

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.003.

张艳, 史飞航, 张悦, 等. 黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 1-12.

ZHANG Yan, SHI Feihang, ZHANG Yue, et al. Temporal and Spatial Changes and Driving Factors of Soil Erosion in the Middle Reaches of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 1-12.

黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素

张艳^{1,2}, 史飞航¹, 张悦¹, 李敏¹, 崔国屹¹, 刘正则¹

(1. 长安大学 土地工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054)

摘要: [目的] 揭示流域生态工程措施和自然因素对土壤侵蚀演变的影响效应, 量化工程因子和水文因子对水土流失的抑制程度, 为黄土高原区流域土壤侵蚀综合防治和生态环境质量改善研究提供参考。 [方法] 基于黄河中游地区 77 个气象站点降雨数据以及流域内四期土地利用类型、植被覆盖度、数字高程模型、土壤质地等资料, 通过提取流域降水、地形、气候、土壤和土地利用等因子, 采用 RUSSEL 模型和地理探测器方法, 开展了土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究。 [结果] 黄河中游地区 2000—2010 年侵蚀减幅最显著, 在生态工程影响下, 海拔 1 000~1 500 m, 8°~15°, 半阳坡和半阴坡的土壤流失量减少最剧烈; 水土流失治理成效表现为林地 > 草地 > 耕地, 且植被覆盖度 30%~50% 区间内侵蚀面积变化最剧烈, 为退耕还林工程重点恢复重建区。黄河中游多年间降雨呈西北向东南逐渐增加, 在地形影响下空间垂直差异会发生变化, 年际间呈不显著波动上升趋势, 具有加剧土壤侵蚀的潜在条件。植被覆盖度呈线性波动上升的趋势, 增量从西北到东南呈递增趋势, 植被覆盖度是影响土壤侵蚀的主控因素; 黄河中游植被覆盖度与坡度的交互作用影响力最强, 且植被覆盖度、坡度与其他因子协同作用可以显著性增强对土壤侵蚀格局演变的作用力。 [结论] 黄河中游以微度侵蚀为主, 多出现在植被发育良好的低海拔地带, 中度以上侵蚀出现在黄土高原腹地的粗沙多沙区; 黄河中游长期呈农牧为主体的土地利用格局, 多年间坡度较陡的耕地不断流向对地形适应性和弹性较高的林草地, 反映了国家退耕工程核心一部分是将坡耕地变为林、草地; 黄河中游以植被覆盖变化为主要特征的生态工程主导了土壤侵蚀量下降的过程和程度, 且任意两种因子交互作用的驱动力均大于单个因子。

关键词: 土壤侵蚀; RUSSEL 模型; 地理探测器; 时空变化; 黄河中游

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0001-12

Temporal and Spatial Changes and Driving Factors of Soil Erosion in the Middle Reaches of the Yellow River

ZHANG Yan^{1,2}, SHI Feihang¹, ZHANG Yue¹, LI Min¹, CUI Guoyi¹, LIU Zhengze¹

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] In order to provide a reference for the thorough control of watershed soil erosion and the improvement of ecological environment quality in the Loess Plateau region, the effects of ecological engineering measures and natural factors on soil erosion evolution were revealed, and the inhibition degrees of engineering factors and hydrological factors on soil erosion were quantified. [Methods] Based on the rainfall data of 77 meteorological stations in the middle reaches of the Yellow River, land use types, vegetation coverage, digital elevation model, soil texture and other data of four periods in the basin, the RUSSEL model and geographic detector method were used to study the spatiotemporal changes and driving factors of soil erosion by extracting precipitation, topography, climate, soil and land use in the basin. [Results] The largest reduction in sediment erosion in the Yellow River's middle sections between 2000 and 2010 was

收稿日期: 2022-06-23

修回日期: 2022-07-17

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41971033); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102291507)

第一作者: 张艳(1978—), 女, 河北沧州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为土地信息系统与土地利用规划。E-mail: zyzyhangyan@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

observed. Soil loss significantly reduced due to ecological engineering at altitudes between 1 000 and 1 500 m, at slope gradients between 8° and 15°, and on hillsides that were both semi-shaded and semi-sunny. The capacity of soil and water loss control decreased in the order: forestland>grassland>cultivated land, and the erosion area changed most dramatically in the range of 30%~50% vegetation coverage, which was the key restoration and reconstruction area of the project of converting farmland to forest. In the middle reaches of the Yellow River, rainfall increased gradually from northwest to southeast over the years, and the spatial vertical difference changes under the influence of topography, and the interannual fluctuation increased insignificantly, which had the potential to aggravate soil erosion. Vegetation coverage increased linearly, and its increment increased from northwest to southeast. Vegetation coverage was the main controlling factor affecting soil erosion. In the middle Yellow River, the interaction between vegetation coverage and the slope was the strongest, and the synergistic effects of vegetation coverage, slope and other factors could significantly enhance the force on soil erosion pattern evolution. [Conclusion] In the middle reaches of the Yellow River, the land use pattern was dominated by agriculture and animal husbandry for a long time, and the cultivated land with steep slopes flowed continuously to the forest and grassland with high topographic adaptability and elasticity over the years, reflecting that the core part of the national farmland conversion project is to convert sloping land into forest and grassland. The ecological engineering mainly characterized by vegetation cover change dominated the process and degree of soil erosion reduction in the middle Yellow River, and the driving force of the interaction of any two factors was greater than that of a single factor.

Keywords: soil erosion; RUSEL model; geographic detector; temporal and spatial variation; middle reaches of the Yellow River

20 世纪以来水土流失问题一直都是全球学者研究土地变化的重要课题之一。土壤侵蚀是人类活动和自然因素两者共同作用下的一种土地退化现象,严重的水土流失不仅造成土地生产力降低,时刻威胁着流域农业生产,且流失所汇聚的泥沙和污染物对生态系统和社会经济发展也带来严重影响,同时会导致中下游湖库阻塞、旱涝灾害加剧等问题^[1-2]。在此背景下,防治土壤侵蚀、修复河道沙土淤积,改善林草退化、构建优质生态环境,实现人与自然和谐相处等,早已成为全球各国政府亟需解决的艰巨任务。

黄河流经黄土高原,特殊的土质和气候水文等使其流域成为我国土壤侵蚀最为严重和密集的地区,尤其是黄河中游近乎都属于黄土高原区,其自然因素影响和人为活动的不合理干扰,使流域范围内土壤侵蚀状况异常剧烈^[3-4]。我国在黄河中游已开展了一系列生态保护工程,使其经历了气候水文变化和土地利用/覆盖格局变化等为主要特征的自然因素和人为因素的协同效应,从而引起地区水土流失产沙过程和程度发生改变,土壤侵蚀不断下降,生态系统服务显著提升,中下游泥沙淤积情况稳定改善等^[5]。

修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation)可以高精度模拟黄土高原水土流失情况^[6]。众多学者将 RUSEL 模型实际应用到黄河流域境内的众多小区域、次降雨尺度模型土壤侵蚀研

究^[7-10],但较少学者将模型用到大尺度、长序列的水土流失模拟预测。基于此以黄河中游为研究区,利用降雨、DEM、土壤和土地利用/覆被等数据集,采用 GIS、水文统计、RUSLE 模型、地理探测器等方法,综合探究黄河中游退耕前后降雨、土地利用等时空变化,阐明不同年份土壤侵蚀时空变化及驱动因素,量化生态退耕工程和降雨变化等因子对水土流失的抑制程度,为黄土高原水土流失防治研究和生态环境质量改善提供参考。

1 研究区概况

黄河中游地区为内蒙古自治区河口镇至河南省三门峡流域片,属于大陆性季风气候区,冬季寒冷,夏季炎热,西部以西北风为主,南部秦岭北侧为南风,年均温介于 8~14℃,年最高温可达 42.8℃,年最低温可达 -28.1℃,年均降水量约为 520.45 mm。境内众多地区被黄土厚厚覆盖,其土壤相对疏松且多孔,具有良好的渗透性,极易发生水土流失^[11]。境内主要河流有渭河、北洛河、汾河及支流。地貌类型复杂,以黄土塬、梁、峁为主沟壑纵横,地形多变^[12]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与数据预处理

(1) 土地利用数据。1990 年、2000 年、2010 年、

2020 年四期空间分辨率为 30 m 的土地利用数据下载于中国科学院资源环境科学数据中心。

(2) 数字高程模型为地理空间数据云平台下载的分辨率 30 m 的 ASTER GDEM 数据,用于获取黄河中游地形(坡度、坡向、高程)特征数据。

(3) 气象水文数据下载于中国气象科学数据共享服务网的“中国地面气候资料日值数据集”。黄河

中游及周边地区 1981—2020 年共 77 个气象观测站点及日值降雨量数据,空间分布特征如图 1 所示。

(4) 土壤质地数据利用寒区旱区科学数据中心的 中国 1 : 100 万土壤数据库。

(5) 遥感数据下载于美国国家航天航空局 EOS/MODIS 卫星的 MOD13Q1 v006 数据产品(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。

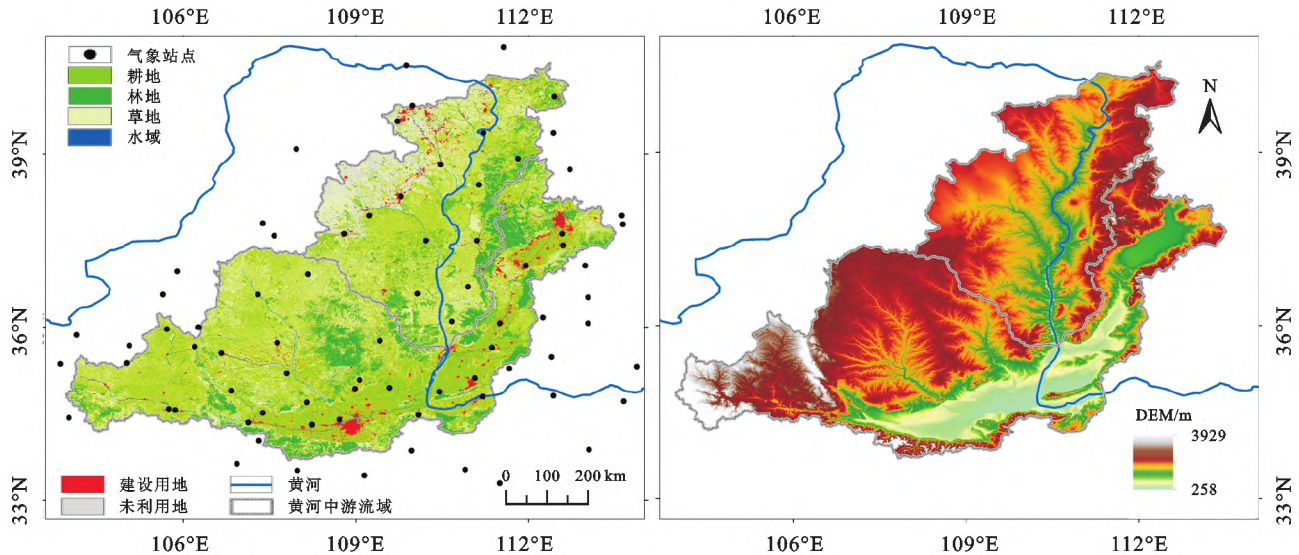


图 1 黄河中游地区示意图

2.2 研究方法

2.2.1 RUSLE 模型 为确保数据准确性,需全部转换为相同坐标系进行空间运算。采用 RUSLE 模型^[6,10]对黄河中游土壤侵蚀模拟分析,表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

式中: A 为单位面积土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; LS 为坡长坡度因子; C 为地表植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。关于计算降雨的侵蚀性,众多学者提出了不同背景下的降雨侵蚀力算法模型^[13]。本文选取谢云降雨侵蚀力模型^[14]研究黄河中游降雨侵蚀力情况,公式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{i=1}^k (P_d)^{1.7265}$$

式中: R_i 为一年中第 i 个半月的降雨侵蚀力; $i = 1, 2, \dots, k$ 是半个月內侵蚀降雨的天数; P_d 为 ≥ 100 mm 的日降雨量。在谢云模型中考虑到两天内发生的单个降雨事件可能记录为两个日降雨量,我们将降雨的阈值定义为 10 mm^[13-14],避免了对降雨侵蚀力的低估。同时对于该模型各气象站的参数 α 经过不断实际验证,分别在温暖季节(5 月至 9 月)设置为 0.393 7,在寒冷季节(10 月至 4 月)设置为 0.310 1。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。土壤可蚀性为标准小区内单位降雨侵蚀力引起土壤流失率。以土壤质地数据为基础采用 EPIC 模型进行计算土壤可蚀性^[15]。公式如下:

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{SIL}{CLA + SLA} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(22.95N - 5.51)} \right]$$

式中: SAN, SIL, CLA 和 C 为砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量,其中 $SN = 1 - SAN/100$ 。

(3) 地形因子(LS)。在土壤流失方程中,地形是诱导土壤侵蚀发生的重要因素,采用刘宝元在 CSLE 模型中提出的地形因子算法,带入符素华教授团队开发的土壤侵蚀模型地形因子计算工具(2.0 版本)进行地形因子的计算^[16]:

$$LS = L \times S$$

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

$$m = \frac{B}{B + 1}$$

$$B = \frac{\sin \theta}{3 \sin \theta^{0.8} + 0.56}$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin\theta + 0.036 & \theta < 6^\circ \\ 16.8 \times \sin\theta - 0.5 & 6^\circ \leq \theta < 15^\circ \\ 21.9 \times \sin\theta - 0.96 & \theta \geq 15^\circ \end{cases}$$

式中： λ 为坡长(m)； m, B 为变换常量； θ 为坡度百分比(%)。

(4) 植被覆盖因子(C)。植被覆盖与管理因子可以反映植被情况对水土流失的具体效应,介于 0~1,当 $C=0$ 时,表示没发生土壤侵蚀,当 $C=1$ 时,对侵蚀没有起到抑制作用,参考蔡崇法等提出的 C 因子计算^[17]：

$$C = \begin{cases} 1 & \text{FVC} = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg(\text{FVC}) & 0 < \text{FVC} < 78.3\% \\ 0 & \text{FVC} \geq 78.3\% \end{cases}$$

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}$$

式中： FVC 为植被覆盖度； $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯裸土像元的 NDVI 值； NDVI_{max} 纯植被像元的 NDVI 值。

(5) 水土保持措施因子(P)。水土保持措施因子为一系列工程实施后与顺坡种植时的土壤流失量的比值。本文水土保持措施因子的取值结合黄河中游实际情况并参照前人研究^[18-21] 对不同土地利用进行赋值见表 1。

表 1 不同土地利用类型下水土保持措施因子

土地利用类型	坡度	P
林地		1
草地		1
水域		0
建设用地		0
未利用地		1
	$0^\circ \sim 5^\circ$	0.100
	$5^\circ \sim 10^\circ$	0.221
	$10^\circ \sim 15^\circ$	0.305
耕地	$15^\circ \sim 20^\circ$	0.575
	$20^\circ \sim 25^\circ$	0.705
	$> 25^\circ$	0.800

2.2.2 土壤侵蚀演变影响因素研究方法

(1) 降雨因素研究。基于黄河中游各站点降雨等数据集,利用地统计分析结合相关参数分别对反距离加权,径向基函数和克里金模型进行优化,并对每个模型的最佳预测结果进行交叉比较,根据地统计精度分析结果,前两者模拟预测结果的均方误差均大于克里金插值结果,同时克里金模型预测结果的绝对误差更小,且误差和的平均值更接近于零,整体比较克里金模型模拟效果以及各项误差指标均优于反距离加权和径向基函数,因此本文选择克里金模型插值作为降雨空间插值的主要方法。

Mann-Kendall 秩相关检验方法被广泛应用于水

文和气象学的研究^[22]。通过使用数据序列的顺序而不是实际值来判断两个变量之间的相关程度,可以避免最大或最小值的干扰,同时还可以客观地实现长期数据序列的变化趋势,计算如下：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_{ik})$$

$$\text{sgn}(x_j - x_{ik}) = \begin{cases} 1 & x_j - x_{ik} > 0 \\ 0 & x_j - x_{ik} = 0 \\ 1 & x_j - x_{ik} < 0 \end{cases}$$

式中： n 为时间序列的长度； x_j 和 x_{ik} 为时间序列中的时间变量值； sgn 是一个符号函数,在确定时间序列数据变化的趋势显著性时, $M-K$ 检验的主要参数有趋势的显著性水平(Z)和趋势的斜率(S)； Z 表示变量的趋势是否明显； S 表示趋势的方向和程度。当 S 的平均值等于零,且方差接近正态分布时,零假设是不可接受的。方差计算如下：

$$\text{var}(S) = \left[\frac{1}{18} n(n-1)(2n+5) \right] - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)$$

式中： q 表示具有相同时间序列变量值的集合数； t_p 表示集中的 p_{th} 数据数。统计量 Z 可按如下式计算：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

如果 Z 为正,则时间序列呈单调上升趋势,为负值,则时间序列呈单调下降趋势。显著性水平为 0.01,0.05,0.10 的 Z 的绝对临界值分别为 2.576,1.960,1.645,表示置信度 90%,95% 和 99% 的显著性检验。

(2) 土地利用/覆被因素研究。土地利用转移矩阵描述不同土地利用的结构和数量在不同时相下空间位置的改变^[23]。计算如下：

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix}$$

式中： M 代表类型面积； n 为转移前、后的类型的总数； i, j 为转移前、后的类型情况。

土地利用地形位优势度分析。地形位指数用来衡量研究区的地形梯度,能更加精细地分析土地利用空间格局与地形梯度的变化关系^[24]。

$$T = \lg \left[\left(\frac{H}{H^\circ} + 1 \right) \times \left(\frac{S}{S^\circ} + 1 \right) \right]$$

式中： T 代表地形位指数； H, H° 为流域范围内空间上任一位置的海拔值和该位置所在区域内的平均高

程值; S, S° 为流域范围内空间上任一位置的坡度值和该位置所在区域内的平均坡度值。海拔越低、坡度越小的位置, 相应 T 越小; 反之越大。

(3) 主导因子贡献率研究方法。依据 RUSLE 模型, 将退耕还林工程变化和降雨变化作为土壤侵蚀的影响项分析两者的贡献率^[25]。

$$U_1 = \beta_{R1} \times \beta_{G1} \times \beta_{KLS}$$

$$U_2 = \beta_{R2} \times \beta_{G2} \times \beta_{KLS}$$

$$\Delta U_T = U_2 - U_1$$

式中: U_1, U_2 为退耕还林工程前、后年均土壤侵蚀量; ΔU_T 为工程前、后土壤侵蚀变化量; β_{R1}, β_{R2} 为工程前、后降雨侵蚀力因子影响项; β_{G1}, β_{G2} 为工程前、后植被管理因子和水土保持措施因子影响项; β_{KLS} 表征为其他因素影响项。

$$U'_2 = \beta_{R2} \times \beta_{G1} \times \beta_{KLS}$$

$$\Delta U_G = U_2 - U'_2$$

$$C_G = (\Delta U_G / \Delta U_T) \times 100\%$$

$$C_R = 1 - C_G$$

式中: U'_2 为假设工程后植被管理因子和水土保持措施因子影响程度和工程实施前相同情况下的土壤侵蚀量; ΔU_G 为工程实施引起的土壤侵蚀变化量; C_G, C_R 为工程的实施和降雨变化对土壤侵蚀的贡献率。

(4) 地理探测器模型原理与应用。地理探测器用于检验土壤侵蚀空间分异性及揭示土壤侵蚀动态变化的驱动因素贡献情况, 其由风险因子探测、交互作用探测、生态探测、风险区探测 4 个部分组成。风险因子探测用来探测因变量的空间分异性以及自变量对特定因变量的解释力, 一般用 q 衡量其大小; 交互作用可以探测两变量间的交互作用, 通过对比单变量及双变量的解释力大小可判断双因子间交互作用的方向及方式; 生态探测可比较影响因子对土壤侵蚀空间分布的影响是否有显著差异; 风险探测器可判断影响因子的层间土壤侵蚀量是否有显著差别, 并识别土壤侵蚀高风险区域^[26]。

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

式中: $h = 1, 2, \dots, L, L$ 为因变量或自变量的分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的数据单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区因变量的方差; SSW 为层内方差之和; SST 为全区总方差。探测器驱动因子的解释力 q 值越大, 则因变量的空间分异性越显著。

采用地理探测器探索土壤侵蚀空间分异性的驱动因素。鉴于因变量土壤侵蚀 (Y) 和自变量因素 (X) 在空间统计尺度上存在显著差异, 基于王劲

峰^[25]提出的数据离散化方法, 将土地利用 (X_1)、植被覆盖度 (X_2)、坡度 (X_3)、降雨量 (X_4)、海拔 (X_5)、土壤类型 (X_6) 和土壤侵蚀强度 (Y) 分别离散化, 其中土地利用和土壤类型基于其数据类别离散化分级、植被覆盖度依据 $FVC \leq 30\%, 30\% \sim 40\%, 40\% \sim 50\%, 50\% \sim 60\%, 60\% \sim 70\%, 70\% \sim 80\%, 80\% \sim 90\%, 90\% \sim 100\%$ 离散化为 8 级, 坡度依据 $\leq 5^\circ, 5^\circ \sim 10^\circ, 10^\circ \sim 15^\circ, 15^\circ \sim 20^\circ, 20^\circ \sim 25^\circ, 25^\circ \sim 30^\circ, 30^\circ \sim 35^\circ, \geq 35^\circ$ 离散化为 8 级, 降雨量和海拔采用 GIS 中自然断点离散化为 9 级。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时空变化

鉴于降雨因素具有较大偶然性, 将研究期年降雨侵蚀力每 10 a 间隔计算平均降雨侵蚀力, 带入 RUSLE 模型模拟预测土壤侵蚀情况, 并依据土壤侵蚀强度分类标准对模拟的土壤侵蚀模数分级。依据国家水利部门土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007 (表 2), 对研究区模拟的土壤侵蚀模数进行强度等级划分。

表 2 土壤侵蚀强度分级

强度等级	土壤侵蚀模数/(t · km ⁻² · a ⁻¹)
微度	<1000
轻度	1000~2500
中度	2500~5000
强烈	5000~8000
极强烈	8000~15000
剧烈	>15000

3.1.1 土壤侵蚀强度时空演变特征 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年黄河中游平均土壤侵蚀模数为 4 760.27, 6 735.52, 3 006.65, 1 390.71 t/(km² · a), 呈先升高后急剧下降, 整体土壤侵蚀强度为中度、强烈、中度和轻度侵蚀。1990 年、2010 年、2020 年微度侵蚀占比均大于 50%。2000 年为研究期内侵蚀较严重的年份, 剧烈和极强烈侵蚀占比为 16.19% 和 11.08%, 经过 20 a 退耕还林等生态工程建设, 剧烈和极强烈侵蚀占比降低到 1.42% 和 3.56%。黄河中游以微度侵蚀为主, 分布在植被发育良好的低海拔地带, 中度以上的侵蚀情况主要发生在黄土高原腹地的粗沙多沙区 (表 3)。

基于多年间土壤侵蚀变化情况, 黄河中游侵蚀强度不变、减轻和加剧面积占比为 57.02%, 42.00% 和 0.98%。侵蚀状况减轻主要由轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈转为微度、中度转为轻度、极强烈转为中度和剧烈转为极强烈等转移类型引起的。侵蚀强度不变大部分源于微度侵蚀的稳定保持, 侵蚀加剧出现

在轻度转为中度。侵蚀减轻主要集中在延安、榆林北、庆阳、固原、天水、定西、忻州等中游西部黄河干流沿线等地区,侵蚀不变集中在中游东南部植被覆盖度较高的地区,而侵蚀加剧体现在榆林东南部的

黄河干线地区,这与榆林为陕西第二大粮仓,需更多耕地资源密切相关。侵蚀强度演变情况显著验证了黄土高原多年来大规模实施一系列生态工程取得的巨大成效(图 2)。

表 3 1990—2020 年土壤侵蚀强度分级统计

侵蚀级别	I ₁₉₉₀		II ₂₀₀₀		III ₂₀₁₀		IV ₂₀₂₀		10 年动态度/%			
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	1990—2000	2000—2010	2010—2020	1990—2020
微度	156955.81	51.97	135743.26	44.95	181218.58	60.01	231944.13	76.80	-13.51	33.50	27.99	47.78
轻度	33345.58	11.04	34520.86	11.43	33056.39	10.95	24940.83	8.26	3.52	-4.24	-24.55	-25.21
中度	26811.08	8.88	28473.27	9.43	27444.40	9.09	18524.40	6.13	6.20	-3.61	-32.50	-30.91
强烈	21149.20	7.00	20910.33	6.92	20897.51	6.91	11555.54	3.83	-1.13	-0.06	-44.70	-45.36
极强烈	31692.17	10.49	33455.77	11.08	24953.40	8.26	10757.89	3.56	5.56	-25.41	-56.89	-66.06
剧烈	32046.16	10.61	48896.51	16.19	14429.72	4.78	4277.21	1.42	52.58	-70.49	-70.36	-86.65

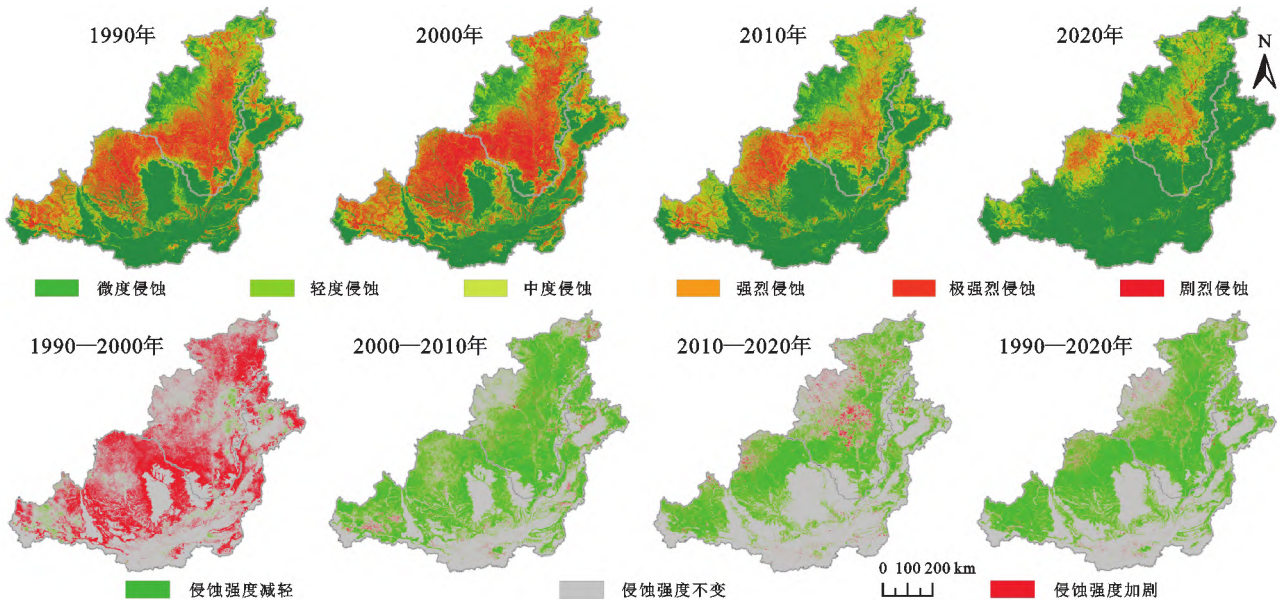


图 2 黄河中游土壤侵蚀强度空间分布及转移

3.1.2 不同地形下土壤侵蚀分布格局变化规律 黄河中游不同地貌下微度侵蚀面积占比均最高,1 000~1 500 m 阶段是微度侵蚀面积占比增加了 14.16%,其是水土流失防治中的重点区域;黄河中游多年间半阳坡和半阴坡土壤侵蚀变化情况最剧烈;不同坡度下黄河中游土壤侵蚀情况各异,8°~15°土壤侵蚀以微、轻和中度侵蚀为主,15°~25°剧烈和极强烈侵蚀为主,25°以上剧烈侵蚀占比最大。2000—2010 年随着国家生态工程实施,在土壤侵蚀大规模锐减的趋势下,微度侵蚀在 8°~15°坡度带内增加最为显著;2010—2020 年不同坡度下的土壤侵蚀变化整体态势良好,8°~25°坡度带内侵蚀锐减最明显,相较于工程实施前,极强烈和剧烈侵蚀治理情况成效最大,反映了该区实施的生态修复工程的精准防治,也为黄土高原生态进一步建设奠定良好基础。

3.1.3 不同土地利用下土壤侵蚀分布特征 基于黄

河中游主要地类影响下的土壤侵蚀模拟情况,耕、林和草地平均土壤侵蚀模数差异较大,土壤侵蚀模数表现为草地>耕地>林地,草地略大于耕地,主要与草地分布基数广,低覆盖度草地面积占比高,草地分布坡度高,缺少人工措施保护密切相关。

黄河中游 1990—2020 年耕地土壤侵蚀模数减小率高达 72.10%,侵蚀强度由中度转为轻度;林地侵蚀强度由轻度转为微度,土壤侵蚀模数减小率为 70.52%,封山育林政策是防治水土流失中关键措施;草地侵蚀强度由强烈转为轻度,平均土壤侵蚀模数减小率为 70.52%,其作为面积分布最广的地类,是最可能受人为影响的水土流失加剧因素,侵蚀变化对水土流失治理至关重要,分析发现草地整体上土壤侵蚀模数减少最多,因此继续退耕还草工程的实施对土壤侵蚀的治理最为关键的。

黄河中游植被覆盖度 30%~50% 范围内土壤侵

蚀变化最剧烈,其是生态工程重点恢复重建的植被覆盖带。在国家推行植被育林造草等生态工程后,植被处于高速生长期,侵蚀强度降低集中在极强烈和剧烈侵蚀级别上,70%~100%的植被覆盖度区间的面积实现了翻倍增加,在高植被覆盖度下,林草地结构良好,且群落层次丰富,其多层结构保持水土的效益得到显著体现,工程实施后优良植被显著增加。

综上黄河中游耕、林和草地等主要地类的水土流失治理成效表现为林地>草地>耕地,充分证明了国家在近几年来在黄土高原大力推行的退耕还林还草、封山育林及山水林田湖草等生态建设工程取得了显著成效。

3.2 土壤侵蚀时空变化影响因素研究

在影响土壤侵蚀变化的众多因素中,地形和土壤相对稳定,而降雨、土地利用和植被覆盖度是控制侵蚀变化的主导因素。

3.2.1 降雨因素影响土壤侵蚀演变分析 降雨到达一定程度将会造成水土流失,我们一般将侵蚀性降雨特征即降雨侵蚀力作为量化计算降雨对土壤侵蚀作用力的重要函数^[26],因此分析降雨变化对于研究土壤侵蚀演变具有重要意义。

黄河中游年均降雨量为 520.45 mm,最大年降雨量为 699.90 mm(2003 年),最小年降雨量为 349.90 mm(1997 年),多年间降雨量呈多峰状波动上升的变化特征,年际间波动较大,基于 M-K 检验多年间降雨没有明显的降雨突变现象,且总体趋势性特征不显著。空间上年降雨量空间差异显著,呈自南到北递减趋势,以佛坪、留坝、商南和太白为代表的秦岭北部盆地山区的降雨量最大,表明这些地区存在降雨侵蚀威胁的解释力较强;中游北部黄土高原丘陵区的降雨量较少,降雨侵蚀的威胁较小,而中游南部盆地东西两侧的降雨侵蚀威胁也存在显著差异(图 3)。

多年间降雨量的增加代表着降雨侵蚀力的增加,这也就意味着潜在的土壤侵蚀风险增加,在黄河中游

降雨侵蚀性增加的地区,应采取适当措施,减少土壤侵蚀的潜在风险,对维护流域内生态安全具有重要意义。

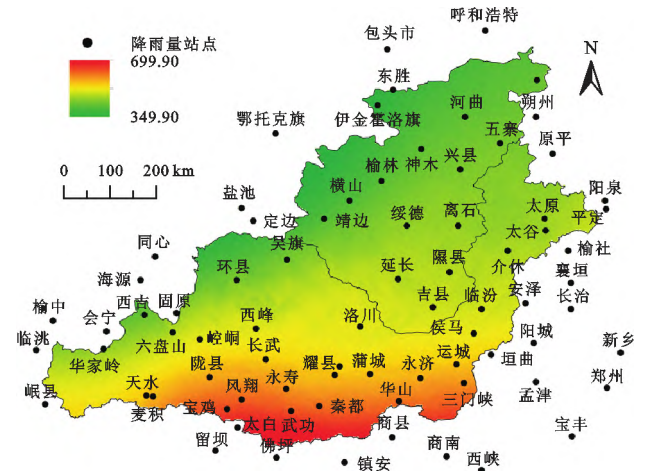


图 3 黄河中游年均降水量空间分布格局

3.2.2 土地利用/植被覆盖因素影响土壤侵蚀演变分析 黄河中游 1990—2020 年维持了长期农牧为主体的土地利用格局,1990 年耕、草地占比为 39.97%和 37.00%,林草覆盖率为 53.84%,2020 年耕、草地占比为 36.93%和 37.87%,林草植被覆盖率增加到 55.38%。各地类变化特征为耕地、未利用地和水域缩减,林地、草地和建设用地增加,证明了多年间土壤侵蚀锐减源自退耕还林(草)植被重建工程的实施成果(图 4)。

黄河中游 1990—2000 年土地利用转移基本相对稳定,空间上耕、林地无显著变化特征,西北农牧交错带区草地转移剧烈,侵蚀略微加剧;2000—2010 年呈耕地流向林、草地和建设用地的特征,草地流向林地的特征,林地空间格局变化显著,集中在黄土高原西北部退耕还林重点区域,这也是侵蚀减轻最为显著的地区;2010—2020 年占比 70.04%的耕地流出到林地,呈现耕地减少林地增加,但空间分布特征比较零碎,草地维持了相对稳定,侵蚀状况继续减轻。黄河中游林、草地多年间在西北部退耕还林生态工程实施区域内变化最为剧烈,生态工程对土壤侵蚀抑制效果极显著(表 4)。

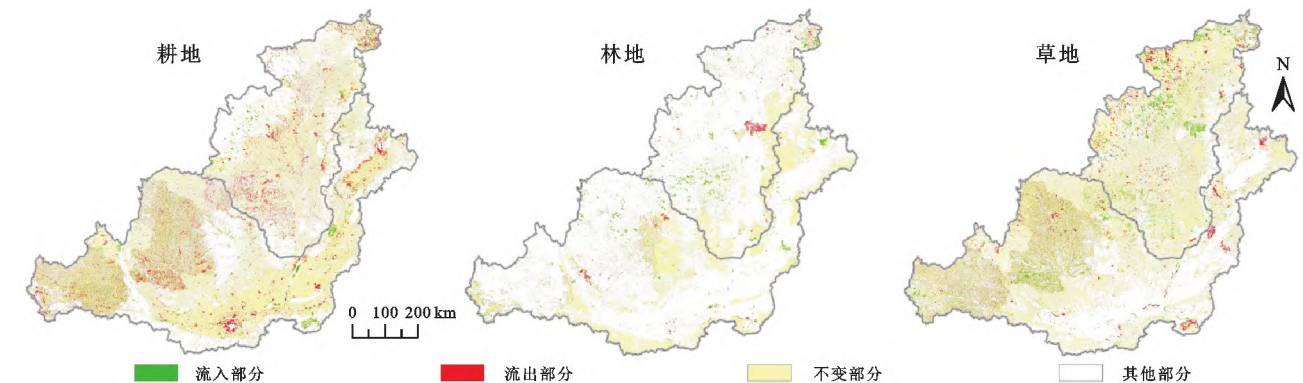


图 4 1990—2020 年耕、林、草地空间流转变

表 4 1990—2020 年土地利用结构格局演变

参数	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年		10 年变化率/%			
	面积/万 km ²	比例/%	面积/万 km ²	比例/%	面积/万 km ²	比例/%	面积/万 km ²	比例/%	1990—2000	2000—2010	2010—2020	1990—2020
耕地	12.07	39.97	12.09	40.02	11.38	37.68	11.15	36.93	0.13	-5.86	-1.99	-7.61
林地	5.09	16.85	5.08	16.81	5.31	17.57	5.29	17.51	-0.18	4.49	-0.34	3.94
草地	11.17	36.10	11.23	37.17	11.46	37.95	11.44	37.87	0.48	2.08	-0.21	2.35
水域	0.31	1.02	0.30	0.99	0.28	0.91	0.28	0.92	-2.31	-8.26	0.44	-9.99
建设用地	0.62	2.07	0.69	2.29	1.008	3.32	1.28	4.22	10.92	44.87	27.22	104.43
未利用地	0.94	3.10	0.87	2.70	0.78	2.58	0.77	2.56	-12.86	-4.74	-0.78	-17.64

土地利用分布局限于地形特征,根据水土流失调查中高程、坡度和坡向等地形要素分级标准,可知耕、林和草地集中在 1 000~1 500 m 高程带;耕地集中在斜坡(8°~15°),林草地集中在陡坡(15°~25°);30 a 间耕地在海拔 1 500 m、斜坡和陡坡下退耕量最多,2000—2010 年退耕量最多,源自该阶段处于国家在黄土高原区大规模实施退耕还林还草等生态工程的黄金期密切相关,同时根据多年间各地类的地形位置优势度分析,我们发现坡度较陡的耕地不断转移为对地形适应性和弹性最高的林草地,侧面反映了国家退耕工程核心一部分是将坡耕地变为林、草地,从而增强对水土流失的防治作用。

黄河中游多年平均植被覆盖度表现为线性波动上升的特征,2000 年前整体上升不明显,之后呈快速增加,表明退耕工程后黄河中游植被重建情况总体良好。植被覆盖度增加量呈西北到东南递增,且黄河中游占比 78.08% 的地区覆盖度出现增加,而减少区仅占比 3.59%。空间上植被覆盖度呈全域大范围增加,发生在流域的西北地区,这也更好地起到对水土流失的遏制作用。对于秦岭两侧及延安等部分区县长期保持良好特征,而关中平原城市群地带(西安、宝鸡、渭南、咸阳)和山西境内的运城、太原、晋中等城市植被覆盖度下降严重,这与近几十年来西北第一城西安和太原中心城市的高速发展密不可分(图 5)。

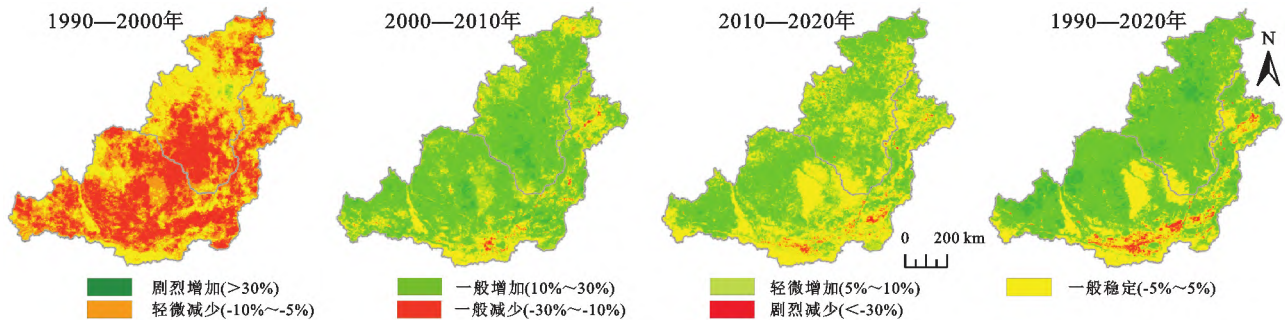


图 5 黄河中游平均植被覆盖度变化情况

3.2.3 土壤侵蚀演变的主导因子贡献率分析 在影响土壤侵蚀的众多因素中,与地形因素和土壤因素不同,降雨和植被在时空上均有较大的变化,是引起特定地区土壤侵蚀的主要因素。综合前面影响因素分析,为判断退耕还林工程措施对土壤侵蚀变化的贡献率,将 2000 年作为实施工程前后的划分标准,来探究主导因子在工程实施前后对土壤侵蚀的影响过程和程度。

鉴于降雨和植被作为影响土壤侵蚀最为关键的因素,对两因素与侵蚀模数在工程后 10 a 和 20 a 探究分析发现。表 5 中 5 种不同组合类型为面积占比较大的土壤侵蚀变化情况。

实施工程 10 a 黄河中游占比 61.58% 的地区出现植被覆盖度和降雨侵蚀力双增加,而侵蚀模数下降的情况,集中在退耕还林重点区自南向北的流域中心地带;黄河中游占比 14.20% 的地区呈覆盖度增加,降雨侵蚀力减小,表现在鄂尔多斯、榆林北、忻州和朔州

等北部地区;黄河中游占比 15.51% 的地区出现降雨侵蚀力和覆盖度双增加,而侵蚀保持较稳定。虽降雨侵蚀力增加较多,对水土流失外营力增强,但覆盖度提高对地表的保护作用增强,近地面生长的林草植被具备更好抑制侵蚀的效果(图 6)。

经过 20 a 生态工程恢复重建,覆盖度和降雨侵蚀力双增加,侵蚀模数减小区占比增加到 75.78%,更多耕地转化为林草地,使高覆盖度植被对土壤保护作用增强;侵蚀稳定区占比为 16.28%,虽降雨侵蚀力增加较大,但覆盖度提升缓冲了对土壤的破坏,集中在秦岭两侧和覆盖度较稳定的地区;侵蚀增加区占比 2.75%,分布在西北部的农牧交错带,这与林草地转为农耕地有关,覆盖度减小,降雨侵蚀力增加引起的侵蚀加剧发生在城市化扩展严重的关中城市群等地。

基于贡献率计算,工程 10 a 和 20 a 后假设降雨侵蚀力无变化的情况下,下垫面变化引起平均侵蚀

模数变化量为 $-4\ 640.08\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $-8\ 346.24\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 退耕还林工程 10 a 和 20 a 对侵蚀降低贡献率为 124.44% 和 156.14%, 降雨因素贡献率为 -24.44% 和 -56.14% , 可知多年来降雨对侵蚀降低

呈负影响。在降雨增加的大背景下,黄河中游大部分地区水土流失状况显著改善与林草植被不断增加及各地类间合理流转密不可分,研究区内以植被增加为主要特征的生态工程主导了水土流失的过程和程度。

表 5 工程后土壤侵蚀演变的主导因子叠加分析统计

年份	因素变化 类型	降雨侵蚀力变化/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	植被覆盖度 变化/%	平均侵蚀模数变化/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	面积 比例/%
2010	C 增加, R 增加, U 减小区	243.48	16.93	-5160.17	61.58
	C 增加, R 减小, U 减少区	-163.80	13.14	-4174.08	14.20
	C 增加, R 增加, U 增加区	266.75	7.52	834.06	2.52
	C 增加, R 增加, U 不变区	354.15	7.87	0	15.51
	C 减小, R 增加, U 增加区	295.11	-4.97	666.08	2.18
	C 增加, R 增加, U 减小区	514.70	26.96	-7014.17	75.78
2020	C 增加, R 减小, U 减少区	-32.12	23.67	-3763.58	1.58
	C 增加, R 增加, U 增加区	577.14	15.50	643.96	2.75
	C 增加, R 增加, U 不变区	584.98	10.39	0	16.28
	C 减小, R 增加, U 增加区	576.88	-6.32	418.70	1.21

注: C 为植被覆盖度变化, R 为降雨侵蚀力变化, U 为土壤侵蚀模数变化。

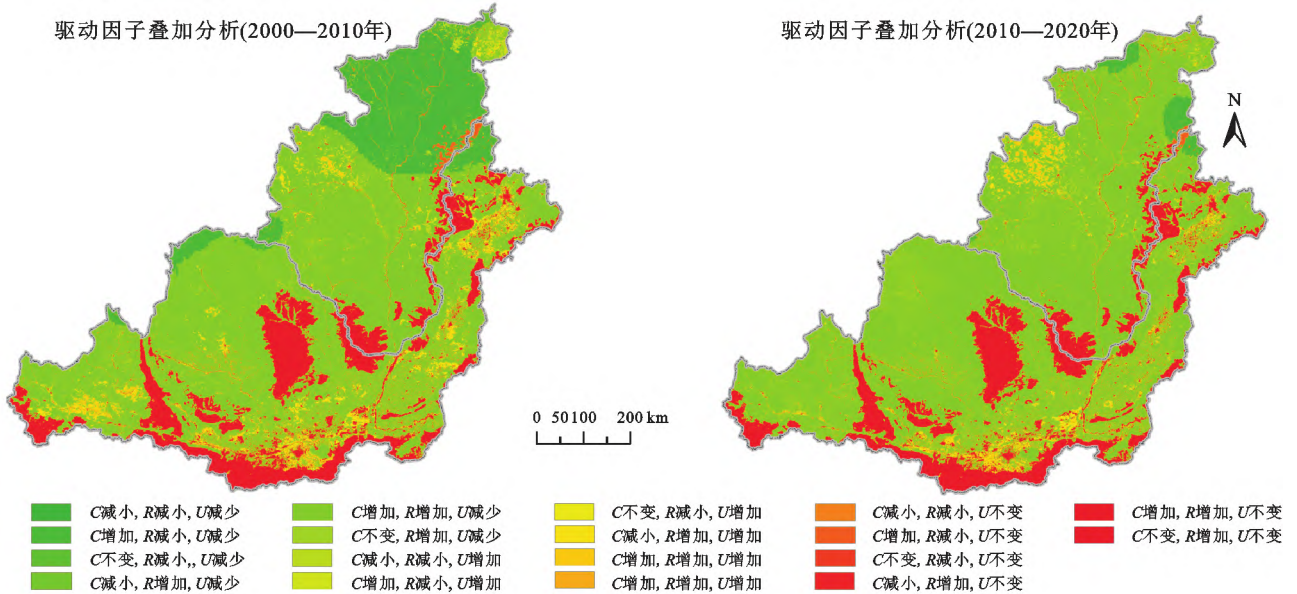


图 6 工程后土壤侵蚀演变的主导因子空间叠加分布格局

3.2.4 土壤侵蚀因子地理探测器模型探测分析

(1) 成因单因子探测。不同年份各影响因子作用力具有显著差异,对侵蚀强度的解释力如下:1990 年呈 $X_2 > X_3 > X_1 > X_4 > X_6 > X_5$, 植被覆盖度表现为最高,植被对侵蚀抑制作用显著;2000 年呈 $X_3 > X_2 > X_1 > X_6 > X_4 > X_5$, 坡度表现为最高,源于区域地理位置复杂,沟壑纵横,坡度变化剧烈,且植被覆盖低,坡度主导了侵蚀变化,土地利用变化也对侵蚀产生作用,特别是林草耕和建设用地间的流转;2010 年、2020 年均呈 $X_2 > X_3 > X_4 > X_1 > X_6 > X_5$, 降雨显著增加促进土壤侵蚀解释力加强。土壤侵蚀影响因素不仅有自然因素,还包括众多社会经济因素,进

行土壤侵蚀防治工作时,要针对不同地区兼顾自然和人为共同的影响(图 7)。

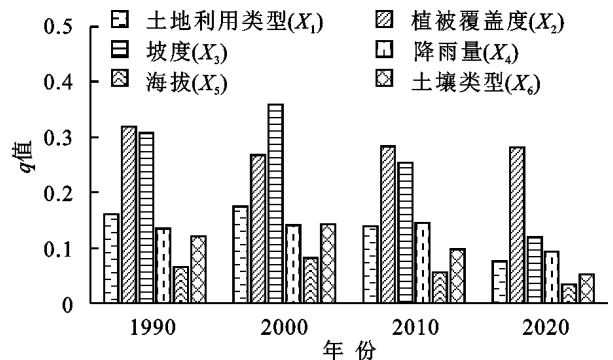


图 7 土壤侵蚀影响因子 q 值统计

(2) 成因交互作用探测。在影响土壤侵蚀的众多因子中,任意两种因子的交互作用力均大于单个因子,且交互作用为双因子增强和非线性增强,植被覆盖度与坡度的交互作用影响力表现为最强。坡度叠加任何一个因子交互作用力虽存在差异,但对侵蚀解释力都表现

较高。2020 年土壤侵蚀的发生更大程度取决于双因子交互作用。综上坡度、植被覆盖度与其他因子协同作用可显著增加其他因子对土壤侵蚀格局的综合解释力,这表明坡度和植被覆盖度差异较大的区域土壤侵蚀强度及分布格局也常呈现出较显著差异(表 6)。

表 6 土壤侵蚀各影响因子交互作用探测

年份	影响因子	土地利用类型(X_1)	植被覆盖度(X_2)	坡度(X_3)	降雨量(X_4)	海拔(X_5)	土壤类型(X_6)
1990	土地利用类型(X_1)	0.1613					
	植被覆盖度(X_2)	0.4366	0.3198				
	坡度(X_3)	0.5586	0.8322	0.3077			
	降雨量(X_4)	0.2802	0.3818	0.4829	0.1357		
	海拔(X_5)	0.2319	0.3638	0.3525	0.2125	0.0650	
	土壤类型(X_6)	0.2742	0.4118	0.4381	0.2321	0.1773	0.1212
2000	土地利用类型(X_1)	0.1742					
	植被覆盖度(X_2)	0.4231	0.2686				
	坡度(X_3)	0.6083	0.8248	0.3587			
	降雨量(X_4)	0.2888	0.3410	0.5142	0.1410		
	海拔(X_5)	0.2582	0.3321	0.4135	0.2161	0.0813	
	土壤类型(X_6)	0.3081	0.3885	0.4995	0.2478	0.2059	0.1431
2010	土地利用类型(X_1)	0.1389					
	植被覆盖度(X_2)	0.4117	0.2842				
	坡度(X_3)	0.4681	0.8128	0.2543			
	降雨量(X_4)	0.2732	0.3328	0.5033	0.1452		
	海拔(X_5)	0.2045	0.3497	0.2912	0.2154	0.0557	
	土壤类型(X_6)	0.2357	0.3794	0.3712	0.2409	0.1476	0.0978
2020	土地利用类型(X_1)	0.0758					
	植被覆盖度(X_2)	0.3893	0.2814				
	坡度(X_3)	0.2426	0.7747	0.1187			
	降雨量(X_4)	0.1823	0.3408	0.3558	0.0936		
	海拔(X_5)	0.1180	0.3506	0.1547	0.1671	0.0331	
	土壤类型(X_6)	0.1348	0.4037	0.1934	0.1782	0.0867	0.0512

(3) 风险区分析。地理探测器风险区探测识别出黄河中游水土流失高风险区的分布类型见表 7。由表 7 可以看出,低覆盖度草地由高到低风险的转变,体现了近 20 年国家大规模实施生态工程取得的巨大成效。黄河中游侵蚀强度随坡度等级升高逐渐增强,且 25° 以上侵蚀强度均呈较高态势;对于植被

覆盖度(40%~50%)区间内侵蚀强度平均值最高,该植被区间内的土地利用主要为低覆盖度草地,其也成为水土流失的易发区。

基于地理探测器生态探测模块显示(表 8),土地利用与植被覆盖度、土地利用与坡度、海拔与土壤类型等对水土流失的影响具有显著性差异。

表 7 不同年份各影响因子侵蚀高风险区域类型

年份	土地利用类型 X_1	植被覆盖度 $X_2/\%$	坡度 $X_3/(^\circ)$	降雨量 X_4/mm	海拔 X_5/m	土壤类型 X_6
1990	低覆盖度草地/裸土地/戈壁	40~50	>25	386.03~465.49	894~1108	栗钙土
2000	中、低覆盖度草地/裸土地/戈壁	30~40	>25	351.55~469.32	894~1108	栗钙土
2010	裸土地/戈壁/裸岩石砾地	40~50	>25	402.39~433.10	894~1108	栗钙土
2020	戈壁/裸岩石砾地	40~50	>25	435.80~474.80	894~1108	栗钙土

表 8 影响因子对土壤侵蚀影响显著差异探测

影响因子	土地利用类型	植被覆盖度	坡度	降雨量	海拔	土壤类型
土地利用类型						
植被覆盖度	Y					
坡度	Y	N				
降雨量	Y	N	N			
海拔	N	N	N	N		
土壤类型	N	N	N	N	Y	

注: Y 表示有影响, N 表示无影响。

4 讨论

在气候变化及生态工程的共同作用下,黄河中游水土流失量急剧下降,实现了生态工程抑制土壤侵蚀的目标。同时影响黄河中游流域的土壤侵蚀因子众多,按地貌差异自东南向西北划分为豫西山地、山西高原、陕北高原和陇中高原等地貌区,呈东南低西北高,地形复杂且起伏大,且部分地区降雨强度密集存在双雨季,多因子间协同作用构成黄河中游土壤侵蚀的空间格局。

黄河中游流经黄土高原,生态环境脆弱,特殊的土质环境和气候条件,使该地区极易发生土壤侵蚀现象,水土保持任务艰巨。同时其土壤侵蚀的变化特征与国家政策和人类生态环境保护意识密切相关。其中陡坡垦殖和滥砍乱伐是黄河中游土壤侵蚀严重的主要原因。黄河中游自实施退耕还林还草工程和生态文明建设以来,实施效果较好,有效减少了坡耕地,土壤侵蚀得到一定缓解。坡度 $> 25^\circ$ 的耕地面积由 2000 年的 $10\,568.18\text{ km}^2$ 减少到 2020 年 $9\,372.27\text{ km}^2$ 。国家继续开展的退耕还林等生态工程建设中,对于零星分布,质量较差的农田不应划入基本农田保护范围,对于生态脆弱区,尤其是降水频繁、自然灾害频发的区域,需结合区域地形、降水及历史资料等,综合分析水土流失易发区,划分水土流失严重区、重点防范区、重点治理区,在多功能土地整治规划设计及工程实施中做好水土流失的重点预防。

在水土流失治理过程中,需全面探究流域的地貌形态,将大尺度空间流域细化为不同情景下的小流域,给予精准的工程建设项目,采取针对性的水土流失防治技术,适度提高水土流失防治的标准及水土保持等级,加强防范应急措施,对于坡耕地进行合理规划,宜农则农,宜林则林,对于坡度相对平稳的耕、草地,应合理调整土地利用和农业产业结构布局,加强耕作区的护林工程建设,积极探索生态环境可持续发展和经济发展的平衡点。

为改善黄河中游的水土流失情况,该地区已实施了一系列工程措施,如治沟造地、淤地坝、排洪沟及众多沟道蓄水工程等,对流域内泥沙淤积、洪水冲击等都起到抑制作用,但也会对本文土壤侵蚀精准估算有所影响。鉴于研究区为大尺度流域,一系列工程措施数据获取困难,在土壤流失量模型估算中,工程措施因子计算可能会存在较大的偏差,所以在未来模型创建或者土壤流失量估算中应重点考虑工程措施对水土保持影响的评价。

5 结论

(1) 黄河中游以微度侵蚀为主,多出现在植被发育良好的低海拔地带,中度以上侵蚀出现在黄土高原腹地的粗沙多沙区。2000—2010 年土壤侵蚀减幅高于 50%,在生态工程影响下,海拔 $1\,000\sim 1\,500\text{ m}$, $8^\circ\sim 25^\circ$,半阳坡和半阴坡的土壤流失量下降最显著。耕、林和草地等水土流失治理成效表现为林地 $>$ 草地 $>$ 耕地,且植被覆盖度 30%~50% 区间内侵蚀面积变化最剧烈,为退耕还林工程重点恢复重建区。

(2) 黄河中游多年间降雨呈自西北向东南逐渐增加的分布特征,具有明显的季节差异,年际间呈不显著波动上升趋势,具有加剧土壤侵蚀的潜在条件。黄河中游长期呈现农牧为主体的土地利用格局。土地利用转移以耕流向林、草地,草流向林和建设用地区为主,多年间坡度较陡的耕地不断流向对地形适应性和弹性较高的林草地,侧面反映了国家退耕工程核心一部分是将坡耕地变为林、草地,从而增强对水土流失的防治作用。平均植被覆盖度呈线性波动上升的特征,增加量从西北到东南递增,与土壤侵蚀锐减格局呈现高度一致性,植被覆盖是影响土壤侵蚀的主控因素。

(3) 影响土壤侵蚀的众多因子中,降雨、植被、土地利用和地形是引起土壤侵蚀变化的主导因素,任意两种因子交互作用力均大于单个因子。植被覆盖度与坡度的交互作用影响力最强,为第一主导,坡度与

土地利用、坡度与降雨为第二、三主导。植被覆盖度、坡度与其他因子协同作用可显著性增强对土壤侵蚀格局演变的作用力。在黄河中游大尺度空间上以植被覆被变化为主要特征的生态工程主导了土壤侵蚀下降的过程和程度。

参考文献:

- [1] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报, 2020,34(4):21-30.
- [2] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [3] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J].水土保持研究,2017,24(5):63-68.
- [4] 穆兴民,顾朝军,孙文义,等.植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J].人民黄河,2019,41(10):31-39.
- [5] 林依雪,李艳忠,余文君,等.植被恢复工程对黄河中游 12 个典型流域水热平衡的影响研究[J].地理研究, 2020,39(11):2593-2606.
- [6] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[R]. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,等.基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J].生态学报,2020,40(10):3473-3485.
- [10] Li P, Chen J, Zhao G, et al. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901[J]. Science of the Total Environment, 2022,823:153674.
- [11] 李艳忠,刘昌明,刘小莽,等.植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J].自然资源学报,2016,31(12):2005-2020.
- [12] 祝艳波,兰恒星,彭建兵,等.黄河中游地区水土灾害机理与灾害链效应研究进展[J].人民黄河,2021,43(8):108-116,147.
- [13] Zhang Y, Chao Y, Fan R, et al. Spatial-temporal trends of rainfall erosivity and its implication for sustainable agriculture in the Wei River Basin of China[J]. Agricultural Water Management, 2021,245:106557.
- [14] Xie Y, Yin S, Liu B, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016,535:547-558.
- [15] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the Asae, 1984,27(1):129-0144.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 郭达,宋小宁,董震,等.基于 RUSLE 与 GIS 的黄土高原水土流失评价研究:以宁夏中卫地区为例[J].泥沙研究,2020,45(5):55-60.
- [19] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [20] 刘宇林.黄土高原土壤侵蚀对植被恢复的响应[D].陕西杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.
- [21] 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.
- [22] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.
- [23] 崔秀萍,郭永新.近 40 年西部城市群土地利用结构时空动态演化分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(2):16-24.
- [24] 臧玉珠,刘彦随,杨园园.山区县域土地利用格局变化及其地形梯度效应:以井冈山市为例[J].自然资源学报,2019,34(7):1391-1404.
- [25] 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.
- [26] 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.