

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.006.

朱启明, 王宁, 刘俊娥, 等. 陕北生态脆弱区土壤水蚀变化及驱动因子分析:以榆林市为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 41-51, 60.

ZHU Qiming, WANG Ning, LIU June, et al. Analysis of Soil Water Erosion Changes and Driving Factors in Ecologically Fragile Areas in Northern Shaanxi Province: Taking Yulin City as an Example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 41-51, 60.

# 陕北生态脆弱区土壤水蚀变化及驱动因子

## ——以榆林市为例

朱启明, 王宁, 刘俊娥, 齐小倩, 程西科, 杜芳悦, 崔钦凯

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** [目的] 分析陕北生态脆弱区土壤水蚀的时空变化特征, 阐明影响土壤水蚀空间分布格局的驱动因子, 以为黄土高原生态脆弱区土壤水蚀治理和生态恢复提供一定的理论依据。[方法] 基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE), 选取降水、土壤属性、地形、遥感等多源数据, 估算榆林市 2000 年、2010 年和 2020 年的土壤水蚀量, 开展榆林市土壤水蚀的时空变化及驱动因子研究。[结果] 榆林市 2000 年、2010 年和 2020 年均以微度侵蚀为主。相较于 2000 年、2010 年和 2020 年榆林市强度侵蚀及以上的面积显著减少。榆林市南部土壤水蚀程度要高于北部, 其中南部局部地区土壤水蚀现象较为严重。2010 年土壤水蚀量( $5.339 \times 10^7$  t)较 2000 年( $1.124 \times 10^8$  t)大幅度下降, 而由于近年来榆林市降雨侵蚀力的增加, 2020 年的水蚀量( $6.864 \times 10^7$  t)则较 2010 年( $5.339 \times 10^7$  t)有小幅增加。榆林市的西南和东南由水蚀造成的流失量较北部更为严重, 尤以定边最为严重, 三年分别贡献了全市由水蚀造成的土壤流失量的 44.68%, 16.69%, 14.66%。中度及以下强度对榆林市土壤水蚀流失量贡献较大。驱动榆林市土壤水蚀形成空间分布差异的主要因子为地形及降雨, 不同因子的交互作用增加了对水蚀程度的影响, 不同地貌区间的驱动因子也有较明显的差异。在 2000 年和 2010 年, 榆林东部覆盖度为 40%~50% 的山区砂质陡坡发生强烈水蚀的风险最高, 而 2020 年发生剧烈土壤水蚀风险最高的地区为覆盖度为 30%~40% 的砂质平原地区。[结论] 榆林市土壤水蚀状况在 2000 年、2010 年和 2020 年三年间发生了变化, 且水蚀分布格局主要受到地形和降雨因子的驱动, 未来还需进一步优化模型因子, 以提高模型对中等以下侵蚀强度的预测精度。

**关键词:** RUSLE 模型; 榆林; 地理探测器; 时空变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0041-11

## Soil Water Erosion Changes and Driving Factors in Ecologically

## Fragile Areas in Northern Shaanxi Province

### —Taking Yulin City as an Example

ZHU Qiming, WANG Ning, LIU June, QI Xiaoqian, CHENG Xike, DU Fangyue, CUI Qinkai

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to analyze the spatial and temporal characteristics of soil water erosion in ecologically fragile areas of northern Shaanxi Province and elucidate the driving factors affecting the spatial distribution pattern of soil water erosion, with a view to providing some theoretical basis for soil water erosion management and ecological restoration in ecologically fragile areas of the Loess Plateau. [Methods] Based on modified universal soil loss equation (RUSLE) model, multi-source data such as precipitation, soil properties, topography and remote sensing were selected to estimate soil water erosion in Yulin

收稿日期: 2022-08-02

修回日期: 2022-08-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077058, 41601282); 陕西省高校科协青年人才托举计划资助(20210705); 中央高校基本科研业务费项目(GK202103150, GK20201003)

第一作者: 朱启明(1999—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: qimingzhu@snnu.edu.cn

通信作者: 刘俊娥(1987—), 女, 山西河曲人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: liujune5@snnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

in 2000, 2010 and 2020 in order to carry out a study on the spatial and temporal variation and driving factors of soil water erosion in Yulin. [Results] Slight erosion dominated in Yulin in 2000, 2010 and 2020. Compared with 2000, the area of Yulin with intensity erosion and above significantly reduced in 2010 and 2020. Soil water erosion rate was higher in the southern part of Yulin than the northern part, where soil water erosion was more serious in the southern part locally. Soil water erosion in 2010 ( $5.339 \times 10^7$  t) decreased significantly compared with 2000 ( $1.124 \times 10^8$  t), while water erosion in 2020 ( $6.864 \times 10^7$  t) increased slightly compared with 2010 ( $5.339 \times 10^7$  t) due to the increase in erosive power of rainfall in Yulin in recent years. The loss caused by water erosion was more serious in the southwest part and southeast region of Yulin than in the north, especially in Dingbian, which contributed 44.68%, 16.69%, and 14.66% of soil losses of Yulin caused by water erosion in three years, respectively. The moderate intensity and below contributed more to the soil water erosion loss in Yulin. The main factors driving the differences in the spatial distribution of soil water erosion formation in Yulin were topography and rainfall, and the interaction of different factors increased the influence on the degree of water erosion, and there were also more obvious differences in the driving factors between different geomorphic zones. In 2000 and 2010, the risk of intense water erosion was highest in the sandy steep slopes of the mountains with 40%~50% cover in eastern Yulin, while the highest risk of intense soil water erosion in 2020 was in the sandy plain areas with 30%~40% cover. [Conclusion] The soil water erosion condition in Yulin had changed during the years 2000, 2010 and 2020, and the distribution pattern of water erosion was mainly driven by topography and rainfall factors, and further optimization of model factors is needed in the future to improve the accuracy of model prediction for sub-moderate erosion intensity.

**Keywords:** RUSLE model; Yulin; Geodetector; spatial and temporal variation

陕北地区位于农牧交错带的中部地区,受到风沙作用、干旱气候、复杂地形的剧烈影响,加之大量开发矿产资源,生态环境遭到严重破坏,是黄土高原地区典型的生态脆弱区。而土壤侵蚀是陕北生态脆弱区面临的最为严重的生态环境问题之一<sup>[1]</sup>。该地区剧烈的水土流失加剧了黄河下游河道泥沙淤积,严重阻碍了当地经济生态发展<sup>[2-4]</sup>。榆林市地处黄土高原的中北部,是陕北地区典型生态脆弱区。随着退耕还林(草)、防沙治沙工程等生态工程的开展,榆林市生态得到了较好恢复,土地利用更趋于合理,地表植被覆盖得到改善<sup>[5-6]</sup>。同时,榆林市气候逐渐呈现出暖湿化的特征,气候变化逐渐活跃<sup>[7-8]</sup>。气候、植被、人为活动等因素的综合影响导致榆林市土壤侵蚀状况也发生了显著的时空变化,许多学者对此进行了研究:郝慧梅等<sup>[9]</sup>基于LUCC量化榆林市土壤水蚀量及土壤生态保持状况。李柏延等<sup>[10]</sup>基于USLE模型分析了2000—2010年年际间水力侵蚀面积及侵蚀模数变化。杨波等<sup>[11]</sup>在估算榆林市2000—2013年土壤侵蚀模数的同时还对榆林市水土保持经济价值进行了评估。杨波等<sup>[12]</sup>基于土壤侵蚀背景下研究了榆林市土壤营养元素的变化。王泽宇等<sup>[13]</sup>定量计算了退耕还林工程前后土壤水蚀量及生态价值。

以往研究主要集中于对榆林市土壤侵蚀空间变

化分析及土壤水蚀背景下的土壤生态指标的量化研究,而目前对于榆林市土壤水蚀的驱动因子研究还较少。榆林市位于黄土高原水蚀风蚀交错区,自然环境极为复杂,空间异质性较为显著,不同自然要素及人类活动对于土壤侵蚀的影响程度各不相同。因其可以较好地探测分析区域内的空间异质性及驱动因子,王劲峰等<sup>[14]</sup>研发的地理探测器已开始用于不同侵蚀模型下土壤水蚀的空间异质性及影响因子分析。王欢等<sup>[15]</sup>基于RUSLE模型的基础上应用了地理探测器对喀斯特不同地貌区的侵蚀因子定量分析。陈锐银等<sup>[16]</sup>借助探测器工具分析四川省土壤侵蚀防治区内的侵蚀驱动因子。贾磊等<sup>[17]</sup>利用RUSLE模型分析了影响渭河流域土壤侵蚀空间分布的因素。黄硕文等<sup>[18]</sup>依据RUSLE模型分析了河南省2008年起十年间引起土壤侵蚀的潜在驱动因子。以上研究均表明,地理探测器可以广泛地应用于RUSLE土壤侵蚀经验模型,并准确地分析得到造成土壤侵蚀的潜在因子。

同时,自20世纪90年代起,RUSLE模型就广泛地应用于我国区域尺度上的土壤侵蚀研究<sup>[19]</sup>,而近年来,RUSLE模型在陕北地区也得到了应用<sup>[20-22]</sup>,其对土壤水蚀的估算也较为准确。因此,为了研究陕北地区典型生态脆弱区的土壤侵蚀时空变化及驱动因子,本研究选取陕西省榆林市为研究区,基于RUSLE模型,收集降

水、土壤属性、地形、遥感等多源数据,在估算 2000 年、2010 年、2020 年榆林市土壤水蚀模数的基础上分析榆林市土壤侵蚀的时空变化特征,并借助地理探测器工具,分析导致榆林市土壤水蚀空间分布格局的影响因子,以期为黄土高原生态脆弱区土壤侵蚀治理和生态恢复提供一定的理论依据。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

榆林市位于陕西省最北部(北纬  $36^{\circ}57'$ — $39^{\circ}35'$ ,东经  $107^{\circ}28'$ — $111^{\circ}15'$ ),面积  $42\,920.2\text{ km}^2$  辖 1 市 2 区 9 县(图 1)。地貌类型为风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区和梁状低山丘陵区,地势呈现出西南高东北低的特点。气候类型为暖温带半干旱向半湿润气候过渡区,年均降水量不足  $400\text{ mm}$ ,降雨多集中在 7 月、8 月份。榆林市土壤以黄绵土、风沙土和新积土为主,砂多土少。独特的自然环境条件,加之不合理的人类活动,导致榆林市水土流失十分严重,是黄河中游水土流失最严重的区域之一。

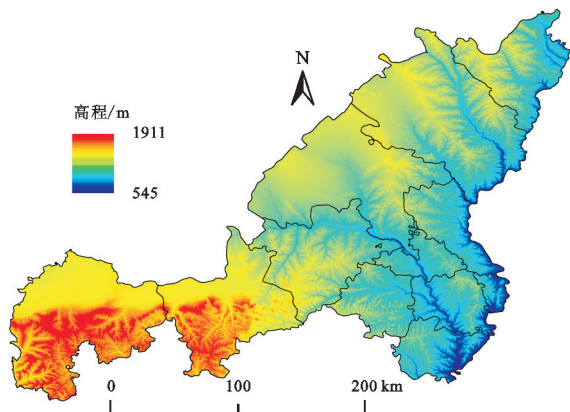


图 1 研究区概况

### 1.2 数据来源

本研究使用数据如下:降水数据来自美国国家气候数据中心(NCDC, National Climatic Data Center)公布的“1942 年以来的中国地面气象数据”(ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/)和中国气象数据网(http://data.cma.cn/)发布的“中国地面气候资料日数据集(V3.0)”,选取了榆林市内及其周边合计 14 个气象站点的降水数据,用于计算降雨侵蚀力因子。土壤数据采用国家青藏高原科学数据中心网站(http://www.ncdc.ac.cn/portal/)的 1:100 万基于世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集,获取其中土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒含量)以及土壤有机质数据,用于计算土壤可蚀性因子。DEM 数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/),空间分辨率为  $30\text{ m}$ ,用于计算坡长坡度因子。遥感影

像来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)提供的分辨率为  $30\text{ m}$  的 Landsat4-5 TM 遥感影像数据和 Landsat8 OLI\_TIRS 遥感影像数据,用以计算 2000 年、2010 年以及 2020 年的植被覆盖管理因子。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(https://www.resdc.cn/)提供的中国土地利用数据(2000 年、2010 年、2020 年),空间分辨率为  $30\text{ m}$ ,用以计算水土保持措施因子。地理探测器分析所使用的地貌数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)所提供的中国 100 万地貌类型空间分布数据。

## 2 计算方法

### 2.1 RUSLE 模型

本研究采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)<sup>[23]</sup>估算土壤侵蚀模数,公式为:

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

式中: $A$  为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ;  $LS$  为坡长坡度因子,无量纲;  $C$  为植被覆盖与作物管理因子,无量纲;  $P$  为水土保持措施因子,无量纲。

### 2.2 模型因子计算

2.2.1 降雨侵蚀力因子 降雨是造成土壤侵蚀最重要的因子,降雨侵蚀力因子反映了侵蚀性降雨对于土壤侵蚀的影响。根据谢云等<sup>[24]</sup>的研究,黄土高原地区的日侵蚀性降雨值为  $12\text{ mm}$ ,即日降水量大于或等于  $12\text{ mm}$  为侵蚀性降雨。本研究采用章文波等<sup>[25]</sup>提出的基于日降雨量资料的降雨侵蚀力计算方法,即利用半月内侵蚀性降雨来计算降雨侵蚀力,计算公式如下:

$$R = \sum_{j=1}^{24} R_{\text{hm}} \quad (2)$$

$$R_{\text{hm}} = \alpha \sum_{y=1}^j (P_i)^\beta \quad (3)$$

式中: $R$  为年降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $R_{\text{hm}}$  为半月降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ,每个月分为 2 个半月,其中第 1 个半月为每月前 15 d,剩余天数则作为每月的第 2 个半月,因此每年可划分为 24 个半月; $j$  为半月内侵蚀性降雨( $\geq 12\text{ mm}$ )的天数; $R_{\text{hm}}$  为半月内第  $j$  日的侵蚀性降雨( $\geq 12\text{ mm}$ )雨量( $\text{mm}$ ), $\alpha$  和  $\beta$  为参数,无量纲。计算方法如下:

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_d} + \frac{24.455}{P_y} \quad (5)$$

式中: $P_d$  为侵蚀性降雨( $\geq 12\text{ mm}$ )的日平均值( $\text{mm}$ );

$P_y$  为侵蚀性降雨( $\geq 12$  mm)的年平均值(mm)。

本研究根据日降水量数据依次计算出三年中榆林市周围 14 个气象站点的降雨侵蚀力,并在此基础上采用普通克里金插值计算分别得到上述三年榆林市全市范围内的降雨侵蚀力因子。

**2.2.2 土壤可蚀性因子** 土壤可蚀性因子反映了土壤性质对于土壤侵蚀的敏感程度。经验证,在小流域内采用 EPIC 算法估算的土壤可蚀性因子与实际值无明显差异<sup>[26]</sup>,故本研究中计算采用 EPIC 模型估算土壤可蚀性因子,具体计算过程如下:

$$K=0.1317 \times \left\{ 0.2 + 0.3 \times \left[ -0.0256 \times S_{AN} \left( 1 - \frac{S_{IL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}} \right)^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25C_o}{C_o + \exp(3.72 - 2.95C_o)} \right] \times \left[ 1.0 - \frac{0.7S_{NI}}{S_{NI} + \exp(-5.51 + 22.9S_{NI})} \right] \quad (6)$$

$$S_{NI} = 1 - \frac{S_{AN}}{100} \quad (7)$$

式中:0.131 7 为转换系数; $S_{AN}$  为土壤砂粒(0.1~2 mm)构成百分比(%); $S_{IL}$  为粉粒(0.002~0.1 mm)构成百分比(%); $S_{AL}$  为黏粒( $<0.002$  mm)构成百分比(%); $C_o$  为土壤有机碳含量(%)。

**2.2.3 坡长坡度因子** 坡长和与坡度表征了地形因素对于土壤侵蚀量的影响。本研究采用符素华等<sup>[27]</sup>研发的 Launch LS 地形因子计算软件计算坡长坡度因子。

**2.2.4 植被覆盖与作物管理因子** 植被覆盖与作物管理因子是在不同植被覆盖以及管理条件下土壤流失量与土壤流失总量的比值<sup>[23]</sup>,反映了植被对于土壤侵蚀的削弱作用。 $C$  因子值在 0~1,因子值越大说明植被对土壤的保持作用越弱。本研究使用蔡崇法等<sup>[26]</sup>所提出的基于覆盖度的  $C$  值估算方法,具体公式如下:

$$f = \frac{N_{NDVI} - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} 1 & f=0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f$  为植被覆盖度(%); $N_{NDVI}$  为归一化植被指数; $N_{\min}$  为归一化植被指数的最小值; $N_{\max}$  为归一化植被指数的最大值。

首先使用 ENVI 计算出 2000 年、2010 年、2020 年榆林的覆盖度数据,再通过覆盖度间接计算得到  $C$  因子。

**2.2.5 水土保持措施因子** 水土保持措施因子表示采取相应的水土保持措施的土壤流失量与未采取措

施的土壤流失数值的比值,表征了人工水土保持措施对于土壤侵蚀的抑制。参考前人研究<sup>[28-31]</sup>,分别对不同土地利用类型的  $P$  值进行赋值,其中耕地按照不同的坡度进行赋值,具体详见表 1。

表 1 不同土地利用类型的水土保持措施因子

土地利用类型	坡度/(°)	$P$ 值
耕地	$\leq 5$	0.100
	$>5 \sim 10$	0.221
	$>10 \sim 15$	0.305
	$>15 \sim 20$	0.575
	$>20 \sim 25$	0.705
	$>25$	0.800
林地		1
草地		1
水域		0
建筑用地		0
未利用土地		1

在上述 5 个因子计算完成之后,将其空间分辨率都转换为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,利用 ArcGIS 软件中的栅格计算器进行计算。

## 2.3 地理探测器

空间异质性是指属性值或现象在不同空间位置之间超出随机变异的差异,即某种地理现象在空间上表现出差空间差异的。地理探测器是由王劲峰等<sup>[14]</sup>开发的探测与分析空间分异性的工具,主要包括分异及因子、交互作用、风险区和生态共 4 个探测器。分异及因子探测器是通过分析比较  $q$  值<sup>[32]</sup>的大小来解释不同因子对于空间分异现象的影响能力。 $q$  值计算方法如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (10)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (11)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (12)$$

式中: $h$  为分区或分类个数; $N_h$  和  $N$  分别为第  $h$  个分区的小单元数和全区的单元数; $\sigma_h$  和  $\sigma$  分别为第  $h$  个分区属性值的方差和全区属性值的方差。 $SSW$  和  $SST$  依次为分区内方差和以及全区的总方差。

交互作用探测器可以通过比较不同因子的交互作用和单个因子作用的  $q$  值,评估出是否因子间的交互作用对地理现象产生明显影响以及各个因子之间的影响是否彼此独立。风险探测器用来判断不同分类条件之下的分区之间的均值是否有显著差异。

本研究使用地理探测器中的分异及因子探测器分析单个因子对于土壤侵蚀强度的影响,使用交互作用探测器比较和分析不同因子组合对于土壤侵蚀强度的影响,使用风险探测器识别出高土壤侵蚀强度的



区域。气候、土壤、地形、植被、土地利用类型等因素都会影响土壤侵蚀的程度<sup>[33]</sup>,因此本研究选取降雨侵蚀力、植被覆盖度、坡度、海拔、土地利用类型、地貌类型、土壤类型作为探测器输入的自变量。根据王劲峰等<sup>[14]</sup>所提出的数据离散化处理办法并参照相关研究<sup>[15,31,34-35]</sup>,将不同年份的降雨侵蚀力按照等间距法分为 6 类;将植被覆盖度按 $\leq 0.3$ , $>0.3\sim 0.4$ , $0.4\sim 0.5$ , $0.5\sim 0.6$ , $0.6\sim 0.7$ , $0.7\sim 0.8$ , $0.8\sim 0.9$ , $0.9\sim 1.0$ 分为 8 类;将坡度按照 $\leq 5^\circ$ , $>5^\circ\sim 10^\circ$ , $>10^\circ\sim 15^\circ$ , $>15^\circ\sim 20^\circ$ , $>20^\circ\sim 25^\circ$ , $>25^\circ\sim 30^\circ$ , $>30^\circ\sim 35^\circ$ , $>35^\circ$ 分为 8 类;海拔按照等间距法平均分成 9 类;土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用土地共 6 类;土壤类型根据其机械组成照国际制依次分为砂土及壤质砂土、砂质壤土、粉砂质黏壤土、黏壤土、粉砂质黏土、砂质黏土和黏土共 7 类。在研究区域内随机布设 10 000 个点,收集每个点的土壤水蚀强度、降雨侵蚀力、植被覆盖度、坡度、海拔、土地利用类型和土壤类型的分类后等级数据作为地理探测器输入的自变量数据。在上述离散化操作下,在研究区域内随机选取 5 000 个点,将带有上述 7 类属性数据的点数据输入地理探测器进行驱动因子分析。

3 结果和分析

3.1 土壤水蚀估算结果验证

将估算所得结果按照根据《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[36]</sup>进行侵蚀强度分级,见图 2。参考《2020 年陕西省水土保持公报》中的各县市水土流失情况的统计数据(表 2),对预测值分级后得到的面积与统计值之间的平均误差为 15.85%,误差值在 2.39%~38.27%。考虑到榆林市部分地区缺少相关数据,预测土壤水蚀量进行分级所得的不同强度面积与公报中的统计面积较为接近。同时,参考周璐红等<sup>[31]</sup>对于延安市土壤侵蚀量的检验,对照《中国河流泥沙公报》提供的无定河(白家川站)多年输沙模数 3 190 t/(km<sup>2</sup>·a),本研究估算的无定河流域 2000 年、2010 年、2020 年三年平均输沙模数为 2 723.42 t/(km<sup>2</sup>·a)也较为接近,误差为 14.63%。黄河流域泥沙量受到径流量、气候变化和人类活动的影响,因此具有极其复杂的不确定性。考虑到上述不确定性,可能导致估算的输沙模数与无定河实际输沙模数有一定的差距。综上,采用 RUSLE 模型进行榆林市土壤水蚀的估算结果较为理想,可以对结果进行进一步分析。

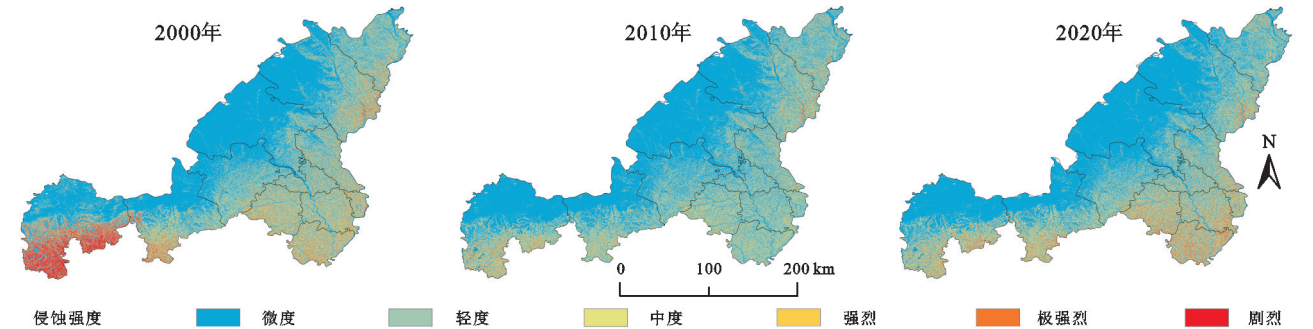


图 2 榆林市 2000 年、2010 年、2020 年土壤水蚀状况

表 2 榆林市 2000 年、2010 年、2020 年土壤水蚀强度面积及面积占比

年份	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈	
	$\leq 1000$ t/(km <sup>2</sup> ·a)		$>1000\sim 2500$ t/(km <sup>2</sup> ·a)		$>2500\sim 5000$ t/(km <sup>2</sup> ·a)		$>5000\sim 8000$ t/(km <sup>2</sup> ·a)		$>8000\sim 15000$ t/(km <sup>2</sup> ·a)		$>15000$ t/(km <sup>2</sup> ·a)	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
2000 年估算值	27222.37	63.89	5055.65	11.86	4244.71	9.96	2524.96	5.93	2192.04	5.14	1374.20	3.22
2010 年估算值	29393.66	68.98	5866.08	13.77	4380.60	10.28	1986.67	4.66	917.21	2.15	69.70	0.16
2020 年估算值	28845.96	67.79	5020.14	11.80	4113.81	9.67	2347.09	5.52	1822.85	4.28	399.82	0.94
2020 年公报统计数据	24418.89	62.41	8131.95	16.52	5564.57	11.30	2637.12	5.36	1780.41	3.62	389.29	0.79

3.2 土壤水蚀时空变化

3.2.1 土壤水蚀时间变化分析 2000 年、2010 年、2020 年平均土壤水蚀模数依次为 2638, 1 253, 1 630 t/(km<sup>2</sup>·a), 平均水蚀强度分别为中度、轻度和轻度。与 2000 年相比,2010 年与 2020 年平均水蚀模数分别下降了 52.80%和 38.21%,平均水蚀强度也都降为轻度,水蚀情况得到缓解。由表 2 可知,2000 年、2010 年、2020 年水蚀强度皆以微度为主。与

2000 年相比,2010 年和 2020 年强烈及其以上强度的水蚀面积大大减少,尤其是极强烈和剧烈侵蚀,较 2000 年分别减少了 2 579.33,1 343.57 km<sup>2</sup>,面积占比也依次减少了 7.32%,3.55%。2000—2010 年有 75.64%(32 232.21 km<sup>2</sup>)地区的水蚀强度保持不变,有 21.67%(9 236.24 km<sup>2</sup>)的地区强度降低,仅有 2.68%(1 145.22 km<sup>2</sup>)的水蚀强度加剧。2010—2020 年有 80.52%(34 253.13 km<sup>2</sup>)地区的强度维持不变,

但水蚀强度增加的面积( $6\,105.87\text{ km}^2$ )要显著大于强度降低的面积( $2\,179.50\text{ km}^2$ )。总体而言,榆林市的水蚀强度以维持不变为主。2010年土壤水蚀量( $5.339\times 10^7\text{ t}$ )较2000年( $1.124\times 10^8\text{ t}$ )大幅度下降。2000—2010年这十年间,榆林市土壤水蚀总体上还是呈现变好的趋势;土壤流失状况得到缓解的面积远大于流失状况加剧的面积。自1999年退耕还林草工程开始实施,黄土高原地区下垫面植被状况得到恢复,耕地面积大幅度减少,林草地面积显著增加<sup>[37-38]</sup>,植被状况的改善和土地的合理利用大幅度减轻了土壤流失量。相较于2010年、2020年榆林市水蚀程度明显加剧;自80年代开始,极端降水频次变少,但近年来由于受到水汽增加,赤道太平洋海水温度,天气系统等多因素的复杂影响,黄土高原地区降水开始增加<sup>[39-41]</sup>。降雨是影响黄土高原地区土壤侵蚀最重要的因素之一<sup>[42]</sup>。随着降水的增加,降雨侵蚀力也在逐渐增加,2000年、2010年、2020年计算的平均降雨侵蚀力依次为 $465, 984, 1\,032\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ ,降雨增加一定程度上加剧了土壤侵蚀。

为了进一步分析不同水蚀强度的变化趋势,分别得到2000至2010年以及2010—2020年土壤水蚀强度的面积变化图(图3)。在2000—2010年,微度,轻度,中度,强烈,极强烈强度分别合计有547.07,

$309.72, 181.65, 87.81, 18.97\text{ km}^2$ 的区域水蚀强度加强;轻度,中度,强烈,极强烈,剧烈依次有合计 $2\,044.10, 2\,300.08, 1\,835.10, 1\,730.10, 1\,326.17\text{ km}^2$ 地区水蚀强度降低。水蚀强度加剧的区域集中在强烈及其以下的地区,但强度降低的区域较为均匀的分布在各强度,强度降低的面积远超过强度加深的面积,说明在此十年间,榆林市整体的水蚀状况得到了有效治理。

在2010—2020年,微度,轻度,中度,强烈,极强烈强度分别合计有 $1\,468.21, 1\,879.06, 1\,680.66, 879.77, 198.17\text{ km}^2$ 的区域侵蚀程度加强;轻度,中度,强烈,极强烈,剧烈依次有合计 $887.55, 680.47, 389.80, 193.93, 27.75\text{ km}^2$ 的区域侵蚀程度减少。在2010—2020年这十年间,除了极强烈强度区域,其余强度均有较大面积的区域侵蚀加强,而侵蚀强度降低的地区集中在强度为强烈及其以下的区域,并且强度减弱的面积小于强度加强的地区面积。相较于2000—2010年各个强度下土壤侵蚀加剧或减弱的面积,2010—2020年,各个强度侵蚀加剧的面积显著增加,而侵蚀减弱的面积也迅速减少。在土壤流失得到了有效治理的十年之后,榆林市土壤侵蚀在后十年内有增强的趋势。此外,侵蚀量的变化也表明了上述侵蚀增强的趋势:2020年的侵蚀量( $6.864\times 10^7\text{ t}$ )则较2010年( $5.339\times 10^7\text{ t}$ )有小幅增加。

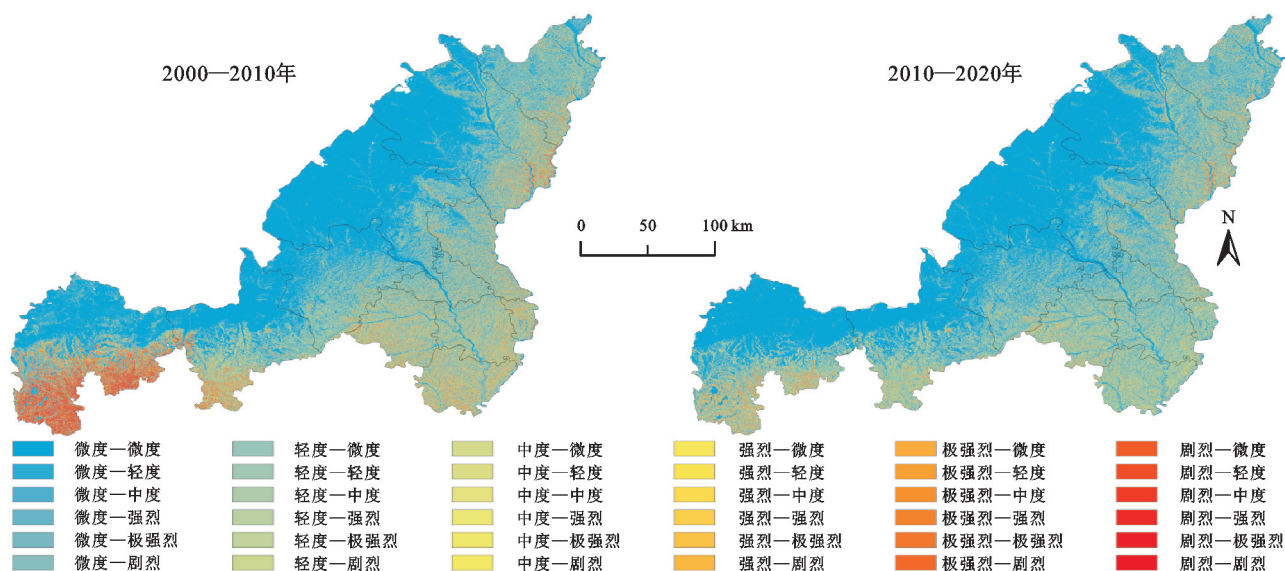


图3 榆林市2000—2010年及2010—2020年水蚀强度变化

**3.2.2 土壤侵蚀空间变化分析** 榆林市南部土壤水蚀程度要明显高于北部的土壤水蚀程度,局部地区土壤水蚀现象较为严重。为了进一步分析榆林市土壤水蚀的空间分布及变化,分别计算3个年份的榆林市各区县水蚀强度的面积及土壤流失量。由图4可知,2000年,定边县、清涧县、绥德县、吴堡县、子洲县遭受强烈及以上的水蚀的面积占比较大,尤其是清涧县和吴堡县,

强度及以上的水蚀面积占比均超过30%;横山县、神木县和榆阳区受水蚀程度较轻。2010年,清涧县、吴堡县和子洲县水蚀强度要略强于其他9个区县,横山县、靖边县、神木县和榆阳区水蚀程度相对较轻,横山县和榆阳区中度及以下水蚀面积占比都大于95%。2020年,清涧县、绥德县、吴堡县、子洲县有较大比例的区域遭受较强强度的水蚀,清涧县有占比多达37.59%遭受强烈



及以上的水蚀;相比而言,府谷县、横山县、神木县、榆阳区遭受较强强度的水蚀面积较少,占比都小于10%。结合上述三年结果,较强水蚀强度面积占比较大的区县(如定边、清涧、绥德、吴堡、子洲等)大致位于榆林市的西南部分和东南部分,而较强强度面积占比相对较小的区县(如横山、神木、榆阳等)大致位于榆林市的西北部。上述空间差异可能是由于地形和降水条件的差异导致。榆林市北部为风沙草滩区,地形较为平坦,水蚀较弱;南部为黄土高原丘陵沟壑区,地形崎岖,加剧了发生剧烈水蚀的可能<sup>[43]</sup>。此外,南部的丘陵沟壑区大多位于400~450 mm雨量带,而北部大多位于<400 mm雨量带内<sup>[44]</sup>,总体上降水量呈现出东南到西北递减的趋势。地形和降水条件的空间差异一定程度上导致了水蚀强度的空间分布格局。

为了进一步量化土壤水蚀程度,将不同区县的土壤水蚀量按照侵蚀强度来进行分级计算。在2000年,定边县土壤流失量最为严重,贡献了榆林市44.68%的土壤流失量,其余11个区县的贡献率在1.48%~8.74%。2010年,定边县及神木县土壤流失最为严重,分别贡献了全市土壤流失估算值的16.69%和16.47%,各区县的土壤流失量相较2000年有了显著减少。在2020年土壤流失最为严重的县区为定边县(14.66%)、清涧县(13.08%)、子洲县(11.57%)以及靖边县(11.34%)。各区县在不同年份对于榆林市土壤流失量贡献是不同的。植被覆盖度的变化和人为活动的影响可能造成了上述现象。以三年内水蚀贡献度最大的区县为例。在2000—2010年,除定边县和横山区之外,榆林市整体覆盖度处于极显著增加趋势,而在2010—2020年,清涧县和子洲县覆盖度显著下降,定边和靖边也呈现出不显著下降的趋势<sup>[45]</sup>。植被覆盖度下降的区县大多是土壤流失贡献程度大的地区。此外,土壤流失贡献量大的地区大多是能源基地建设地区(定边、神木、子洲、靖边)<sup>[46]</sup>,人为开采资源程度和城镇化迅速方面的差异一定程度上也造成了不同年份区县之间土壤流失贡献上的差异。此外,按照面积排名,神木、定边和靖边分在榆林市12个区县中分别位列第1,第3和第6。区县面积较大,也可能是造成在定边在这三年中、神木在2010年、靖边在2020年的土壤流失贡献值大的潜在原因。

上述两种不同标准评价的结果产生差异,说明对榆林市土壤侵蚀量贡献最大的地区并不是侵蚀强度较强的区域,而是中度强度及以下区域。虽然上述地区水蚀模数和水蚀强度相对较低,但是由于面积较大,较低强度造成的流失贡献度会较大。

### 3.3 土壤水蚀驱动因子分析

为了进一步探究榆林市土壤水蚀的驱动因子,利

用地理探测器对榆林市土壤水蚀的驱动因子进行分析(表3)。利用因子探测器输出结果表明:2000年各因子对榆林市土壤水蚀强度的影响由大到小依次为坡度( $q=0.50$ )>降雨( $q=0.20$ )>海拔( $q=0.15$ )>土壤类型( $q=0.12$ )>土地利用方式( $q=0.05$ )>覆盖度( $q=0.02$ ),2010年各因子对水蚀强度的影响由大到小依次为坡度( $q=0.48$ )>土壤类型( $q=0.09$ )>降雨( $q=0.09$ )>海拔( $q=0.07$ )>土地利用( $q=0.06$ )>覆盖度( $q=0.02$ ),2020年各因子对水蚀强度的影响由大到小依次为坡度( $q=0.52$ )>降雨( $q=0.20$ )>土壤类型( $q=0.11$ )>海拔( $q=0.10$ )>土地利用( $q=0.05$ )>覆盖度( $q=0.03$ ),各驱动因子均通过显著性检验。榆林市土壤水蚀程度的最主要影响因子为坡度,降雨和土壤类型影响程度则弱于坡度因子。地形和降水可以明显影响榆林市土壤水蚀空间分布,该这也佐证了上文土壤水蚀强度的空间分布结果,即榆林市南部水蚀要强于北部。不同年份下的坡度和土壤类型因子的 $q$ 统计值较为一致,说明在此20年间坡度和土壤类型此类表征自然环境因子对榆林土壤水蚀的驱动作用较为一致。因此,相较2000年和2020年、2010年的降水因子 $q$ 统计值要明显偏低。这可能是由于降水不稳定导致的,榆林位于半干旱地区,年际降水差异较大,降水较为不稳定。相较于2000年和2020年,榆林市2010年降水量明显较少<sup>[47-48]</sup>,降水量的减少降低了降水因子对于土壤水蚀的影响,因此导致降水因子的 $q$ 统计值发生变化。

坡度和海拔一定程度上均反映了地貌因素对于土壤水蚀的影响。此外,地貌因子也是重要的成土因子,地貌可以通过影响成土过程来间接影响土壤水蚀。榆林地貌特征较为复杂,因此很有必要对不同地貌区的土壤侵蚀因子进行分析。参考《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》,将榆林市地貌类型分为平原、台地、丘陵和山地合计4类,按上述4类地貌进行水蚀驱动因子的分析。相较于上述得到的榆林市整体的水蚀空间分布的驱动因子,不同地貌区相互之间的驱动因子 $q$ 检验值有所差异。同一驱动因子在不同地貌类型区对土壤水蚀的影响程度也不尽相同,其中降水和覆盖度因子在不同地貌区间的影响有较为明显的差异。坡度依然是各地貌类型区土壤水蚀的主要驱动因子,但覆盖度因子的 $q$ 检验值在不同年际间有差异。2010年和2020年各地貌区的覆盖度因子的 $q$ 检验值对比2000年要显著增强,说明植被对于土壤水蚀的抑制影响正在逐渐加强。随着退耕还林工程的逐步推进,黄土高原地区尤其是榆林市和延安市的植被覆盖度有了较大的提升<sup>[49-50]</sup>,但2010年后榆林市进入退耕还林巩

固时期<sup>[51]</sup>,植被覆盖度增长率开始变缓,因此2020年各地貌区中覆盖度因子的 $q$ 检验值与2010年较为接近,但较2000年仍然有显著提高。同时,降水因子的影响力在一定程度上也在逐渐削弱,这也佐证了植被覆盖度对土壤水蚀的抑制作用在逐渐加强。山地地貌的植被因子的 $q$ 检验值在不断提高,而其他因子对于土壤水蚀的影响出现了不同程度的下降,说明植被在山地地区具有较为显著的水土保持作用。2010年和2020年土地利用因子对于土壤水蚀的影响在不

同程度上的减弱,土地利用方式表征了人类活动对土壤水蚀的影响。榆林市林草地及建设用地面积显著提高<sup>[52-53]</sup>,人地矛盾得到缓解,土地利用方式的影响也在削弱。山地地区的土地利用因子的 $q$ 检验值较其他地形区要较高,说明土地利用方式对于山地地貌区水蚀的影响较其余地貌区更为显著。综上,由于不同地貌区的驱动因子影响不同,而同一驱动因子对不同地貌区的影响也不尽相同,因此,对榆林市的土壤水蚀进行分区防治很有必要。

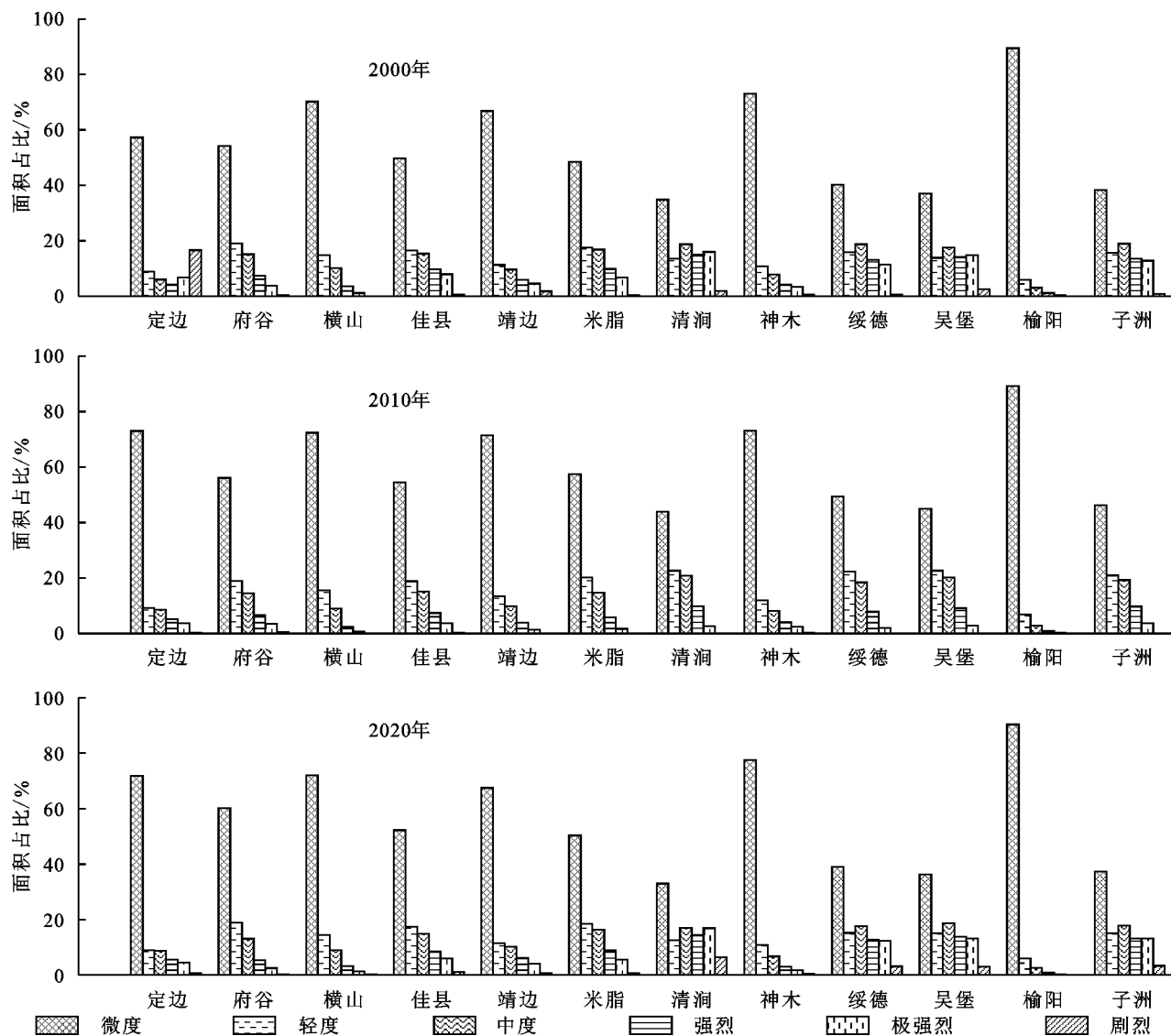


图4 不同年份榆林市各区县水蚀面积占比情况

土壤水蚀是一个多因素共同作用的复杂过程。为了研究不同因子间的交互作用对于土壤水蚀的影响,使用交互作用探测器进行分析(表4)。结果表明:因子之间的交互作用均为双因子增强和非线性增强,双重因子交互作用对于侵蚀的影响远大于独立的单因子的影响作用,其中坡度因子及降水因子与其他因子间的交互作用最为明显。例如:相较于单个的覆盖度因子,坡度与覆盖度的交互作用的 $q$ 值在2000

年、2010年、2020年分别增加了24.5,24.5,16.7倍,说明坡度和降水差异大的地区之间的土壤水蚀程度会有较为明显的差异。土地利用方式和覆盖度的交互作用对于土壤水蚀的影响最小, $q$ 统计量分别仅有0.07,0.07,0.08。由此可见,不同因子之间的交互作用对于土壤水蚀的影响有大有小,在进行水蚀防治的时候要充分考虑不同因子之间的交互作用并准确识别主要影响因素。



表 3 不同地貌类型土壤水蚀的驱动因子

年份	地貌类型	土地利用	降水	覆盖度	坡度	海拔	土壤类型
2000	平原	0.04	0.17	0.01	0.40	0.12	0.06
	台地	0.09	0.26	0.01	0.48	0.17	0.17
	丘陵	0.04	0.23	0.01	0.49	0.18	0.11
	山地	0.08	0.15	0.01	0.49	0.11	0.06
2010	平原	0.04	0.07	0.03	0.43	0.10	0.05
	台地	0.06	0.02	0.06	0.51	0.06	0.09
	丘陵	0.04	0.01	0.03	0.44	0.07	0.09
	山地	0.12	0.04	0.10	0.42	0.08	0.03
2020	平原	0.05	0.17	0.05	0.46	0.12	0.06
	台地	0.06	0.08	0.06	0.53	0.10	0.12
	丘陵	0.03	0.22	0.03	0.52	0.12	0.12
	山地	0.08	0.15	0.07	0.45	0.13	0.06

风险探测器结果表明(表 5):在 2000 年,土地利用类型为草地及林地,降雨侵蚀力为 820.41~896.88 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),覆盖度在 40%~50%,坡度>35°,海拔为 1 607.44~1 759.22 m,土壤类型为砂土及壤质砂土的地区土壤水蚀最为严重;在 2010 年,土地利用类型为草地和林地,降雨侵蚀力为 1 177.37~1 263.36 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),覆盖度在 40%~50%,坡度>35°,海拔为 1 607.44~1 759.22 m,土壤类型为砂土及壤质砂土的土壤水蚀最为严重;在 2020 年,土地利用类型为草地和林地,降雨侵蚀力为 1 763.44~1 933.33 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),覆盖度在 30%~50%,坡度>35°,海拔在 696.78~848.56 m,土壤类型为砂土及壤质砂土的地区土壤水蚀最为严

表 5 风险探测器结果

年份	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	植被 覆盖度/%	坡度/ (°)	海拔/ m	土地利用	土壤类型
2000	820.41~896.88	40%~50%	>35°	1607.44~1759.22	林地	砂土及壤质砂土
2010	1177.37~1263.36	40%~50%	>35°	1607.44~1759.22	林地	砂土及壤质砂土
2020	1763.44~1933.33	30%~40%	>35°	696.78~848.56	草地	砂土及壤质砂土

4 讨论

作为国内外应用广泛的土壤水蚀预测模型,近年来 RUSLE 模型常与“3S”技术结合起来被用于观测和预测大尺度范围的水土流失。榆林市既是黄土高原农牧交错带生态脆弱区,也是土壤侵蚀问题较为严重的地区之一。因此,了解榆林市土壤水蚀的时空变化特征、空间分布及驱动因素对精准治理陕北生态脆弱区的水土流失具有重要意义。本文基于 RUSLE 模型,研究了榆林市 2000—2020 年土壤流失的基本状况、时间演变趋势及空间分布特征,并利用地理探

表 4 交互作用探测器 q 值

参数	2000 年	2010 年	2020 年
土地利用∩降水	0.25	0.14	0.24
土地利用∩覆盖度	0.07	0.07	0.08
土地利用∩坡度	0.53	0.53	0.55
土地利用∩海拔	0.20	0.13	0.16
降水∩覆盖度	0.24	0.12	0.23
降水∩坡度	0.58	0.50	0.56
降水∩海拔	0.24	0.12	0.22
覆盖度∩坡度	0.51	0.51	0.53
覆盖度∩海拔	0.19	0.11	0.13
坡度∩海拔	0.56	0.49	0.53
土壤类型∩土地利用	0.17	0.14	0.15
土壤类型∩海拔	0.21	0.13	0.17
土壤类型∩坡度	0.51	0.49	0.53
土壤类型∩降水	0.26	0.14	0.22
土壤类型∩覆盖度	0.15	0.12	0.14

重。砂土及壤质砂土质地松散,土壤颗粒间隙大,有机质含量少,极易发生水蚀。根据研究<sup>[54-55]</sup>,土壤水蚀的临界盖度大致为 40%左右,一旦植被覆盖度超过临界盖度,土壤水蚀量便会大幅下降。同时,由于特殊的地理位置和气候,榆林市的植被情况总体上呈现出自东向西递减的趋势<sup>[45]</sup>,覆盖度为 40%~50%的区域大多位于榆林市东部;东部地区的地势较高,坡度较陡,降水相对也充足。综上,位于榆林东部地区的覆盖度为 40%~50%的砂质陡坡土壤水蚀较为严重。随着近年来榆林市经济迅速发展,城镇建设用地迅速增加<sup>[52]</sup>,而城镇用地大部分位于海拔较低的平原地区,因此区别于 2000 年和 2010 年、2020 年海拔为 696.78~848.56 m 的地区发生严重水蚀的可能性最高。

测器研究榆林市土壤水蚀的驱动因子。结合统计数据,估算结果较为理想。

通过 RUSLE 模型估算的结果,相较于 2000 年、2010 年及 2020 年的土壤水蚀模数、平均侵蚀强度和中等以上侵蚀等级的面积都有显著减弱,但 2020 年水蚀程度较 2010 年有所增加。随着小流域治理、退耕还林草、“三北”防护林等黄土高原重大水土保持与生态工程的逐步推进,黄土高原地区土地利用结构、植被覆盖、土壤水文生态等都得到了较好的恢复<sup>[56-57]</sup>,土壤水蚀状况和主要河流泥沙量都显著减小。但是,自 2010 年后,退耕还林进入了巩固期,土壤水蚀量的减

少量较前十年要有显著下降。同时,随着大规模的植被恢复,黄土高原的降水量较植被恢复前有着显著增加<sup>[58]</sup>,降水量的增加一定程度上也会加剧土壤流失的风险。此外,随着工业及城市化进程的影响,榆林市自2010年起,大量的草地和未利用土地转变为工矿建设用地<sup>[59]</sup>,资源开采和建筑建设一定程度上也加剧了土壤流失。综上,在多因素的综合影响之下,2010年后十年的土壤水蚀程度要略微强于2010年前十年的水蚀状况。

榆林市地貌特征较为复杂,大致上可分为风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区和梁状低山丘陵区,东南和西南的定边、清涧、绥德等区县相对水蚀较为严重。地理探测器结果表明地形和降水因素是影响榆林市土壤水蚀的主要驱动因素,结合榆林市土壤水蚀程度的基本状况,需要重点关注北部丘陵沟壑区的治理。同时,不同地貌区的因子驱动机制也不尽相同,因此在制定防治政策时应注意分区防治,因地制宜,综合考虑多重因子对于不同地貌区的影响,重点关注榆林东部地区的覆盖度为40%~50%的山区陡坡。同时,在黄土高原暖湿化的大背景之下,恢复植被的同时,还需要加强关注未来降水因子对于土壤流失的潜在影响。

由于位于黄土高原地区典型水蚀风蚀交错区内,榆林市还受到剧烈的风蚀作用,本文仅考虑了榆林市水力侵蚀的时空变化及其驱动因子,未来还需进一步考虑风力侵蚀作用及风水复合侵蚀作用对于榆林市土壤流失的作用。由于影响土壤侵蚀的因素众多,加上数据获取的限制,本研究主要关注了覆盖度、降水、坡度等典型因子,未来若能加入GDP、人口密度等表征人为活动的因子进行因子分析,加强土壤水蚀与人为活动的关系研究,其结果将会更有实际指导价值。本研究的 $P$ 值选用直接依据土地利用方式和坡度进行直接赋值的方法,未来可依据高精度的遥感数据解译人工工程措施进而获取更为精确的 $P$ 因子<sup>[17,51]</sup>。与水文站实测输沙数据相比,本研究对水蚀强度为强烈及以上的预测较为准确,对中等及以下侵蚀强度的预测误差则相对较大,未来还需进一步优化模型因子,以提高模型对中等以下侵蚀强度的预测精度。

## 5 结论

(1) 榆林市2000年、2010年和2020年土壤水蚀均以微度侵蚀为主。2010年和2020年榆林市强度水蚀及其以上面积较2000年显著减少,但局部地区水蚀现象仍较为严重。(2) 相较于2000年、2010年榆林市土壤流失量大量减少,强度也以维持不变的居多。而2020年土壤流失量则较2010年则有所增加,

强度不变的地区居多。榆林市北部地区的水蚀状况较南部丘陵沟壑区要较轻,西南和东南地区土壤水蚀较为严重。中度强度及以下地区对榆林市土壤水蚀量贡献要显著大于强烈及以上地区。(3) 榆林市土壤水蚀的主要驱动因子为地形及降水,相较于单个因子,不同因子组合后的交互作用增加了对土壤水蚀的影响,特别是坡度和降水因子。在不同地貌区之间,因子对土壤水蚀的影响力有所差异。风险探测器表明在2000年和2010年覆盖度为40%~50%的砂质陡坡发生剧烈土壤水蚀的风险最高,随着榆林城镇化水平的提升,2020年发生剧烈土壤水蚀风险最高的地区为覆盖度为30%~40%的砂质平原地区。本研究结果可为榆林市及陕北生态脆弱区土壤侵蚀的预测和治理提供一定的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 邹亚荣,张增祥,周全斌,等.中国农牧交错区土地利用变化空间格局与驱动力分析[J].自然资源学报,2003,18(2):222-227.
- [2] 鄂竟平.中国水土流失与生态安全综合科学考察总结报告[J].中国水土保持,2008,2008(12):3-6.
- [3] 冉涛,邓伟.北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异[J].水土保持研究,2017,24(4):182-186,190.
- [4] 刘晓琼,刘彦随.基于AHP的生态脆弱区可持续发展评价研究:以陕西省榆林市为例[J].干旱区资源与环境,2009,23(5):19-23.
- [5] 李双双,延军平,万佳.近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [6] 史纪安,陈利顶,史俊通,等.榆林地区土地利用/覆被变化区域特征及其驱动机制分析[J].地理科学,2003,23(4):493-498.
- [7] 刘晓琼,刘彦随,延军平,等.生态脆弱区多年气候变化特征分析:以陕西榆林市为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(1):54-59.
- [8] 杨强,覃志豪,王涛,等.榆林地区1970—2010年气候因子变化特征分析[J].干旱区地理,2012,35(5):695-707.
- [9] 郝慧梅,任志远.区域LUCC的土壤侵蚀响应研究:以榆林市为例[J].干旱区研究,2008,25(4):583-591.
- [10] 李柏延,任志远,易浪.2001—2010年榆林市土壤侵蚀动态变化趋势[J].干旱区研究,2015,32(5):918-925.
- [11] 杨波,王全九,董莉丽.榆林市还林还草后水土保持功能和经济价值评价[J].干旱区研究,2017,34(6):1313-1322.
- [12] 杨波,王全九.退耕还林后榆林市土壤侵蚀和养分流失功效研究[J].水土保持学报,2016,30(4):57-63.
- [13] 王泽宇,陈旭阳,马彩诗,等.陕北榆林市退耕还林前后土壤侵蚀及生态服务价值变化[J].西北林学院学报,2021,36(3):59-67.
- [14] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

- [15] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
- [16] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2020,34(1):17-26.
- [17] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等.渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):305-314.
- [18] 黄硕文,李健,张欣佳,等.河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析[J].农业资源与环境学报,2021,38(2):232-240.
- [19] 赵明松,李德成,张甘霖,等.基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J].土壤学报,2016,53(1):28-38.
- [20] 翟睿洁,赵文武,贾立志.基于 RUSLE, InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究:以陕北延河流域为例[J].农业现代化研究,2020,41(6):1059-1068.
- [21] 谢怡凡,姚顺波,丁振民,等.退耕还林和地理特征对土壤侵蚀的关联影响:以陕西省 107 个县为例[J].生态学报,2022,42(1):301-312.
- [22] 王涛.基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀影响因素定量评估:以陕北洛河流域为例[J].环境科学与技术,2018,41(8):170-177.
- [23] Renard K G, Foster G R, Weesies, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [R]. Washington D C: Usda-Ars Agriculture Handbook 703, 1997:25-28.
- [24] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [25] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [26] 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.
- [27] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
- [28] 陈浩.黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019:7.
- [29] 郭思琪,韩磊,赵永华,等.秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局[J].生态学杂志,2019,38(7):2167-2176.
- [30] 覃杰香,王兆礼.基于 GIS 和 RUSLE 的从化市土壤侵蚀量预测研究[J].人民珠江,2011,32(2):37-41.
- [31] 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):512-520.
- [32] Wang J, Li X, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(1):107-127.
- [33] 王占礼.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].农业工程学报,2000,16(4):32-36.
- [34] 刘英,魏嘉莉,岳辉,等.神东矿区土壤侵蚀时空特征及驱动力分析[J].测绘科学,2022,47(1):142-153.
- [35] 牛丽楠,邵全琴,刘国波,等.六盘水市土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J].地球信息科学学报,2019,21(11):1755-1767.
- [36] 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.
- [37] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近 30 年黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293,400.
- [38] 郭建英,李锦荣,刘铁军,等.退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2013,20(5):1-6.
- [39] 李双双,孔锋,韩鹭,等.陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J].地理研究,2020,39(1):140-151.
- [40] 卢珊,胡泽勇,付春伟,等.黄土高原夏季极端降水及其成因分析[J].高原气象,2022,41(1):241-254.
- [41] 赵庆云,宋松涛,杨贵名,等.西北地区暴雨时空变化及异常年夏季环流特征[J].兰州大学学报:自然科学版,2014,50(4):517-522.
- [42] 王占礼,邵明安,常庆瑞.黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J].西北农业大学学报,1998,26(4):106-110.
- [43] 李奎,岳大鹏,刘鹏,等.基于 GIS 与 RUSLE 的榆林市土壤侵蚀空间分布研究[J].水土保持通报,2014,34(6):172-178,371.
- [44] 卞娟娟,郝志新,郑景云,等.1951—2010 年中国主要气候区划界线的移动[J].地理研究,2013,32(7):1179-1187.
- [45] 刘逸滨,刘宝元,成城,等.退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析[J].水土保持学报,2022,36(2):197-208,218.
- [46] 刘超,罗建美,霍永伟,等.陕西省县域土地利用效益与城镇化的时空变化及协调性分析[J].水土保持研究,2020,27(3):320-327,335.
- [47] 王大浩,方亚宏,李金龙,等.榆林地区降水特征分析及降水量预测[J].人民黄河,2022,44(5):30-34.
- [48] 晏利斌.1961—2014 年黄土高原气温和降水变化趋势[J].地球环境学报,2015,6(5):276-282.
- [49] 马锋,卓静,何慧娟,等.陕西省榆林市植被生态演变及其驱动机制[J].水土保持通报,2020,40(5):257-261,267,341.
- [50] 张含玉,方怒放,史志华.黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2016,36(13):3960-3968.



- 2008,24(1):108-117.
- [20] Han Z, Wang X Y, Song D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019,44(12):2467-2478.
- [21] 殷亮.喀斯特石牙出露坡地产生沙特征及影响因素研究[D].昆明:云南大学,2017.
- [22] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015,250:1-14.
- [23] 罗为群,蒋忠诚,韩清延,等.岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J].*中国水土保持*,2008,321(12):46-49.
- [24] 甘卓亭,叶佳,周旗,等.模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J].*生态学报*,2010,30(9):2387-2396.
- [25] Sohrt J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment [J]. *Catena*, 2014,123:1-10.
- [26] 吴庆华,朱国胜,崔皓东,等.降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J].*农业工程学报*,2014,30(20):118-127.
- [27] Wang D, Shen Y, Huang J, et al. Rock outcrops re-distribute water to nearby soil patches in karst landscapes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016,23:8610-8616.
- [28] 车明轩,宫渊波, Khan M N,等.不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(2):131-135,42.
- [29] 李彦海,陈晓燕,韩珍,等.紫色土细沟水流输沙能力对近地表水流作用的响应[J].*土壤学报*,2021,58(3):657-664.
- [30] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(4):18-22,72.
- [31] 闫帅旗,朱冰冰,边焯.不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征[J].*农业工程学报*,2021,37(3):116-123.
- [32] 蔡雄飞,赵士杰,王济,等.基于侵蚀过程的喀斯特坡耕地土壤重金属迁移机制[J].*科学技术与工程*,2021,21(23):9767-9774.
- [33] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(3):40-43.
- [34] 黄晓虎,王常明,宋朋燃,等.黄土边坡降雨侵蚀特征的物理模拟试验研究[J].*工程地质学报*,2015,23(4):725-730.

(上接第51页)

- [51] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].*地理学报*,2019,74(9):1835-1852.
- [52] 李亚丽,杨粉莉,杨联安,等.近40年榆林市土地利用空间格局变化及影响因素分析[J].*干旱区地理*,2021,44(4):1011-1021.
- [53] 封建民,文琦,郭玲霞.风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以榆林市为例[J].*水土保持研究*,2018,25(4):304-308.
- [54] Nunes A N, De Almeida A C, Coelho C O A. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal [J]. *Applied Geography*, 2011,31(2):687-699.
- [55] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(6):133-138,144.
- [56] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].*中国科学院院刊*,2017,32(1):11-19.
- [57] 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.
- [58] 张宝庆,田磊,赵西宁,等.植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J].*中国科学:地球科学*,2021,51(7):1080-1091.
- [59] 孙善良,张小平,张志斌.陕西省2000—2018年土地利用时空演变及驱动因素[J].*水土保持通报*,2021,41(4):339-349,369.