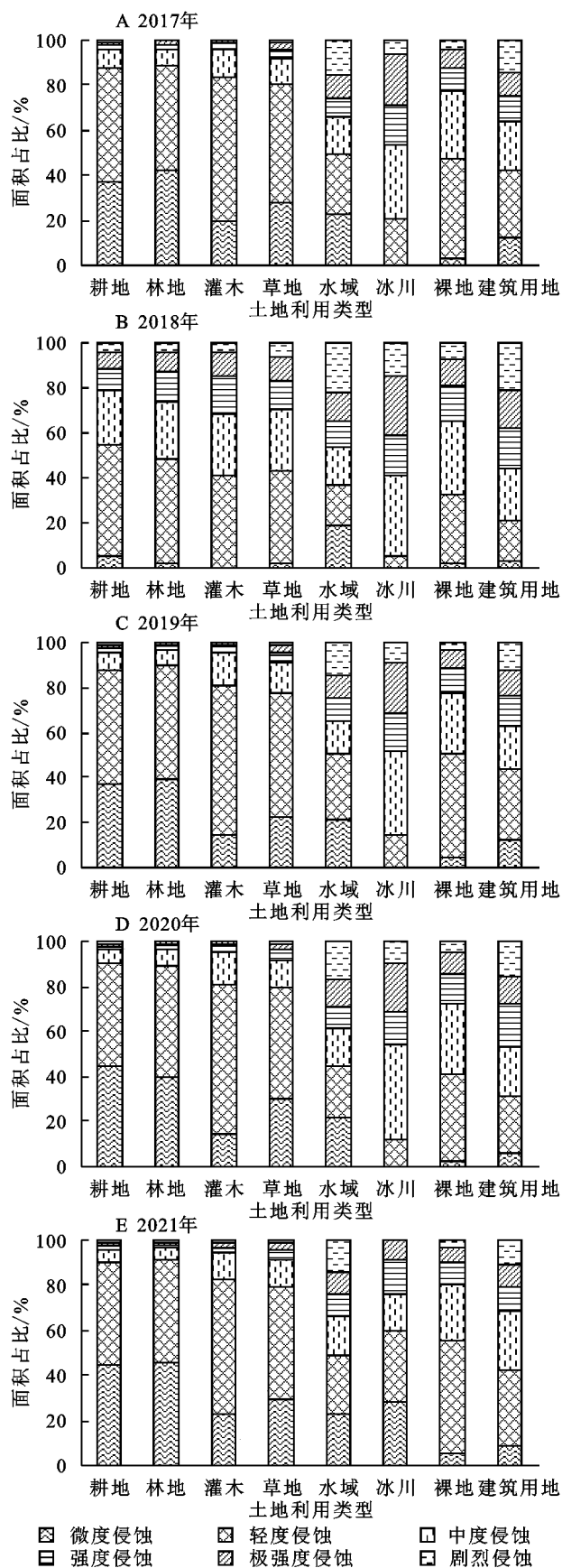


图7 研究区2017—2021年8种不同土地利用类型的土壤侵蚀分布规律及其特征

Fig. 7 Soil erosion distribution and characteristics of eight different land use types in the study area from 2017 to 2021

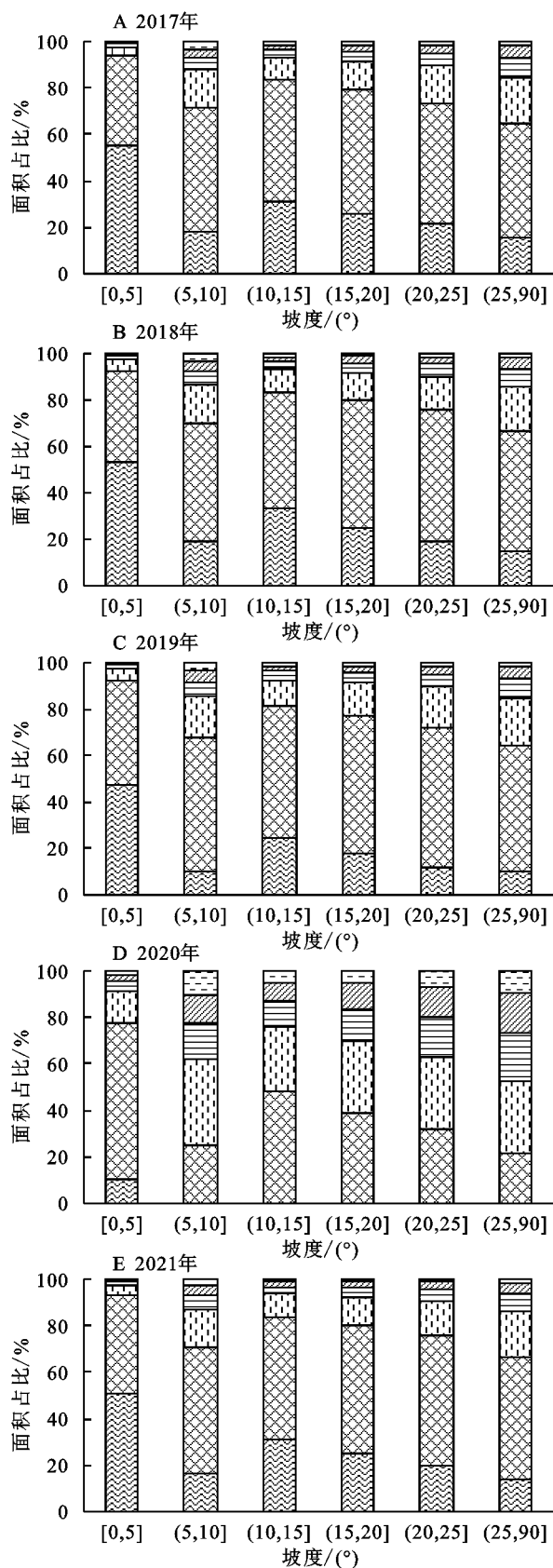


图8 研究区2017—2021年6种不同坡度的土壤侵蚀分布规律及其特征

Fig. 8 Soil erosion distribution and characteristics of six different slopes in the study area during 2017–2021



3.5 不同 NDVI 时序变化对土壤侵蚀的影响

由图 9 可知,2017—2021 年黄河上游龙羊峡至积石峡段流域植被轻微减少区域其面积约为 302.77 km<sup>2</sup>,占总面积的 1.58%,轻微增加区域面积为 1 862.991 km<sup>2</sup>,占总面积的 9.71%,其他区域的植被覆盖度基本不变。其中,其轻微减少区域主要分布在黄河沿岸和区内中部区域,该区域植被覆盖度较低,主要以荒地与草地为主;轻微增加区域则主要分布在区内南部和北部地区,该区域内的植被覆盖度相对较高。此外,由图 9 还可知,该区内大部分区域植被覆盖度均处在较稳定状态,且 2017—2021 年区内 88.72%区域其植被覆盖度基本未发生变化。

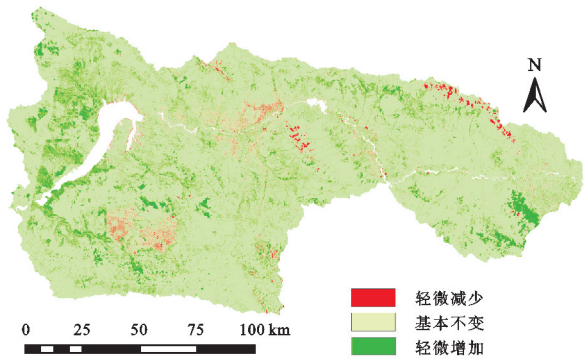


图 9 研究区 2017—2021 年 NDVI 时空变化趋势分布规律及其特征

Fig. 9 NDVI spatial and temporal trend distribution and its characteristics from 2017 to 2021 in the study area

采用  $F$  检验法对区内 2017—2021 年植被覆盖度逐像元变化趋势斜率值  $Z$  进行显著性检验时,因区内植被覆盖度逐像元变化趋势斜率值  $Z$  的  $F$  值均小于 34.1,2017—2021 年区内植被覆盖度时空变化趋势未表现出显著减少与显著增加区域,故将植被覆盖度轻微减少和轻微增加区域单独提取出来,与区内

2017—2021 年各年的土壤侵蚀栅格数据进行叠加分析,分析植被覆盖度轻微减少和轻微增加区域的土壤侵蚀分布特征。

如图 10 所示,当区域内植被处于轻微减少的时空变化趋势时,区域内微度侵蚀面积占比表现出呈减少的变化趋势,即由原先的 14.68%减少至 2.52%,减少幅度为 82.83%;相应地,区内 2017—2021 年,植被轻微减少区域内中度侵蚀面积占比呈现增加的变化趋势,表现为由 21.49%增加至 28.83%。此外,区内在 2017—2021 年,植被轻微减少区域极强度侵蚀与剧烈侵蚀面积占比均呈现增加的变化趋势,其增幅分别为 73.60,77.15%。综上所述,当区域内植被呈现轻微减少的变化趋势时,表现为区域内土壤侵蚀则会产生进一步加重的趋势。

如图 10 所示,植被轻微增加区域内的微度侵蚀面积呈增加的变化趋势,表现为微度侵蚀面积占比由 11.34%增加至 37.07%,其增幅为 226.89%;轻微增加区域内中度侵蚀面积占比呈减少的变化趋势,即中度侵蚀面积占比由 16.87%减少至 9.45%,其减少幅度为 43.98%。进一步分析表明,NDVI 轻微增加区域内极强度侵蚀与剧烈侵蚀面积占比之间呈先增加后减少的变化趋势,表现在 2017—2018 年极强度侵蚀面积占比由 4.7%增加至 10.25%、剧烈侵蚀面积由 2.38%增加至 6.91%;同时,2018—2021 年极强度侵蚀面积占比则由 10.25%减少至 1.96%、剧烈侵蚀面积由 6.91%减少至 1.05%。通过对比分析区内 2017—2021 年各年间发生的微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀等面积表明,当区域内植被呈轻微增加的变化趋势时,2017—2021 年其区域内的微度侵蚀面积表现为一定程度增加,轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀等的面积则表现为一定程度减少的特征。

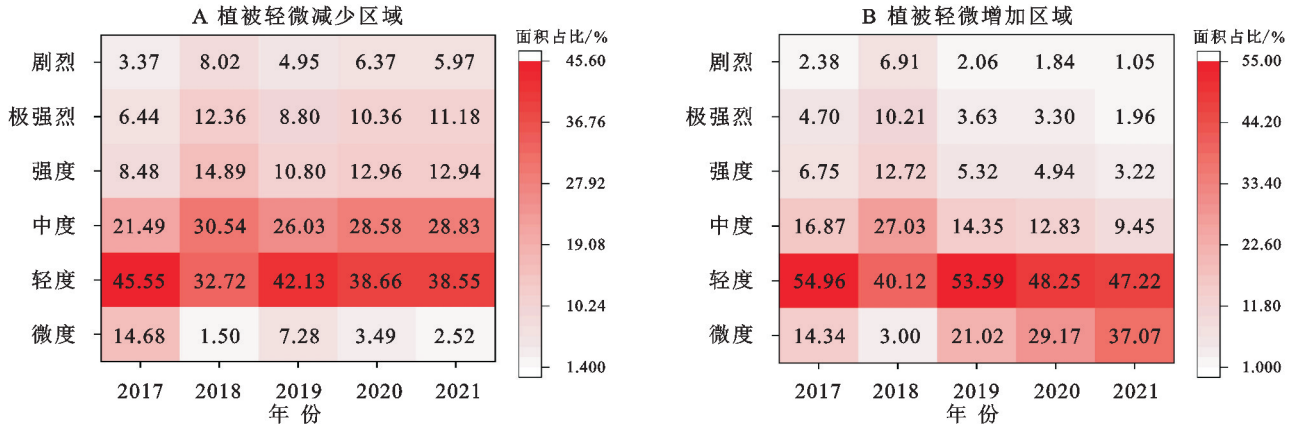


图 10 2017—2021 年植被轻微减少区域、植被轻微增加区域土壤侵蚀分布规律

Fig. 10 Distribution of soil erosion in areas with slight vegetation reduction and slight vegetation increase from 2017 to 2021

4 结论

(1) 研究区土壤侵蚀主要以微度侵蚀和轻度侵

蚀为主,二者占区内总面积的 80%;区内年平均土壤侵蚀模数在 2017—2018 年表现出呈增加趋势,2018—2021 年则呈减少的变化趋势。

(2) 区内耕地、林地、灌木、草地和裸地 5 种土地利用类型区域,其平均侵蚀模数由小到大依次为林地、耕地、灌木、草地、裸地,即表现为裸地和草地区域平均侵蚀模数相对较大。

(3) 区内坡度愈大区域发生中度、强度、极强度土壤侵蚀概率愈大;同时,植被覆盖度愈低的区域土壤侵蚀现象则愈严重,且在降雨量增大时植被覆盖度低区域土壤侵蚀会由微度侵蚀上升至轻度、中度和强度侵蚀,而高植被覆盖度区域土壤侵蚀程度表现出受降雨影响相对较小的特征。

(4) 区内 5 a 间植被覆盖度处于在较为稳定状态,表现在区内 88.72% 区域其 NDVI 值基本不变,1.58% 区域 NDVI 值呈轻微减少,9.70% 区域 NDVI 值呈轻微增加;当区内植被处于逐渐退化状态时,其区域内土壤侵蚀则表现为随之加重,同时当植被处于逐渐恢复的状态时,其区域内土壤侵蚀则表现为随之减弱的特征。

#### 参考文献:

- [1] 岳东霞,朱敏霞,杨超,等.基于 GeoWEPP 模型的桥子沟流域土壤侵蚀对比研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2020,56(1):96-105.  
Yue D X, Zhu M X, Yang C, et al. Comparison of soil erosion effects on the Qiaozigou Watershed based on the GeoWEPP model[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2020,56(1):96-105.
- [2] 邓伟,程根伟,文安邦.中国山地科学发展构想[J].中国科学院院刊,2008,23(2):156-161.  
Deng W, Cheng G W, Wen A B. The conception of mountain science development in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008,23(2):156-161.
- [3] Xia L, Bi R T, Song X Y, et al. Dynamic changes in soil erosion risk and its driving mechanism: A case study in the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Soil Science, 2021,72(3):1312-1331.
- [4] 李小林,马建青,胡贵寿.黄河龙羊峡—刘家峡河段特大型滑坡成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):28-32.  
Li X L, Ma J Q, Hu G S. Genetic analysis on huge landslides along the section from Longyang Gorge to Liujia Gorge of the Yellow River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007,18(1):28-32.
- [5] Guo X H, Sun Z, Lai Z P, et al. Optical dating of landslide-dammed lake deposits in the upper Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Quaternary International, 2016,392:233-238.
- [6] Qian H E, Dai N, Chen N. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2020,12(5):865-886.
- [7] 郭小花.龙羊峡—刘家峡河段巨型滑坡堵河事件与黄河演化之间的关系[D].西安:长安大学,2017.  
Guo X H, Relationship Between Landslide-Dammed Lakes with the Evolution of Upper Stream of the Yellow River from Longyang Gorge to Liujia Gorge on North-east Margin of Tibet Plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [8] 谢红霞,郭丽英.经验水蚀预报模型的国内外研究进展[J].中国农业资源与区划,2012,33(2):1-8.  
Xie H X, Guo L Y. A review on the development of empirical prediction models of water erosion [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2012,33(2):1-8.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning[M]. Washington D C: USDA Agriculture Handbook, 1978.
- [10] Qin W, Guo Q K, Cao W H, et al. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed[J]. Soil & Tillage Research, 2018,182:10-24.
- [11] Kumar M, Sahu A P, Sahoo N, et al. Global-scale application of the RUSLE model: A comprehensive review[J]. Hydrological Sciences Journal, 2022,67(5): 806-830.
- [12] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.  
Liu B Y, Guo S Y, Li Z G, et al. Sample survey of hydraulic erosion in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10):26-34.
- [13] 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):77-86.  
Hao S S, Li M H, Ma Y Q, et al. Significance analysis of soil erosion factors in loess hilly gully region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(2):77-86.
- [14] Eugeniusz G, Małgorzata K, Piotr D. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies [J]. CATENA, 2021,207:105682.
- [15] Peng Q, Wang R, Jiang Y, et al. Soil erosion in Qilian Mountain National Park: Dynamics and driving mechanisms [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,42:101144.
- [16] 武翠翠,王世杰.黄河流域兰州段土壤侵蚀敏感性评价[J].科学技术与工程,2021,21(29):12390-12397.



- Wu C C, Wang S J. Sensitivity evaluation of soil erosion in Lanzhou section of the Yellow River Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12390-12397.
- [17] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡, 等. 基于 InVEST 模型的黄河流域土壤侵蚀评估及其时空变化[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(5): 650-658.
- Yang J, Xie B P, Zhang D G. Soil erosion and its temporal-spatial variation in the Yellow River Basin based on the InVEST model[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2021, 57(5): 650-658.
- [18] 赵瑞欣, 周保, 李滨. 黄河上游龙羊峡至积石峡段巨型滑坡 OSL 测年[J]. *地质通报*, 2013, 32(12): 1943-1951.
- Zhao R X, Zhou B, Li B. The application of optical stimulate luminescence dating to the study of clustered landslides activity[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 1943-1951.
- [19] 陈羽璇, 杨勤科, 刘宝元, 等. 基于 CSLE 模型的珠江流域土壤侵蚀强度评价[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19(6): 86-93.
- Chen Y X, Yang Q K, Liu B Y, et al. Assessment of soil erosion intensity in Pearl River Basin based on CSLE model[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(6): 86-93.
- [20] 沈子雅, 杨志, 李建国, 等. 基于 CSLE 模型的宁夏黄土地区水土保持措施因子研究[J]. *中国水土保持*, 2021(7): 53-55.
- Shen Z Y, Yang Z, Li J G, et al. Research on factors of soil and water conservation measures in Ningxia loess area based on CSLE Model[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(7): 53-55.
- [21] 郭赓, 丁鸣鸣, 钱洲, 等. 1986—2013 年南京市土地利用变化对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 108-116.
- Guo G, Ding M M, Qian Z, et al. Effect of land use change on soil erosion in Nanjing from 1986 to 2013[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 108-116.
- [22] 童珊, 曹广超, 闫欣, 等. 祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 100-107.
- Tong S, Cao G C, Yan X, et al. Quantitative study on soil erosion and its influencing factors on the south slope of Qilian Mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 100-107.
- [23] 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): 7-13.
- Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 7-13.
- [24] 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.
- [25] 余东洋. 渭河流域植被动态变化遥感时序分析及生态安全评价[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- Yu D Y. RS Time Series Analysis of Vegetation Dynamics and Ecological Security Assessment in Weihe Watershed[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [26] 魏健美, 李常斌, 武磊, 等. 基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 31-37.
- Wei J M, Li C B, Wu L, et al. Study on soil erosion in Northwest Sichuan and Southern Gansu(NSSG) based on USLE[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 31-37.
- [27] 汤剑秋, 李宛莹. 2000—2018 年黄河青海流域土壤侵蚀动态变化[J]. *河南科技*, 2022, 41(8): 117-122.
- Tang J Q, Li W Y. Dynamic changes of soil erosion in the Yellow River Basin of Qinghai Province from 2000 to 2018[J]. *Henan Science and Technology*, 2022, 41(8): 117-122.
- [28] 周桢, 邵东国, 顾文权, 等. 青藏高原农耕区土地利用变化对土壤侵蚀的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2022(3): 120-126.
- Zhou C, Shao D G, Gu W Q, et al. The impact of land-use changes on soil erosion in cultivated lands of Qinghai-Tibet Plateau based on CSLE model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3): 120-126.
- [29] 游浩妍, 黄曦涛, 陈瑞. 基于 CSLE 模型的神木市土壤侵蚀模数计算[J]. *中国水土保持*, 2021(4): 47-49.
- You H Y, Huang X T, Chen R. Calculation of soil erosion modulus in Shenmu City based on CSLE model[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(4): 47-49.
- [30] 刘洋洋, 任涵玉, 呼天明, 等. 中国草地 NDVI 时空动态对多尺度干旱的响应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 153-161.
- Liu Y Y, Ren H Y, Hu T M, et al. Spatiotemporal dynamics of NDVI of grassland and its response to multi-scale drought in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 153-161.