

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.030.

高毅丰, 韩磊, 火红, 等. 基于地形梯度的典型退耕区土壤侵蚀时空分异特征研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 30-41, 48.

Gao Yifeng, Han Lei, Huo Hong, et al. Study on Spatial and Temporal Variations of Soil Erosion in Typical Farmland Conversion Area Based on Topographic Gradient[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 30-41, 48.

# 基于地形梯度的典型退耕区土壤侵蚀时空分异特征研究

高毅丰<sup>1</sup>, 韩磊<sup>2,3,4</sup>, 火红<sup>5</sup>, 赵子林<sup>1</sup>, 常钰卿<sup>1</sup>,

刘钊<sup>2</sup>, 曹鑫鑫<sup>1</sup>, 杨梅丽<sup>1</sup>, 李亚北<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 长安大学 土地工程学院, 西安 710054;

3. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054; 4. 中国科学院 地球环境研究所

黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061; 5. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** [目的] 研究典型退耕区退耕前后地形分异条件下的土壤侵蚀时空动态变化特征, 为巩固退耕还林(草)成果提供科学支撑。[方法] 采用 RUSLE 模型定量分析了延安市 1989—2019 年土壤侵蚀强度时空演变特征, 结合地形因子探究了土壤侵蚀在各高程、坡度上的分异规律, 通过 LMDI 模型了解影响土壤侵蚀模数变化的降雨因子、植被因子与水土保持因子, 并分析了其贡献值, 利用 CA-Markov 模型预测了延安市 2029 年土壤侵蚀状况。[结果] 1989 年、1999 年、2009 年、2019 年延安市平均土壤侵蚀模数分别为 12 554.80 t/(km<sup>2</sup> · a), 8 237.17 t/(km<sup>2</sup> · a), 5 936.57 t/(km<sup>2</sup> · a), 4 473.02 t/(km<sup>2</sup> · a), 侵蚀类型整体以微度侵蚀为主, 在空间上呈现北高南低的分异特征; 侵蚀强度总体随高程的升高而降低, 但在五级高程上侵蚀加剧; 侵蚀强度与坡度存在一致性, 坡度增加, 侵蚀加剧; 近年来, 植被因子和水土保持因子对土壤侵蚀的抑制作用增加; 2029 年延安市土壤侵蚀状况总体好转。[结论] 延安市土壤侵蚀状况总体明显改善, 但局部依然存在侵蚀加剧的情况, 未来延安市应重点治理北部高海拔、东部黄河沿岸地区, 加强对高坡度区域的监测。

**关键词:** 土壤侵蚀; RUSLE; LMDI; CA-Markov; 延安市

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0030-12

## Study on Spatial and Temporal Variations of Soil Erosion in Typical Farmland Conversion Area Based on Topographic Gradient

Gao Yifeng<sup>1</sup>, Han Lei<sup>2,3,4</sup>, Huo Hong<sup>5</sup>, Zhao Zilin<sup>1</sup>, Chang Yuqing<sup>1</sup>,

Liu Zhao<sup>2</sup>, Cao Xinxin<sup>1</sup>, Yang Meili<sup>1</sup>, Li Yabei<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054,

China; 2. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering, Xi'an 710054, China; 4. State Key Laboratory of Loess

and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061,

China; 5. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the characteristics of spatial and temporal dynamics of soil erosion in typical farmland conversion area under different topographic conditions before and after the 'Grain for Green' project, and to provide scientific support for consolidating project results. [Methods] The RUSLE model was used to quantitatively analyze the spatial and temporal evolution characteristics of soil erosion intensity in Yan'an City from 1989 to 2019, and the distribution patterns of soil

收稿日期: 2023-05-22

修回日期: 2023-06-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(41871190); 陕西省重点研发计划(2021SF-440); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102353201); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG2002)

第一作者: 高毅丰(1998—), 女, 山东曲阜人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: gaoyifeng@chd.edu.cn

通信作者: 韩磊(1979—), 男, 河南沈丘人, 副教授, 博士, 主要从事生态恢复、生态遥感和空间信息建模研究。E-mail: hanshuanglei@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

erosion on various elevations and slopes were explored in combination with topographic factors. The precipitation, vegetation and soil and water conservation factor affecting the change of soil erosion modulus were decomposed by the LMDI model and their contribution values were analyzed. The CA-Markov model was used to predict the soil erosion status of Yan'an City in 2029. [Results] The average soil erosion modulus in Yan'an City in 1989, 1999, 2009 and 2019 were 12 554.80 t/(km<sup>2</sup> · a), 8 237.17 t/(km<sup>2</sup> · a), 5 936.57 t/(km<sup>2</sup> · a) and 4 473.02 t/(km<sup>2</sup> · a), respectively. The erosion type was dominated by slight erosion, showing the spatial differentiation characteristics of low level in the south and high level in the north. The soil erosion intensity generally decreased with the increase of elevation, but the erosion increased at the fifth elevation. The soil erosion intensity was consistent with the slope gradient, and the erosion intensity increased with the increase of slope gradient. The inhibitory effect of vegetation factor and soil and water conservation factor on soil erosion had increased in recent years. The soil erosion situation in Yan'an City will be generally improved in 2029. [Conclusion] The soil erosion status in Yan'an City has improved significantly, but there is still the increased erosion in some areas. In the future, the high-altitude areas in the north and the bank areas of the Yellow River in the east of Yan'an City should be given more attention, meanwhile, the monitoring of high-slope areas should be strengthened.

**Keywords:** soil erosion; RUSLE; LMDI; CA-Markov; Yan'an City

黄土高原是我国乃至全球典型的水土流失和生态环境脆弱区<sup>[1]</sup>,同时也是我国“两屏三带”生态安全战略与保证黄河流域生态安全 and 高质量发展的关键区域<sup>[2]</sup>,由于其独特的地形地貌和长期的资源不合理利用,致使区域水土流失严重<sup>[3]</sup>,是黄河的主要产沙区。针对其典型的生态环境问题,自1999年以来,黄土高原积极推进退耕还林(草)等一系列生态建设工程,经20余年的综合治理,地表格局发生显著变化,土壤侵蚀得到有效遏制,生态环境明显改善<sup>[4-5]</sup>,但仍存在整体好转、局部恶化的现象<sup>[6-7]</sup>,影响区域可持续发展和国家生态文明建设。

延安市被称为“退耕还林第一市”,是黄土高原典型退耕区,生态建设成效显著,退耕前后土壤侵蚀发生较大变化。马琪等<sup>[8]</sup>基于生态承载力预警评估土壤侵蚀敏感红线,发现陕西省土壤侵蚀敏感红线集中在陕北黄土高原丘陵沟壑区;周璐红等<sup>[9]</sup>通过地理探测器分析延安市土壤侵蚀的驱动因子,发现影响土壤侵蚀的主控因子是植被覆盖;谢明阳等<sup>[10]</sup>通过分析延安市土壤侵蚀的空间偏移特征,发现侵蚀表现出局部变化带动整体的特征;董起广等<sup>[11]</sup>分析了延安市土壤侵蚀与土地利用的关系,发现侵蚀程度最大的是城镇村及工矿用地;刘悦等<sup>[12]</sup>基于植被和降雨因子评估了延河流域土壤侵蚀,发现植被是导致土壤侵蚀量下降的控制因子。前人研究多集中在土壤侵蚀的时空转移上,时间尺度也多为退耕还林(草)政策实施之后或只针对某一年,基于地形的长时间序列土壤侵蚀时空变化及预测、像元尺度上影响因子的分解尚未

涉及。地形是土壤侵蚀的重要影响因子之一<sup>[13]</sup>,对地面所接收到的能量以及能量的再分配起着决定性的作用,小范围内降雨、地形的变化可以对于土壤侵蚀产生较大的影响<sup>[14-16]</sup>,延安市境内沟壑纵横,地表支离破碎,高程落差大,曾先后进行了两次不同坡度上的退耕(>25°, >15°)。因此,基于地形因子探究其土壤侵蚀特征,对于巩固退耕还林成果具有重要的现实意义。

基于此,本文以典型退耕区延安市为研究区,基于RUSLE模型定量计算延安市1989—2019年的土壤侵蚀模数,对各时期的土壤侵蚀状况从时空转移、海拔、坡度等角度做出具体分析,结合LMDI模型对影响侵蚀变化的因子进行分解,分析其时空变化特征,通过CA-Markov模型预测2029年延安市土壤侵蚀情况,并基于地形因子探讨其时空变化,以期揭示延安市不同地形因子下土壤侵蚀的动态变化特征及其影响因子的变化,探究未来重点监测区域,为黄土高原土壤侵蚀治理与重点监测提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

延安市位于陕西省北部(35°21′—37°31′N, 107°41′—110°31′E),总面积 $3.7 \times 10^5$  km<sup>2</sup>(图1),地处典型的黄土丘陵沟壑区,地貌以黄土塬、丘陵为主,地势自西北向东南降低,平均海拔1 200 m;全区属大陆性干旱半干旱气候,四季分明,昼夜温差大,年平均气温10.5℃;境内河流为黄河一级支流延河、汾川河和其他众多支流;年平

均降水量 500 mm 左右,降雨集中在 6—9 月,多季节性和局部性暴雨,水土流失严重。经退耕还林(草)工

程等生态保护措施的综合治理,延安市植被覆盖大幅提高,土壤侵蚀得到有效遏制。

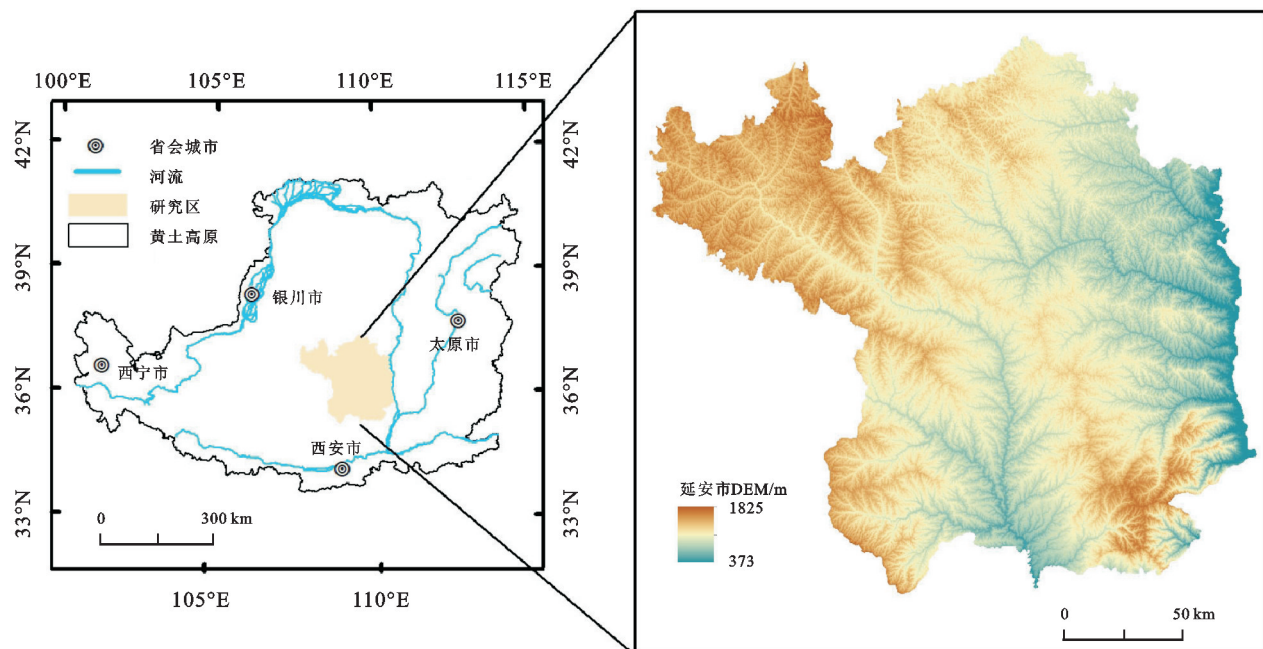


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

## 1.2 数据来源

遥感数据包括 1989 年、1999 年、2009 年、2019 年 Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI 影像,通过 Google Earth Engine 平台将其分为林地、草地、耕地、建设用地、水域;降雨数据来自国家气象中心的“中国地面气候资料日数据集(V3.0)”;土壤数据来自世界土壤数据库。

## 1.3 研究方法

采用 RUSLE 土壤流失方程计算土壤侵蚀强度,其表达式为:

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

式中:  $A$  表示土壤侵蚀量 [ $t/(hm^2 \cdot a)$ ];  $R$  表示降雨侵蚀力因子 [ $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ];  $K$  表示土壤可侵蚀性因子 [ $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$ ];  $LS$  表示坡长坡度因子(无量纲);  $C$  表示植被覆盖与管理因子(无量纲);  $P$  表示水土保持措施因子(无量纲)<sup>[17]</sup>。

### 1.3.1 RUSLE 模型因子

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。降雨是导致土壤发生侵蚀的主要因素,研究采用 Wischmeier 等<sup>[18]</sup>提出的  $R$  值算法,其表达式为:

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

式中:  $p$  表示多年平均降雨量(mm);  $p_i$  表示各月平均降水量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )。  $K$  值是反映土壤抵抗侵蚀营力的分离和搬运作用的综合体现,采用 Williams 等<sup>[19]</sup>提出的  $K$  值计算方法。其表达式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 K_a \frac{(1 - K_i)}{100} \right] \right\} \times \left( \frac{K_i}{K_e + K_i} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7 K_{n1}}{K_{n1} + \exp(-5.51 + 22.9 K_{ni})} \right] \quad (3)$$

式中:  $K_a$ ,  $K_i$ ,  $K_e$ ,  $C$  代表砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%);  $K_{n1} = 1 - K_a/100$ 。

(3) 坡度因子( $S$ )。地形是导致土壤侵蚀的重要因素之一,坡度因子采用 McCool 等<sup>[20]</sup>和 Liu 等<sup>[21]</sup>提出的计算公式,其表达式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.55 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  代表坡度( $^\circ$ )。

(4) 坡长因子( $L$ )。坡长通过影响径流携带泥沙的能力进而对土壤侵蚀造成影响,坡长因子采用刘宝元等<sup>[22]</sup>提出的计算公式,其表达式为:

$$L = \left( \frac{\epsilon}{22.1} \right)^n \quad (5)$$

$$n = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为坡长(m);  $n$  为坡长指数。

(5) 植被覆盖与管理因子( $C$ )。  $C$  代表植被抑制

发生土壤侵蚀的因子,本文采用蔡崇法等<sup>[23]</sup>的计算方程,表达式如下:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Band}_4 - \text{Band}_3}{\text{Band}_4 + \text{Band}_3} \quad (7)$$

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_0}{\text{NDVI}_v + \text{NDVI}_0} \quad (8)$$

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

式中:Band<sub>4</sub>为近红外波段;Band<sub>3</sub>为红光波段;NDVI为归一化植被指数;NDVI<sub>0</sub>植被覆盖度为0的情况下NDVI的取值;NDVI<sub>v</sub>为全植被覆盖情况下的NDVI的取值; $f$ 为植被覆盖度。

(6) 水土保持措施因子( $P$ )。土地利用类型不同,其水土保持能力也不相同。参考前人<sup>[24-25]</sup>研究,将研究区林地、草地、耕地、建设用地、水域分别赋值0.05,0.16,0.31,1,0。

1.3.2 土壤侵蚀模数分级 根据水利部土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)<sup>[26]</sup>将土壤侵蚀强度分为微度侵蚀[<1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],轻度侵蚀[1 000~2 500 t/(km<sup>2</sup>·a)],中度侵蚀[2 500~5 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],强烈侵蚀[5 000~8 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],极强烈侵蚀[8 000~15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],剧烈侵蚀[>15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)]。

1.3.3 海拔与坡度分级 采用自然裂点法将研究区海拔划分为一级高程(373~907 m)、二级高程(907~1 110 m)、三级高程(1 110~1 274 m)、四级高程(1 274~1 444 m)、五级高程(1 444~1 825 m)。参考《第二次全国土地调查技术规程》将研究区分为一级坡度(0°~2°)、二级坡度(2°~6°)、三级坡度(6°~15°)、四级坡度(15°~25°)、五级坡度(>25°)。

1.3.4 地形分布指数 地形指数是土壤侵蚀类型在各地形梯度上的分布优势,可以对面积差异量纲带来的影响进行有效消除。公式如下:

$$P = \left( \frac{A_{ie}}{A_i} \right) \times \left( \frac{A}{A_e} \right) \quad (10)$$

式中: $A_{ie}$ 代表第 $i$ 种土壤侵蚀类型在第 $e$ 级地形梯度面积; $A_i$ 为第 $i$ 种土壤侵蚀类型面积; $A_e$ 为第 $e$ 级地形梯度面积; $A$ 为研究区面积。 $P > 1$ 时,说明第 $i$ 种土壤侵蚀类型在第 $e$ 级地形梯度上属于优势分布, $P$ 值越大,优势度越高。

1.3.5 LMDI 模型 LMDI 模型被广泛应用于驱动因素的研究中,计算公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n (x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{n,i}) \quad (11)$$

$$\Delta V = V^e - V^0 = \Delta V_{x1} + \Delta V_{x2} + \dots + \Delta V_{xn} \quad (12)$$

式中: $\Delta V$ 为目标量的变化量; $V^e$ 为 $e$ 时的目标量; $V^0$ 为

开始的目标量; $x_{ni}$ 为 $V_i$ 的第 $n$ 个指标量, $i=1,2,\dots,n$ ; $\Delta V_{xi}$ 为因指标量引起的目标量的变化, $i=1,2,\dots,n$ 。

$$\Delta V_{ki} = \sum_{i=1}^n L(V_i^e, V_i^0) \ln \left( \frac{x_{k,i}^e}{x_{k,i}^0} \right) \quad (13)$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{V_i^e - V_i^0}{\ln V_i^e - \ln V_i^0} \ln \left( \frac{x_{k,i}^e}{x_{k,i}^0} \right) \quad (14)$$

其中,

$$L(V_i^e, V_i^0) = \frac{V_i^e - V_i^0}{\ln V_i^e - \ln V_i^0} \quad (15)$$

式中: $V_i^e$ 为 $e$ 时的目标量; $V_i^0$ 为开始时的目标量; $x_{k,i}^e$ 为时间 $e$ 时的指标量; $x_{k,i}^0$ 为开始时期0时的指标量。本文中指标量选取 $C$ 因子、 $R$ 因子和 $P$ 因子,目标量为土壤侵蚀模数,由于因子中存在零值,无法进行对数运算,Ang等<sup>[27]</sup>提出用极小值代替零值进行运算,本文采用极小值 $10^{-20}$ 代替零值进行运算。

1.3.6 CA-Markov 模型 Markov 模型常用于模拟事物状态的转移,具有状态转移的无后效性,具体公式如下:

$$P = P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{16} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{61} & P_{62} & \dots & P_{66} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $P_{ij}$ 表示的是第 $i$ 种侵蚀类型转移至第 $j$ 种侵蚀类型的概率。

元胞自动机(CA)可以对时空演变过程进行模拟,具有较强的处理地理信息的能力。CA-Markov模型将二者结合起来,可以实现土壤侵蚀位置和数量的双重预测。为测试模型精度,基于1999年和2009年土壤侵蚀数据对2019年延安市土壤侵蚀进行预测,与2019年实际土壤侵蚀数据进行精度验证,Kappa系数为75.9%,满足精度要求,该模型预测延安市土壤侵蚀状况结果可靠。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀强度的时间变化

1989年、1999年、2009年、2019年延安市平均土壤侵蚀模数分别为12 554.80 t/(km<sup>2</sup>·a),8 237.17 t/(km<sup>2</sup>·a),5 936.57 t/(km<sup>2</sup>·a),4 473.02 t/(km<sup>2</sup>·a),呈下降趋势且变化速度趋于平缓,1989—1999年降幅为34.39%,1999—2009年降幅为27.93%,2009—2019年降幅为24.65%(图2)。土壤侵蚀类型以微度侵蚀为主,其面积呈增加的趋势,由1989年的59.94%上升至2019年的64.95%;轻度侵蚀占比不大,但随着时间呈增加的趋势;变化幅度最大的是剧烈侵蚀,由1989年的23.23%降低至2019年的7.42%。1989年、



1999 年、2009 年、2019 年强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀 3 种侵蚀类型的面积占比之和分别为 35.10%, 32.11%, 27.41%, 21.09%, 呈现逐渐减小的趋势(表 1)。总体来说, 1989—2019 年延安市平均土壤侵蚀模数下降明显, 土壤侵蚀状况明显向好。

1989—1999 年, 有 66.88% 的区域未发生侵蚀变化, 12.70% 的区域侵蚀程度加剧, 20.42% 的区域侵蚀程度减轻; 1999—2009 年, 有 59.91% 的区域未发生侵蚀变化, 16.32% 的区域侵蚀程度加剧, 但有 23.78% 的区域土壤侵蚀状况好转; 2009—2019 年, 有 72.78% 的区域未发生侵蚀变化, 6.50% 的区域向

高等级侵蚀转移, 同时有 20.72% 的区域向低等级侵蚀转变(表 2), 研究区土壤侵蚀得到有效控制, 整体状况得到改善。

在 1989—1999 年、1999—2009 年、2009—2019 年 3 个时期内, 轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀等级均明显向低等级侵蚀等级转变, 其中在 1989—1999 年和 1999—2009 年面积转变最大的是剧烈侵蚀, 分别有 1 662.10 km<sup>2</sup>, 1 296.21 km<sup>2</sup> 向极强烈侵蚀转变。在 2009—2019 年面积转变最大的是中度侵蚀, 分别有 872.09 km<sup>2</sup>, 1 007.59 km<sup>2</sup> 向微度侵蚀、轻度侵蚀转变。

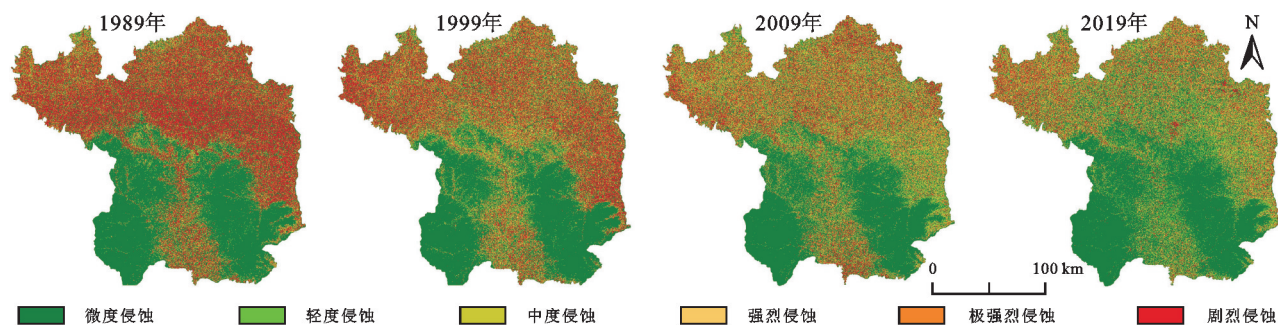


图 2 延安市土壤侵蚀强度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil erosion intensity in Yan'an City

表 1 延安市不同时期土壤侵蚀强度面积比例

Table 1 Area proportion of soil erosion intensity in Yan'an at different periods %

侵蚀等级	1989 年	1999 年	2009 年	2019 年
微度侵蚀	59.94	58.81	59.40	64.95
轻度侵蚀	1.73	3.23	3.16	5.78
中度侵蚀	3.23	5.85	10.04	8.18
强烈侵蚀	3.91	6.12	7.39	6.58
极强烈侵蚀	7.96	9.48	9.50	7.09
剧烈侵蚀	23.23	16.51	10.52	7.42

## 2.2 土壤侵蚀强度的空间变化

延安市土壤侵蚀强度空间格局特征明显, 呈现出北高南低的分异特征, 面积占比最大的微度侵蚀主要分布在延安市南部的桥山、梁山林区。侵蚀强度由强到弱分别为吴起县、延长县、延川县、子长县、安塞区、志丹县、宝塔区、宜川县、洛川县、甘泉县、黄陵县、富县、黄龙县; 1989 年平均土壤侵蚀模数达到剧烈侵蚀的有吴起县、志丹县、安塞区、子长县、宝塔区、延长县和延川县 7 个区县; 1999 年没有区县处于剧烈侵蚀状态, 侵蚀最高的地区为吴起县[13 862t/(km<sup>2</sup> · a)]; 2009 年有吴起县、子长县、安塞区 3 个地区处于极强烈侵蚀; 2019 年仅有吴起县、延川县、子长县、安塞区 4 个地区达到了强烈侵蚀, 富县、黄龙县、黄陵县 3 个地区已经处于微度侵蚀。

各区县均以微度侵蚀为主(图 3), 富县、黄龙县、

黄陵县的微度侵蚀占比达 80% 以上, 其余区县微度侵蚀占比也达 40% 以上; 各区县的轻度侵蚀面积占比相差不大; 中度侵蚀面积总体占比较小, 但呈缓慢增加的趋势; 1989 年子长县、吴起县、安塞区、志丹县、延川县、宝塔区、延长县剧烈侵蚀面积占比较大, 分别占区县面积的 34.38%, 34.30%, 35.43%, 33.12%, 36.87%, 29.95%, 42.23%, 2019 年剧烈侵蚀面积占比明显下降, 分别占各区县面积的 14.56%, 17.52%, 10.57%, 10.41%, 13.19%, 5.44%, 8.59%; 1989 年各区县强烈侵蚀占比相差不大(1.52%~6.76%), 1999 年子长县、吴起县、安塞区、志丹县、延川县、宝塔区、延长县强烈侵蚀面积增大(7.19%~9.37%), 2009 年强烈侵蚀占比继续增加(8.06%~11.23%), 但 2019 年下降(6.26%~11.02%); 极强烈侵蚀在子长县、吴起县、安塞区、志丹县、延川县、宝塔区、延长县占比较大, 1989—2009 年呈现增加的趋势, 2019 年极强烈侵蚀面积占比下降。

## 2.3 不同地形因子土壤侵蚀强度分布

土壤侵蚀在不同高程梯度上表现为: 一级高程侵蚀最剧烈, 随海拔上升侵蚀减弱, 但在五级高程上侵蚀加剧。由图 4.5 可知, 在一级高程上, 除微度侵蚀外, 其余侵蚀类型的地形分布指数均大于 1, 且侵蚀越剧烈优势度越高, 剧烈侵蚀优势度最大; 在二级高程上, 微度侵蚀、轻度侵蚀的优势度较一级高程增加, 高等级侵蚀优势度随时间减弱而低等级侵蚀的优势度随时间逐渐

升高,但微度侵蚀仍属于非优势分布;三级高程梯度上,微度侵蚀成为最优势侵蚀,其余侵蚀等级优势度均下降;在四级高程梯度上,只有微度侵蚀的优势度大于 1,但极强烈侵蚀、剧烈侵蚀优势度回升;在五级高程梯度上,强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀的优势度均大于 1,且随时间呈波动增加的趋势。总体来说,高等级侵蚀程度随着时间逐渐向高海拔地区转移,低海拔地区的侵蚀程度随时间逐渐向好。

表 2 土壤侵蚀面积转移矩阵  
Table 2 Soil erosion area transfer matrix km<sup>2</sup>

年际	等级	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
1989—1999	微度侵蚀	—	293.90	377.31	355.75	587.98	1310.25
	轻度侵蚀	427.94	—	203.87	128.78	116.05	113.19
	中度侵蚀	646.75	76.48	—	306.38	386.45	404.83
	强烈侵蚀	557.91	25.82	131.19	—	522.85	721.22
	极强烈侵蚀	721.34	20.62	87.88	222.90	—	1662.10
	剧烈侵蚀	986.84	21.35	57.91	131.43	545.60	—
1989—1999	微度侵蚀	—	508.22	729.20	652.62	878.49	1260.27
	轻度侵蚀	461.04	—	165.56	108.36	112.91	99.06
	中度侵蚀	1145.42	254.12	—	488.12	580.98	579.95
	强烈侵蚀	693.58	81.69	242.78	—	554.34	703.70
	极强烈侵蚀	756.14	70.05	219.77	321.09	—	1296.21
	剧烈侵蚀	759.23	59.52	155.85	239.57	527.17	—
2009—2019	微度侵蚀	—	501.57	872.09	447.08	412.97	295.89
	轻度侵蚀	215.44	—	1007.59	219.89	139.92	46.75
	中度侵蚀	130.16	112.63	—	788.62	623.68	205.91
	强烈侵蚀	62.63	34.86	474.21	—	750.29	402.13
	极强烈侵蚀	42.35	14.06	133.57	461.71	—	888.61
	剧烈侵蚀	41.51	4.34	53.77	104.44	499.41	—

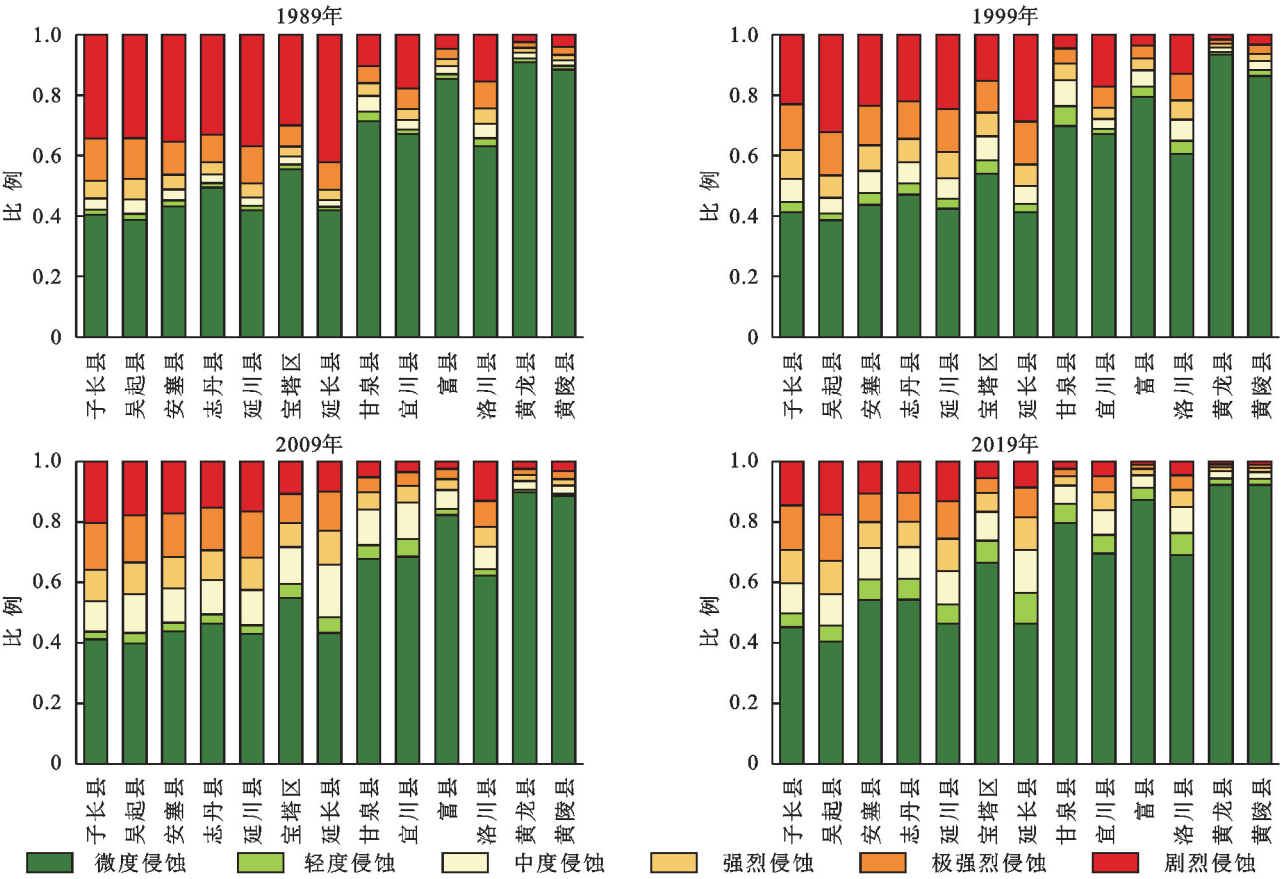


图 3 各区县土壤侵蚀强度面积占比

Fig. 3 Proportion of soil erosion intensity area in different areas of Yan'an City

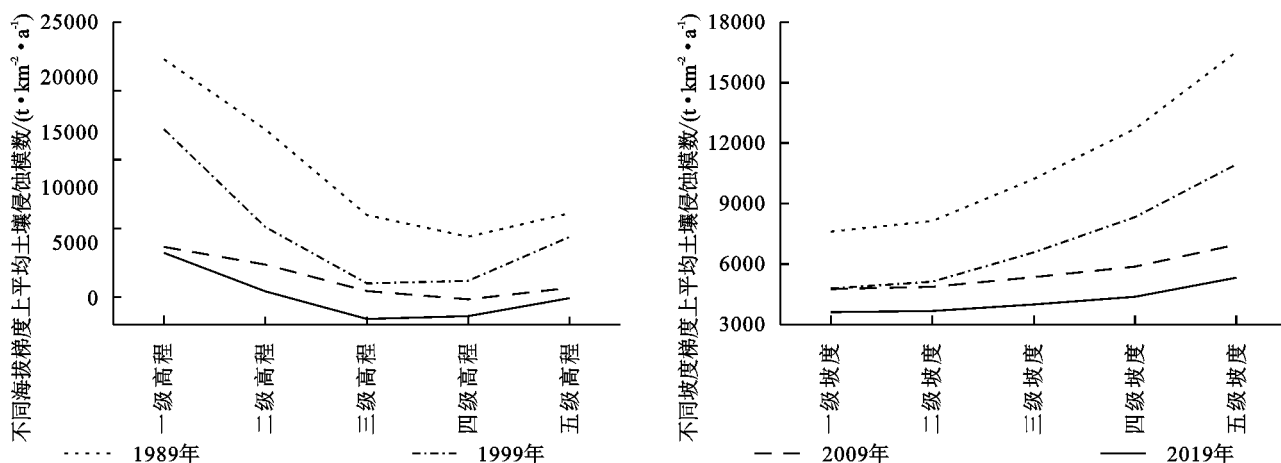


图 4 研究区不同地形梯度上土壤侵蚀强度分布

Fig. 4 Distribution of soil erosion intensity on different topographic gradients in the study area

土壤侵蚀整体表现为坡度越大,侵蚀等级越高,侵蚀越剧烈,由图 4—6 可知,一级坡度、二级坡度和三级坡度的地形指数分布格局相似,微度侵蚀、轻度侵蚀在各时期的地形指数均大于 1,其中轻度侵蚀在前三级坡度梯度上优势度最高;在四级坡度梯度上优势度大于 1 侵蚀类型向强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀转变,分布优势最高的侵蚀类型随时间由极强烈侵蚀向中度侵蚀转变;在五级坡度梯度上,极强烈侵蚀、剧烈侵蚀的优势度相较于上一梯度持续增加,剧烈侵蚀的优势度随时间推移呈下降趋势而强烈侵蚀和极强烈侵蚀的分布优势逐年增加,表明随着坡度的增加,高等级侵蚀的优势度不断扩大,且在高坡度梯度上,侵蚀类型逐年向低等级侵蚀转变。

#### 2.4 土壤侵蚀影响因素的定量研究

通过 LDMI 模型对影响土壤侵蚀的因子在像元尺度上进行分解,结果如图 7 所示。1989—1999 年,降雨因子的变化对于抑制土壤侵蚀的地区为 93.24%,负向贡献值  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区占比 23.55%,主要分布在延安市北部,而正向贡献  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区仅分布在东部的宜川县及南部的洛川县。1999—2009 年,降雨因子对于土壤侵蚀负向贡献  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区占比 16.18%,主要分布在延安市西北部的吴起县、志丹县,东部的延川县、延长县、宜川县和宝塔区;正向贡献  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区占比 2.94%,主要分布在北部的子长县、南部的洛川县及富县和黄陵县的东部。2009—2019 年,降雨因子对土壤侵蚀负向贡献  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区占比 3.10%,主要分布在延安市南部的黄土塬区;降雨因子加剧土壤侵蚀的地区主要分布在延安市北部和东部,正向贡献  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区占比 10.94%。

1989—1999 年,植被因子对于土壤侵蚀变化整体表现为促进作用,加剧土壤侵蚀的地区占比 19.13%,主要分布在延安市东部、南部的黄土塬区及中部偏北地区,

如志丹县、延长县、延川县、宝塔区、宜川县等,以及南部北洛河两侧的黄土塬区。1999—2009 年,整体来看,植被因子对于土壤侵蚀的作用开始转变为抑制作用,延安市东部地区的植被因子加剧土壤侵蚀的状况好转,尤其是延川县、延长县及宜川县;植被因子抑制土壤侵蚀的地区增加,负向贡献值  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区占比 7.16%,主要分布在延安市的北部和东部。2009—2019 年,植被因子的变化抑制土壤侵蚀的地区占比 89.16%,负向贡献值在  $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区主要分布在延安市北部的子长县、安塞区、宝塔区北部、延川县以及南部的洛川县;而植被因子加剧土壤侵蚀的地区主要集中在延安市西北部的吴起县、志丹县以及东部黄河沿岸。

整体来看,水土保持因子对土壤侵蚀始终起抑制作用。1989—1999 年期间,水土保持因子加剧土壤侵蚀的地区占比 4.94%,主要分布在北部子长县、安塞区、延川县、吴起县。1999—2009 年期间,水土保持因子对加剧土壤侵蚀的地区占比 7.18%,贡献值  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区向中部地区转移;而负向贡献  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区为 9.33%,向延安市北部转移。2009—2019 年期间,水土保持因子对于抑制土壤侵蚀的整体贡献值较上一时期有所增加,负向贡献值  $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上的地区为 11.84%,主要分布在延安市北部;加剧土壤侵蚀的地区相较于上一时期有所减少,除延安市南部的桥山和梁山林区外均有分布。

#### 2.5 土壤侵蚀预测

2029 年土壤侵蚀仍呈现北高南低的空间分布特征(图 8),微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀的面积分别占比 63.51%,9.17%,8.92%,6.52%,6.42%,5.45%。相较于 2019 年,微度侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积占比下降,其中剧烈侵蚀降幅最大为 1.97%,轻度侵蚀面积增长了 3.40%,中度侵蚀面积变化不大。

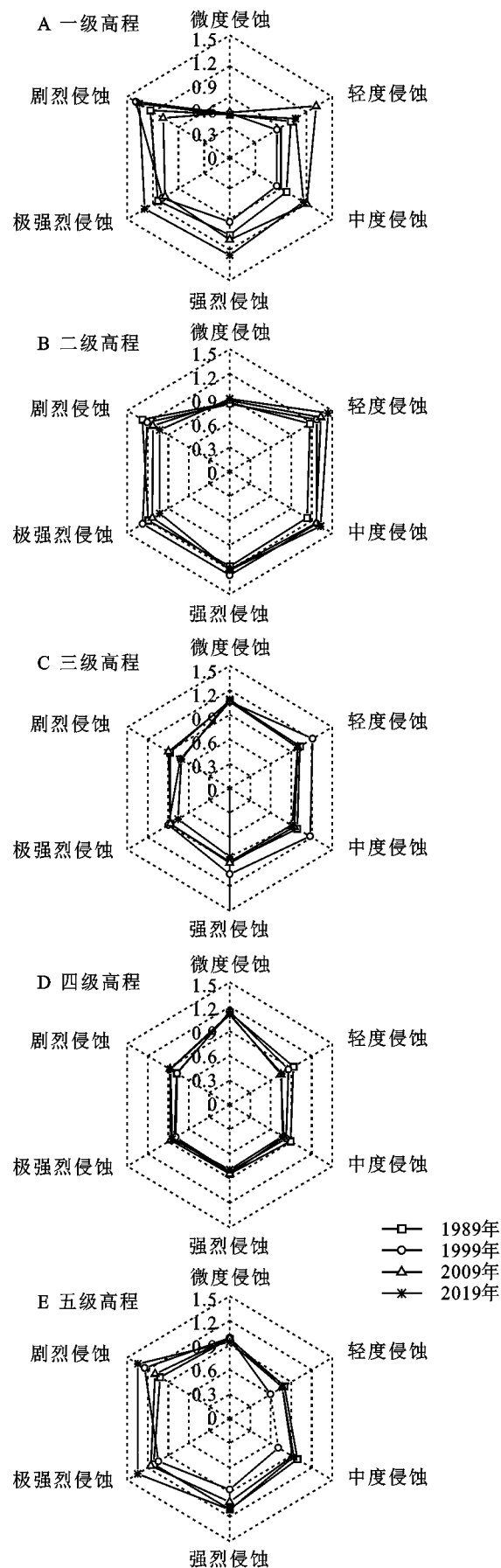


图 5 土壤侵蚀高程地形分布指数

Fig. 5 Soil erosion elevation topographic distribution index

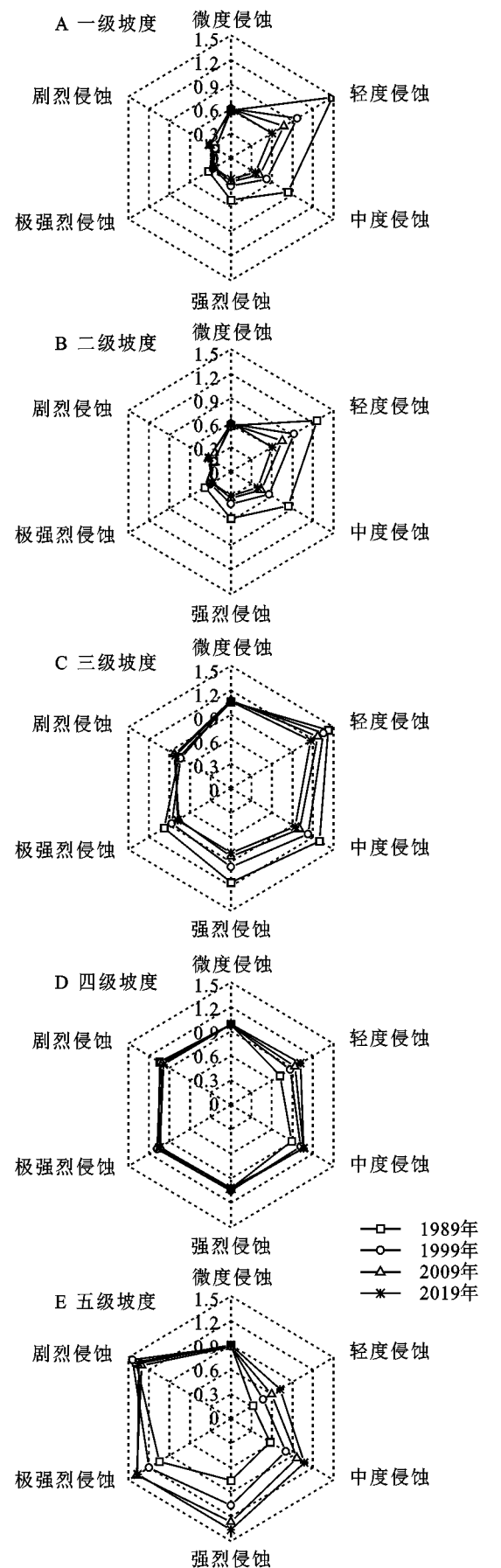


图 6 土壤侵蚀坡度地形分布指数

Fig. 6 Soil erosion slope topographic distribution index



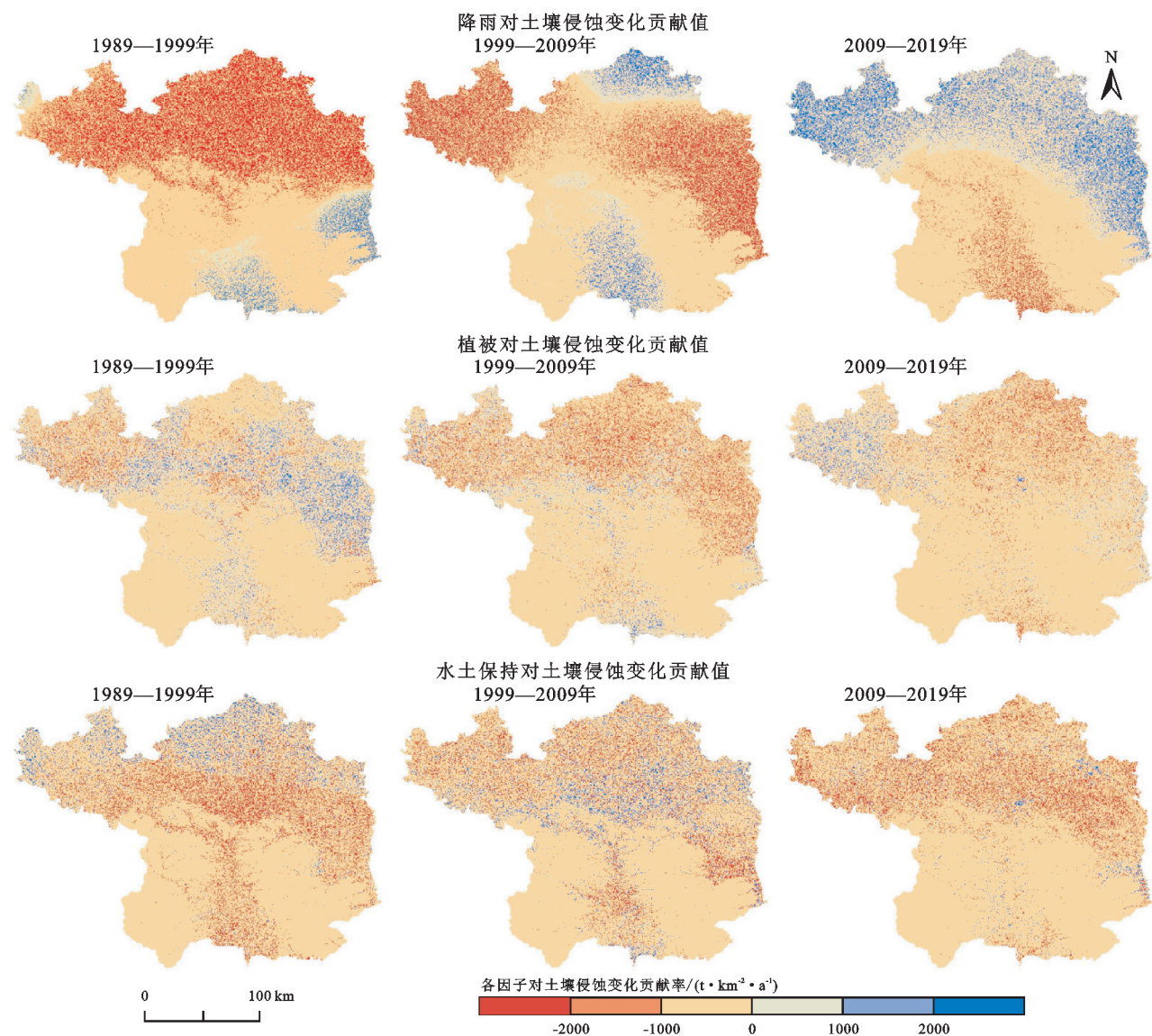


图 7 各因子对土壤侵蚀的贡献值

Fig. 7 Contribution value of each factor to soil erosion

由图 9 可知,土壤侵蚀等级加剧、无变化、减轻的区域分别占 3.04%,88.30%,8.66%,其中侵蚀加剧的 77.63%和侵蚀减轻的 77.75%集中在延安市北部的吴起县、志丹县、子长县、延长县、安塞县、宝塔区 6 个地区,这些地区改善和恶化的情况并存,但以侵蚀减轻为主;矛盾最为突出的为吴起县,侵蚀减轻和加剧的面积分别为 634.20 km<sup>2</sup>,189.72 km<sup>2</sup>。

微度侵蚀在各高程梯度上面积均下降,其中在二级高程梯度上面积下降最多,为 189.32 km<sup>2</sup>;轻度侵蚀在各高程梯度上面积均有所上升,在二级高程梯度上面积上升最多,为 382.80 km<sup>2</sup>;中度侵蚀在各高程梯度上面积均上升,但各梯度变化相差不大(37.71~65.98 km<sup>2</sup>);强烈侵蚀的面积在二三级高程梯度上下降,但在其他高程梯度上增加,其中在二级高程梯度面积变化远高于其他高程,为 38.95 km<sup>2</sup>;极强烈侵蚀和剧烈侵蚀在各高程梯度上的面积均下降,其中极强烈侵蚀在二级高程梯度上

面积减少最多为 108.408 km<sup>2</sup>,剧烈侵蚀在二、三、四、五级高程梯度上面积变化均超过 100 km<sup>2</sup>,其中在五级高程梯度上面积减少最多为 200.79 km<sup>2</sup>。

各类侵蚀在一级坡度上面积变化均不大(1.22~10.24 km<sup>2</sup>)。微度侵蚀在各坡度上面积均下降,其中在四、五级坡度上面积下降最多,为 189.82 km<sup>2</sup>,183.04 km<sup>2</sup>;轻度侵蚀在各坡度上面积均有所上升,在三、四、五级坡度上面积变化较大,分别为 366.47 km<sup>2</sup>,440.76 km<sup>2</sup>,311.26 km<sup>2</sup>;中度侵蚀的面积在前两级坡度上减少不大(1.32~7.15 km<sup>2</sup>),但在后三级坡度上增加,其中五级坡度面积变化最大为 172.69 km<sup>2</sup>;强烈侵蚀的面积在前四级坡度上降低,但在五级坡度上增加了 25.41 km<sup>2</sup>;极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积在各级坡度上均下降,其中强烈侵蚀在三、四级坡度上面积下降为 75.63 km<sup>2</sup>,88.73 km<sup>2</sup>,而剧烈侵蚀面积变化较大为后两级坡度,分别为 232.81 km<sup>2</sup>,272.32 km<sup>2</sup>。

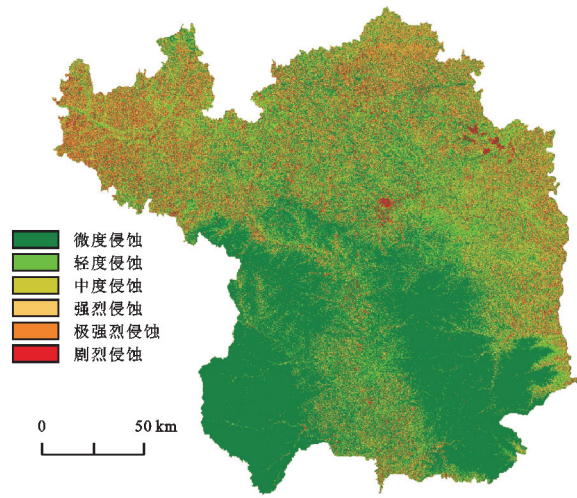


图 8 2029 年延安市土壤侵蚀状况  
Fig. 8 Soil erosion in Yan'an City in 2029

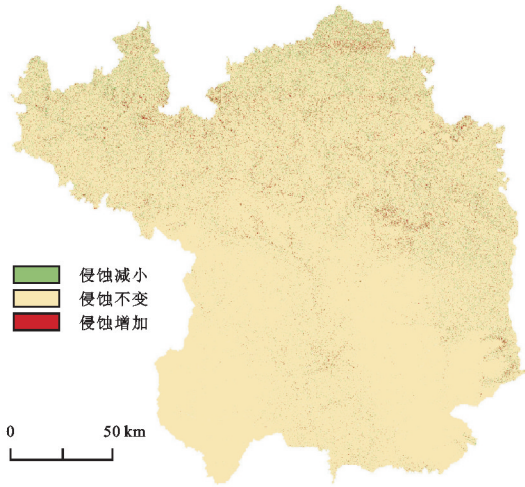


图 9 延安市 2019—2029 年侵蚀变化情况空间分布  
Fig. 9 Erosion changes in Yan'an City from 2019 to 2029

2.6 讨论

研究期间,延安市土壤侵蚀强度呈下降趋势,降幅达到 64.37%,变化趋势与黄土高原大部分地区土壤侵蚀模数的变化相一致,如北洛河上游流域土壤侵蚀模数由 1981—1990 年的  $8\,612.32\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  降低到 2001—2010 年的  $3\,060.71\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ <sup>[28]</sup>,羊圈沟流域土壤侵蚀模数由 1984 年的  $15\,327.57\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  下降至 2014 年的  $3\,270.19\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ <sup>[29]</sup>,秃尾河流域土壤侵蚀模数由 1988 年的  $12\,434.47\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  下降至 2013 年的  $3\,721.08\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ <sup>[30]</sup>。1989—1999 年期间,研究区植被覆盖减少,植被因子的变化加剧了土壤侵蚀,但由于延安市地处干旱半干旱地区,降雨年际波动大,20 世纪 90 年代的降雨量明显下降<sup>[31]</sup>,1999 年降雨量仅为  $344.3\text{ mm}$ <sup>[32]</sup>,并且退耕还林(草)项目实施之前的小流域治理等水土保持措施也对土壤侵蚀起到了积极的抑制作用,因此这一时期延安市土壤侵蚀模数总体下降。1999—2009 年期

间,植被因子开始对土壤侵蚀起抑制作用,退耕还林(草)工程的成效初显,植被覆盖度的增加及土地利用结构的变化减弱了雨滴的击溅作用并增加了径流的下渗作用,提高了土壤的抗冲性,有效抵消了降雨侵蚀力对土壤的侵蚀,带来这一时期延安市土壤侵蚀模数的下降,大规模生态治理工程是缓解土壤侵蚀的有效途径。2009—2019 年期间,降雨因子加剧土壤侵蚀的作用虽有所增加,但在退耕还林(草)项目的持续推进下,植被因子和水土保持因子的变化对土壤侵蚀的抑制作用增加,植被覆盖度持续升高<sup>[33]</sup>,耕地转变为水土保持效益更高的林地和草地,土壤侵蚀模数进一步下降。后期可以通过加强退耕成果管理、优化土地利用结构等缓解该地区水土流失状况。

延安市土壤侵蚀强度呈现北高南低的空间分布特征,尤其是延安市南部的桥山及梁山地区平均土壤侵蚀模数低于其他地区,该地区的植被因子、降雨因子及水土保持因子对土壤侵蚀模数的贡献值始终为负值且贡献值处于  $0\sim1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,这是由于这些区域天然次生林分布较广,植被覆盖状况一直较好,土地利用类型基本未发生变化,土壤侵蚀变化很小。延安市北部为丘陵沟壑区,植被覆盖相对较低,土质疏松且地形复杂多陡坡,自然本底条件较差,加之吴起县、延川县、延长县、安塞区、延川县 5 个农业主产县分布在延安市北部,人类活动影响巨大,导致该地区土壤侵蚀强度远远高于南部地区,根据 CA-Markov 预测模型可知,2029 年延安市侵蚀加剧的区域依旧集中于此,生态恢复与恶化矛盾突出,该地区应继续维持退耕还林(草)成果并结合其他水土保持措施开展综合治理。

延安市土壤侵蚀主要是由于地表水侵蚀导致,地形通过改变地表水热再分配影响土壤侵蚀强度。延安市多年平均归一化植被指数(NDVI)在 1~5 级高程梯度上分别为 0.31,0.47,0.58,0.59,0.46,其变化趋势与土壤侵蚀强度分布趋势高度一致。一级高程主要分布于延安市东部黄河沿岸,该地区紧靠黄河,植被覆盖全区最低,风蚀水蚀交替发生,径流切割地表导致其破碎度高,土壤侵蚀严重,还需重点监测,增强该区域防风固沙能力和蓄水保水能力将会大幅减少延安市土壤侵蚀面积与侵蚀强度。五级高程梯度主要分布于吴起县、志丹县,这些区域虽退耕成效显著,植被增加迅速,但由于当地自然本底条件较差,土地沙化仍比较严重,植被覆盖度不及南部地区,加之地貌以黄土丘陵沟壑为主,高程落差大,地表支离破碎,导致水土流失问题仍是当地目前面临的主要生态问题。通过 LMDI 模型可知,近年来,黄河沿岸及延安市西北地区的植被



因子对于土壤侵蚀正向贡献的地区有所扩大,2029年剧烈侵蚀的减少量也主要集中在此,对于该地区的治理应加大当地水土流失的控制力度,减少人为影响的干扰,维持沟坡防线,巩固退耕成果。

土壤侵蚀强度与坡度保持较高的一致性。延安市1~5级坡度梯度上多年平均归一化植被指数分别为0.48,0.49,0.51,0.53,0.52,不同坡度上植被覆盖相差不大。黄土结构疏松,遇水易分散、崩解,在自身重力和上部压力的同时作用下极易发生水力侵蚀和重力侵蚀,陡坡开垦导致坡面植被易被冲刷脱离,加之不合理的耕作方式与种植模式,导致高坡度地区土壤侵蚀剧烈。根据预测模型可知,2029年延安市剧烈侵蚀在高坡度上变化强烈,25°以上的区域虽然是延安市退耕还林(草)项目的重点,但这些区域未来仍需重点关注,应继续加强护坡工程,优化植被结构,逐步提高其抗侵蚀能力。

### 3 结论

(1) 1989年、1999年、2009年、2019年延安市年均侵蚀模数分别为12 554.80 t/(km<sup>2</sup>·a),8 237.17 t/(km<sup>2</sup>·a),5 936.57 t/(km<sup>2</sup>·a),4 473.02 t/(km<sup>2</sup>·a),侵蚀类型以微度侵蚀为主,剧烈侵蚀面积降幅最大;土壤侵蚀强度空间格局特征明显,呈现出北高南低的分异特征。

(2) 延安市土壤侵蚀总体表现为随海拔的升高侵蚀程度逐渐降低,但在五级高程梯度上,侵蚀加剧;土壤侵蚀强度与坡度存在一致性,整体表现为坡度越大,侵蚀等级越高,侵蚀越剧烈,25°以上的区域仍需要重点监测和治理。

(3) 近年来,随着退耕还林(草)工程带来的植被覆盖度的增加及土地利用结构的变化,植被因子与水土保持因子对土壤侵蚀的抑制作用增加;2029年延安市土壤侵蚀状况持续改善,极强烈侵蚀、剧烈侵蚀的面积下降,但北部区域依然存在着局部侵蚀恶化的问题。

#### 参考文献(References):

- [1] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J].水土保持学报,2022,36(3):130-137.  
Wang Y N, Kong X B, Zhao C J, et al. Change of vegetation coverage in the Loess Plateau from 2000 to 2020 and its spatiotemporal pattern analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):130-137.
- [2] 计伟,刘海江,高吉喜,等.黄河流域生态质量时空变化分析[J].环境科学研究,2021,34(7):1700-1709.  
Ji W, Liu H J, Gao J X, et al. Spatial-temporal variations of ecological quality in the Yellow River Basin[J]. Research of

Environmental Sciences, 2021,34(7):1700-1709.

- [3] 国家发展改革委,水利部,农业部,等.黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)[EB/OL]. https://www.gov.cn/govweb/zwgk/2011-01/17/content\_1786454.htm, 2010-01-17/2023-06-15.  
National Development and Reform Commission, ministry of Water Resources of the People's Republic of China, ministry of Agriculture of the People's Republic of China, et al. Comprehensive Plan Outlines of the Loess Plateau(2010-2030)[EB/OL]. https://www.gov.cn/govweb/zwgk/2011-01/17/content\_1786454.htm, 2010-01-17/2023-06-15.
- [4] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等.近15 a黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.  
Liu M X, Zhao R D, Shao P, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018,41(1):99-108.
- [5] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].自然资源学报,2017,32(3):449-460.  
Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(3):449-460.
- [6] 周广胜,周莉,汲玉河,等.黄河水生态承载力的流域整体性和时空连通性[J].科学通报,2021,66(22):2785-2792.  
Zhou G S, Zhou L, Ji Y H, et al. Basin integrity and temporal-spatial connectivity of the water ecological carrying capacity of the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 2021,66(22):2785-2792.
- [7] 孙从建,张文强,李新功,等.基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价[J].农业工程学报,2019,35(12):165-172.  
Sun C J, Zhang W Q, Li X G, et al. Evaluation of ecological effect of Gully Region of Loess Plateau based on remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(12):165-172.
- [8] 马琪,刘康,李婷,等.陕北生态恢复区不同草地主导服务功能时空变化[J].农业机械学报,2018,49(2):260-268.  
Ma Q, Liu K, Li T, et al. Temporal and spatial variation of grassland dominant ecosystem services under major ecological restoration in northern Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2):260-268.
- [9] 周璐红,王盼婷,曹瑞超.2000—2020年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价[J].生态与农村环境学报,2022,38(4):511-520.  
Zhou L H, Wang P T, Cao R C. Soil erosion driving

- factors and ecological security evaluation for Yan'an city from 2000 to 2020[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4):511-520.
- [10] 谢明阳,焦春萌,韩小雨,等.1990—2020年延安市土壤侵蚀演变及其时空偏移特征[J].*水土保持通报*, 2022, 42(5):187-192, 212.
- Xie M Y, Jiao C M, Han X Y, et al. Evolution and spatial-temporal shift characteristics of soil erosion in Yan'an city during 1990—2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):187-192, 212.
- [11] 董起广,韩霁昌,张卫华,等.延安市土地利用与土壤侵蚀关系研究[J].*人民黄河*, 2016, 38(4):79-81, 128.
- Dong Q G, Han J C, Zhang W H, et al. Research of relationship between land use and soil erosion in Yan'an city[J]. *Yellow River*, 2016, 38(4):79-81, 128.
- [12] 刘悦,刚成诚,温仲明,等.降雨和植被因子对延河流域土壤侵蚀影响的定量评估[J].*水土保持通报*, 2021, 41(2):35-42, 353.
- Liu Y, Gang C C, Wen Z M, et al. Quantifying relative contributions of rainfall and vegetation on soil erosion in Yanhe River watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):35-42, 353.
- [13] 苏娜,王志杰,杨瑞,等.基于RUSLE的陕南地区土壤侵蚀时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2018, 25(5):1-11.
- Su Y, Wang Z J, Yang R, et al. SpatioTemporal variation characteristics of soil erosion in southern Shaanxi region based on RUSLE[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5):1-11.
- [14] 张素,熊东红,吴汉,等.基于RUSLE模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征[J].*水土保持学报*, 2021, 35(5):24-30.
- Zhang S, Xiong D H, Wu H, et al. Research on spatial variation of soil erosion in Sunshui River Basin based on RUSLE model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5):24-30.
- [15] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].*农业工程学报*, 2020, 36(16):110-117.
- Zhang X Y, Qiao B L, Li J Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(16):110-117.
- [16] 黄俊,金平伟,姜学兵,等.南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证[J].*农业工程学报*, 2020, 36(17):106-114.
- Huang J, Jin P W, Jiang X B, et al. Model construction and verification of vegetation cover and management factor in southern red soil region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17):106-114.
- [17] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978.
- [18] Wischmeier W H. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain[R]. *Agriculture handbook*, 1965.
- [19] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1990, 329(1255):421-428.
- [20] McCool 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.
- [21] 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.
- [22] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- Liu B Y, Bi X G, Fu S H, et al. Beijing Soil Loss Equation[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [23] 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.
- [24] 胡刚,宋慧,石星军,等.基于RUSLE的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J].*地理科学*, 2018, 38(4):610-617.
- Hu G, Song H, Shi X J, et al. Soil erosion characteristics based on RUSLE in the wohushan reservoir watershed[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4):610-617.
- [25] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波.基于遥感和ULSE模型评价1995—2005年江西土壤侵蚀[J].*中国环境科学*, 2011, 31(7):1197-1203.
- Qi S H, Jiang M X, Yu X B. Evaluating soil erosion in Jiangxi Province with USLE model and remote sensing technology during 1995—2005[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(7):1197-1203.
- [26] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL190—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: SL190—2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.



- ship between vegetation change and runoff-sediment; A case of the Yanhe Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 75-81.
- [20] 徐家隆. 汾川河仕望河流域水土保持措施的减水减沙效益研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- Xu J L. Study on water and sediment reduction benefits of soil and water conservation measures in Shiwang River Basin of Fenchuan River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [21] 付艳玲. 近 50 年来黄河中游典型流域水沙变化趋势分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- Fu Y L. Trend of Streamflow, sediment load and their dynamic relation at watershed in the middle reaches of Yellow River during the past five decades[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2011.
- [22] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514.
- Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [23] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学, 2011, 33(11): 2143-2149.
- Zhang C, Ren Z Y. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2011, 33(11): 2143-2149.
- [24] 修丽娜, 颜长珍, 钱大文, 等. 生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 214-221, 228, 2.
- Xiu L N, Yan C Z, Qian D W, et al. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 214-221, 228, 2.
- [25] 雷向杰, 李芳, 赵晓萌. 延安市 2013 年 7 月极端连续降水致灾评估分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(6): 521-528.
- Lei X J, Li F, Zhao X M. Evaluation and analysis of extreme continuous precipitation induced disasters of Yan'an city in 2013 July[J]. Torrential Rain and Disasters, 2016, 35(6): 521-528.

(上接第 41 页)

- [27] Ang B W, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 238-246.
- [28] 陈浩, 张晓萍, 权伟, 等. 退耕还林前后北洛河上游流域土壤侵蚀时空变化分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(6): 111-116, 127.
- Chen H, Zhang X P, Quan W, et al. Spatial and temporal changes of soil erosion in the upper reaches of Beiluo River Watershed Before and After the Grain for Green Project[J]. Yellow River, 2023, 45(6): 111-116, 127.
- [29] 赵文启, 刘宇, 罗明良, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 89-94.
- Zhao W Q, Liu Y, Luo M L, et al. Effect of revegetation on soil erosion in small watershed of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 89-94.
- [30] 杨波, 王全九, 郭思琪. 1988—2013 年陕北风沙区秃尾河流域土壤侵蚀时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 56-65.
- Yang B, Wang Q J, Guo S Q. Characteristic of temporal and spatial variation of soil erosion in Tuwei River watershed from 1988 to 2013[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 56-65.
- [31] 杨强, 何立恒, 鲍其胜. 延安市 1980—2010 年气温和降水的年际变化特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 179-183.
- Yang Q, He L H, Bao Q S. Characteristics of annual change in temperature and precipitation in Yan'an region during 1980-2010[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(6): 179-183.
- [32] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 1951—2013 年延安降水特征与典型暴雨分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 190-197.
- Li B, Xie J C, Hu Y H, et al. Precipitation characteristics and typical rainstorm in Yan'an during 1951—2013[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(12): 190-197.
- [33] 聂桐, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 340-346.
- Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of vegetation coverage in Yan'an area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 340-346.