

DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2023.01.034

基于 USLE 模型的泾灞河流域土壤侵蚀研究

孙超 韩伟刚 齐苑儒

(陕西省水利电力勘测设计研究院 陕西 西安 710001)

摘要: 对泾灞河流域土壤侵蚀状况进行定量研究,识别出侵蚀集中来源区域,为全运湖水环境综合施策布局提供指导。利用实测数据、遥感数据及收集资料,按照通用土壤侵蚀方程 USLE 模型的国内研究成果进行土壤侵蚀空间识别研究。2020 年泾灞河流域平均土壤侵蚀模数为 830.91 t/(km²·a),土壤侵蚀面积为 696.46 km²,占全流域土地面积的 27.79%。从空间分布上看,土壤侵蚀主要集中于灞河流域,辋川河流域及库峪河流域。泾灞河流域依据侵蚀集中指数及识别区域,优先开展调控措施,全运湖的减蚀澄清效果将较为明显。

关键词: 土壤侵蚀方程模型(USLE); 泾灞河; 土壤侵蚀; 侵蚀集中指数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)01-0226-07

Soil Erosion in Chanba River Basin Based on USLE Model

SUN Chao, HAN Weigang, QI Yuanru

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: Quantitative analysis of soil erosion were conducted in Chanba River Basin to identify the intensive soil erosion source and steer the implementation of overall water environment treatment strategies in Quanyun Lake. Field test data, remote sensing data and collecting data were used to identify the spatial distribution of soil erosion based on results of USLE model. The average soil erosion in Chanba River Basin is 830.91 t/(km²·a) in 2020, while the soil loss is up to 696.46 km² accounting 27.79% of the total land areas of Chanba River Basin. Spatially, soil loss happened intensively in Chanba River Basin, Wangchuan River Basin and Kuyu River Basin. Regulating measures need to be implemented in Chanba River Basin based on erosion concentration index and identified regions will contribute significantly to soil erosion reduction and water purification in Quanyun Lake.

Keywords: Universal Soil Loss Equation(USLE); Chanba River; soil erosion; erosion concentration index

降雨径流对土壤的侵蚀作用是河流中挟带泥沙的主要决定因素,根据相关研究^[1-3]表明,河流泥沙的运动规律是水体浑浊程度的主要影响因素,浊度作为一个重要的水质指标,反映了水中的悬浮物,使光线在透过水层受到阻碍的程度。据历年观测,每逢汛期,泾灞河水体浊度都会随流量的增加而相应的升高,呈现“水多水浑”的现象^[4]。全运湖是泾灞河流域生态治理的重要节点,也是西安奥体中心核心景观、水秀展演的重要载体。泾灞河现状坝群具备一定坝前水深,可拦蓄降低流速,使泥沙沉淀,有效降低汛期泥沙所造成的水体的浊度。如何及

时、精准、分级地开展流域库坝联合调度,实现来水沉沙澄清,是全运湖水环境保障施策的重要难题之一。为充分保障泾灞河核心区全运湖“充足水量、清澈水质”的目标要求,针对泾灞河流域的土壤侵蚀进行评价分析,识别出侵蚀集中来源区域十分必要。

国内外研究者在研究土壤侵蚀时构建诸多数学模型^[5-6],得到最为广泛运用的是 USLE 土壤侵蚀方程模型,通过 Wischmeier 等^[7-8]于 1965 年提出的通用土壤侵蚀方程,早在二十世纪八十年代便引入中国。基于此模型,使土壤发生侵蚀的因子包括降

收稿日期: 2022-10-21

修稿日期: 2022-11-16

基金项目: 西安市护城河水质保持与提升关键技术研究(2019slkj-04); 陕西省生态灌区评价指标与综合技术体系研究(2021slkj-17)

作者简介: 孙超(1987—),男,硕士,高级工程师,从事水生态保护与修复及研究工作。E-mail: 38872633@qq.com

雨侵蚀力、地形(坡长、坡度)、土壤可蚀性和水土保持措施等。经由我国研究者四十年来实验资料为依据进行深入分析与完善后,明确计算各因子的方法与 USLE 模型相适应。王涛^[9]采用修正土壤侵蚀模型定量分析陕北洛河流域不同的土壤侵蚀影响因素; 司家济^[10]应用通用土壤侵蚀模型(USLE)分析合肥颍河流域土壤侵蚀; 肖武等^[11]利用 USLE 模型进行了巢湖流域不同时期的土壤侵蚀评价。国内研究多采用 USLE 模型进行大尺度区域土壤侵蚀空间分级评价与动态变化分析,本文基于通用土壤侵蚀方程,在完成泾渭流域土壤侵蚀分级评价的基础上,开展泾渭流域各子流域内不同等级侵蚀斑块集聚程度的量化计算,识别出泾渭流域侵蚀集中区域,为泾渭河流域水环境综合施策布局提供指导。

1 研究区域

泾渭流域东经 109°00′—109°47′、北纬 33°50′—34°27′处于西安城区东南;流域南临秦岭,北接渭河平原;东与渭南市临渭区、商洛市洛南县、商州区毗邻,西与长安区、雁塔区、未央区接壤,北与高陵区、临潼区相望,南与商洛市柞水县相连,流域南北长约 78 km,东西宽 50 km,流域总面积 2 506 km²。

渭河作为渭河一级支流,源起于蓝田和渭南交界的筒峪岭南九道沟,上游有较大的清峪、道沟峪、清河、辋川河等河流汇入,下游有泾河于未央区广大

门汇入渭河后向北流经 10 km 入渭河,上游有岱峪河、汤峪河、库峪河及荆峪沟等河流融入。流域属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年来均温 13.3℃,降水量平均 830 mm。如图 1 所示。

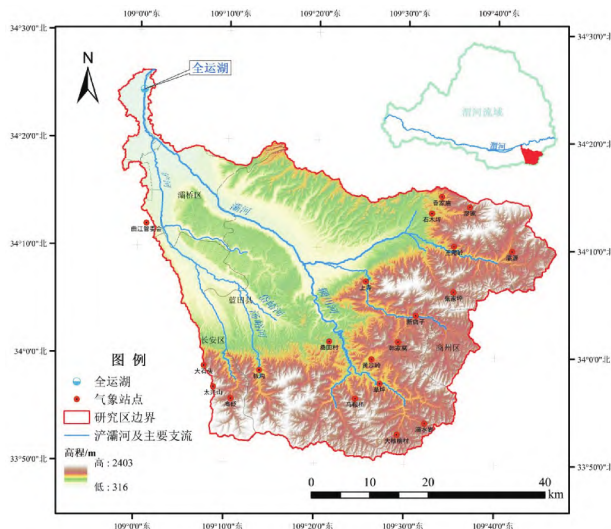


图 1 研究区位置图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所采取的数据涵盖地形高程、植被覆盖、土地类型、土壤类型、降雨,数据来源与精度等见表 1。采取 WGS_1984 地理坐标系;其投影数据是 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

表 1 泾渭河流域土壤侵蚀评估所需数据

数据名称	精度	用途	数据来源
数字高程数据 (DEM)	12.5 m × 12.5 m	提取流域范围、河网数据; 计算坡长坡度因子(LS)	NASA_12.5m_DEM (www.rivermap.cn)
Landsat_8 遥感影像 (2020_4)	30 m × 30 m	计算植被归一化参数 (NDVI)、植被覆盖度(VC) 及作物管理因子(C)	地理空间数据云 (www.gscloud.cn)
土地利用分布图 (Land_use)	10 m × 10 m	提取水土保持措施因子(P)	ESA_Sentinel_2 (livingatlas.arcgis.com/landcover)
降雨数据	逐日降雨量	计算降雨侵蚀力因子(R)	2020 年流域内气象站点实测逐日数据
土壤类型分布及理化性质 (Soil_type)	250 m × 250 m	计算土壤可蚀性因子(K)	托米斯拉夫·亨格尔 ^[12] (《Predictive Soil Mapping with R》)

2.2 研究方法

土壤侵蚀强度计算采用通用土壤流失方程 (USLE) 表达式如下:

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

式中: A 为土壤侵蚀模数 t/(km²·a); LS 为地形因子,包括坡长因子 L 与坡度因子 S,无量纲; R 为降雨

侵蚀力, MJ·mm/(hm²·h·a); K 为土壤可蚀性因子 t·hm²·h/(MJ·hm²·mm); C 为植被覆盖及管理作物因子; P 为水土保持措施因子。

USLE 通用土壤流失方程为美国所开发,即预报土壤侵蚀模型,特征是经验性,旨在定量预报农地或者草地坡面多年来平均的土壤流失量;较为全方

位地考量土壤侵蚀环境等相关因素,在规划与保持水土、管理土地资源等领域中得到极其广泛的运用。

2.2.1 土壤侵蚀因子(K)

在土壤侵蚀过程中,不同类型的土壤受侵蚀破坏的难易程度并不相同,这种抗侵蚀能力的差异定义为土壤侵蚀性。

本文采用 wischmeier(1935) 提出的用于计算土壤侵蚀性因子的通用方程:

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (2)$$

式中: f_{csand} 为高含砂量土壤的低可蚀性因子及低含砂量土壤的高可蚀性因子; f_{cl-si} 为黏粒/粉粒高的土壤的低可蚀性因子; f_{orgc} 为高有机碳含量土壤的可蚀性减小因子; f_{hisand} 为极高含砂量土壤的可蚀性减小因子。

各因子公式是:

$$f_{csand} = 0.2 + 0.3 \cdot \exp\left[-0.256m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)\right] \quad (3)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0.3} \quad (4)$$

$$f_{orgc} = 1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3.72 - 2.95 \cdot orgC)} \quad (5)$$

$$f_{hisand} = \frac{1 - 0.7 \cdot (1 - m_s/100)}{1 - m_s/100 + \exp[-5.51 - 22.9 \cdot (1 - m_s/100)]} \quad (6)$$

式中: m_s 为土壤砂粒 ($d = 0.05 \text{ mm} \sim 2.00 \text{ mm}$) 颗粒含量, %; m_{silt} 为土壤粉粒 ($d = 0.02 \text{ mm} \sim 0.05 \text{ mm}$) 颗粒含量, %; m_c 为土壤黏粒 ($d < 0.02 \text{ mm}$) 颗粒含量, %; $orgC$ 为土壤有机碳含量, %。

本文采用荷兰瓦赫宁根大学托米斯拉夫·亨格尔教授 (Tomislav Hengl) 2019 年制作的全球土壤数据集^[12], 由此获取济灞河流域不同地层土壤理化参数, 并通过式(2)一式(6) 计算出 K 因子分布数据, 如图 2 所示。

2.2.2 地形因子(LS)

基于土壤通用侵蚀方程, 地形因子充分地考虑到坡度的坡长影响土壤侵蚀的情况与程度, 坡度对地面平坦度进行表征, 一般情况下, 坡长指坡面中水流轨迹投影于水平面的具体长度; 坡度愈大, 则土壤愈严重地侵蚀; 坡长愈大, 形成愈小的径流; 本研究所采取的计算地形因子的公式是:

$$S = \begin{cases} 10.8 \cdot \sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \cdot \sin\theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ 21.9 \cdot \sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (7)$$

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

$$\begin{cases} \lambda = \text{flowacc_cellsize} \\ \alpha = \frac{(\sin\theta/0.0896)/(3.0 \cdot \sin^{0.8}\theta + 0.56)}{1 + (\sin\theta/0.0896)/(3.0 \cdot \sin^{0.8}\theta + 0.56)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: L 为标准化到 22.13 m 坡长的土壤侵蚀量; θ 为坡度 ($^\circ$); λ 为坡长, μm ; flowacc_cellsize 为上坡来水总像元边长, μm ; α 为坡长因子指数。

本文计算采用 12.5 m 栅格数据, 计算地形因子空间栅格分布, 如图 3 所示。

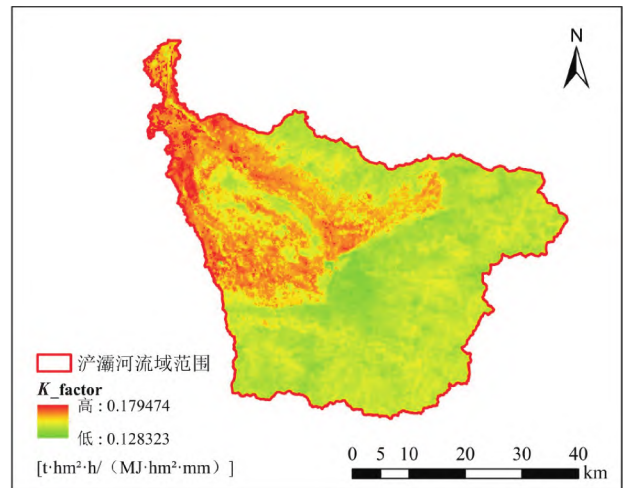


图 2 济灞河流域土壤侵蚀因子(K)分布图

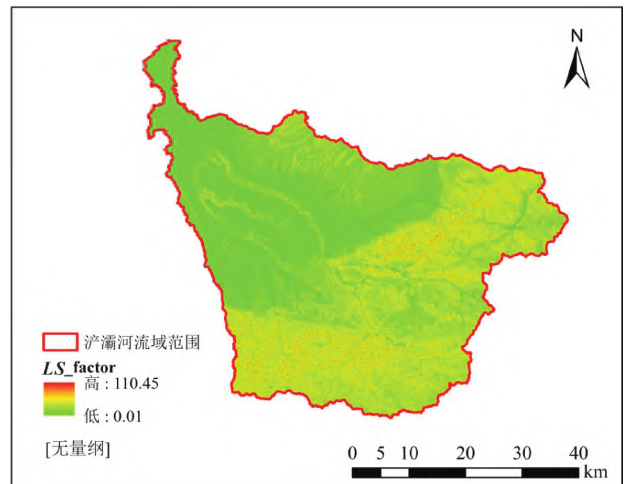


图 3 济灞河流域地形因子(LS)分布图

2.2.3 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力因子 R 密切地关联着降雨量与强度及历时、雨滴的大小与下降的速度等因素, 体现降雨侵蚀土壤的潜在能力; 本研究采取 Wischmeier^[7-8] 的具有代表性的算法将 R 因子计算出

来,此公式考虑到年降水量与逐月降雨情况:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \cdot 10^{(1.5 \cdot \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8188)} \quad (9)$$

式中: P_i 为逐月降雨量, mm; P 为年降雨量, mm。

本文采用式(9)运算沪灞河流域中与周围 20 站点的 R 值,单位是 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,反距离权重插值数据且获取 2020 年沪灞河流域降雨侵蚀力因子 R 分布数据,如图 4 所示。

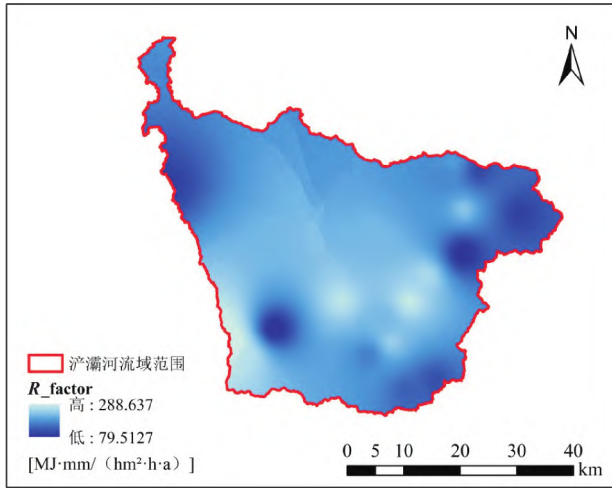


图 4 沪灞河流域降雨侵蚀力因子(R)分布图

2.2.4 植被覆盖及作物管理因子(C)

C 因子的取值密切地关联着植被的类型与长势及覆盖度;现阶段明确 C 值法包括人工赋值法、遥感数据定量估算法、小区实验法^[13],但应用最广泛的方法是通过 NDVI 运算 C 因子。本研究采取遥感数据定量估算法计算 C 因子,采取 landsat8 影像获得 NDVI 值,将植被覆盖度计算出来,因为沪灞河湖各年度四月份种植与植物生长现状可体现植被的覆盖值,本研究采取 2020 年 4 月份 landsat8 遥感影像计算植被覆盖度 f_c 。公式如下:

$$f_c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (10)$$

式中: $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为裸岩、土壤等植被覆盖像元的归一化指数; NDVI_{veg} 为纯植被覆盖像元的归一化指数。

C 即按照地面植被覆盖的不同情况而体现植被影响土壤侵蚀的重要因素,密切地关联着利用土地的类型与覆盖度,按照蔡崇法等^[14]的观点,其公式如下:

$$C = \begin{cases} 1 & f_c < 0\% \\ 0.6508 - 0.3436 \lg(f_c) & 0 < f_c < 78.3\% \\ 0 & f_c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

式中: f_c 为植被覆盖度。

在植被覆盖度比 78.3% 大时,地表侵蚀量是微弱的且可不计;在其值是负数的时候,基本上不体现减蚀作用;沪灞河流域 C 因子空间分布如图 5 所示。

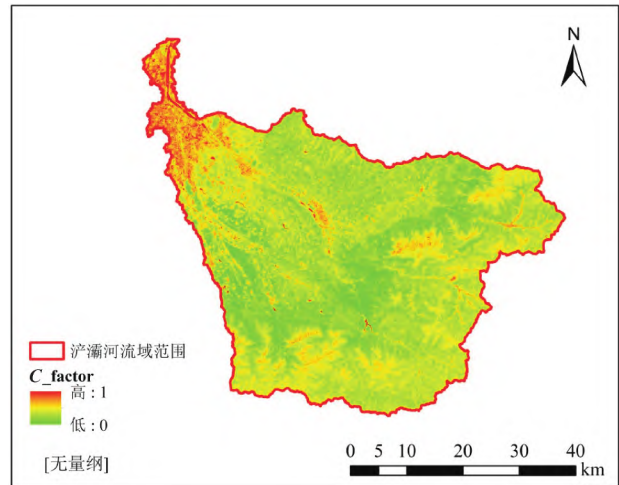


图 5 沪灞河流域植被覆盖与作物管理因子(C)分布图

2.2.5 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子 P 即基于特定的保持水土策略,土壤流失量和没有施行保持水土策略的地块顺坡耕作的时候,流失量的比值。可将 P 因子认定成最为不确定的;无量纲的范畴是 0 ~ 1: 因子值愈小,则愈与 0 靠近,说明保持水土策略取得愈良好的成效;因子值愈与 1 靠近,说明策略取得较差的成效,不采用策略时 P 等于 1。

本文借鉴我国水土保持措施因子表^[15],并结合符素华等的研究结果^[16],按照不同土地利用类型,获取研究区的水土保持因子 P 值见表 2。

表 2 沪灞河流域水土保持措施因子 P 值一览表

土地利用类型	水体	林地	草地	耕地	灌木	建设用地	裸地
P 值	0.00	0.80	0.90	0.35	0.75	0.00	1.00

将值赋予对应的土地利用类型,获取含有水土保持措施因子 P 空间分布如图 6 所示。

3 结果与分析

叠加运算各因子栅格图层,获取 2020 年沪灞河流域土壤侵蚀模数结果,研究沪灞河流域 2020 年土壤侵蚀空间分布特征,提出侵蚀集中指数(Erosion Concentration Index),识别出沪灞河流域侵蚀集中来源区域。

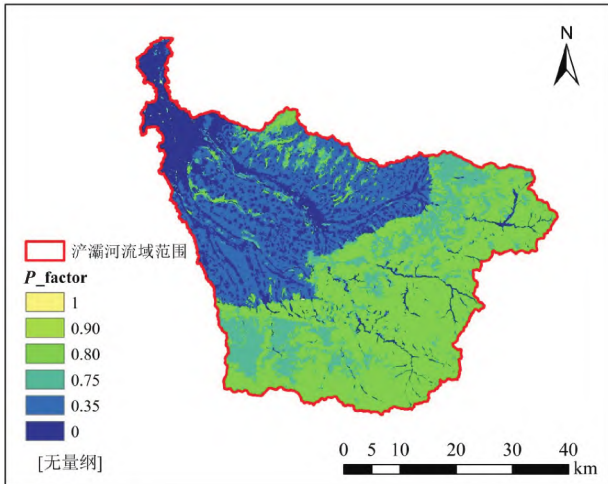


图 6 浈灞河流域水土保持措施因子(P)分布图

3.1 浈灞河流域土壤侵蚀分级评价

根据水利部颁发的土壤侵蚀强度分类分级标准^[17] 将浈灞河流域划土壤侵蚀强度等级划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈及剧烈侵蚀。研究区土壤侵蚀强度如图 7 所示。

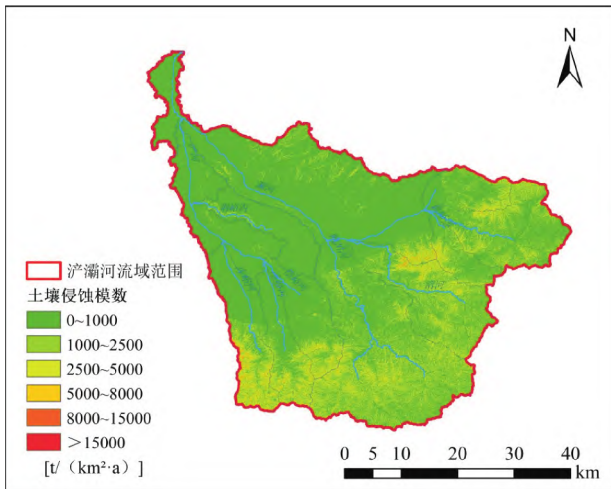


图 7 浈灞河流域土壤侵蚀分级分布图

表 3 浈灞河流域土壤侵蚀分级统计

侵蚀等级与指标 $t/(km^2 \cdot a)$	面积 km^2	面积占 比/%	侵蚀量 $t/(t \cdot a^{-1})$	侵蚀量 占比/%
微度: 0 ~ 1000	1809.73	72.21	439600.16	21.11
轻度: 1000 ~ 2500	483.46	19.29	795486.79	38.20
中度: 2500 ~ 5000	178.43	7.12	611816.80	29.38
强烈: 5000 ~ 8000	29.25	1.17	182837.02	8.78
极强烈: 8000 ~ 15000	5.13	0.20	50186.47	2.41
剧烈: >15000	0.16	0.01	2707.15	0.13
合计	2506.19	100.00	2082426.15	100.00

(1) 浈灞河流域 2020 年平均土壤侵蚀模数为

$830.91 t/(km^2 \cdot a)$,流域内土壤侵蚀总量为 $2.08 \times 10^6 t/a$ 。通过表 3 统计可知 ,浈灞河流域微度侵蚀面积最大且其值是 $1809.73 km^2$,在流域面积中占比 $72.21%$;其次是轻度侵蚀 ,面积为 $483.46 km^2$,轻度等级侵蚀总量最大 ,为 $7.95 \times 10^5 t/a$;研究区土壤侵蚀以轻度与中度侵蚀为主 ,侵蚀量占比 $67.58%$,侵蚀面积达到 $661.89 km^2$ 。浈灞河流域水土流失治理成绩较为显著 ,土壤侵蚀模数较以往^[18] 均呈现不同程度的减小 ,但沿山洪(冲)积扇和黄土台塬等局部区域水土流失治理形势依然严峻。浈灞河流域土壤侵蚀主要集中于灞河流域 ,灞河流域土壤侵蚀以辋川河流域为首 ,侵蚀量全流域占比 $31.18%$;浈河流域土壤侵蚀以库峪河流域为首 ,侵蚀量全流域占比 $11.07%$ 。

3.2 空间分布及侵蚀集中指数分析

为全面表征浈灞河流域主要支流的水土流失空间差异性 ,本研究把流域微度等级以上侵蚀图斑进行权重赋值后 ,结合土壤侵蚀模数空间分布 ,提出了侵蚀集中指数(Erosion Concentration Index) ,对浈灞河各级子流域土壤侵蚀进行空间识别分析。公式如下:

$$ECI = \frac{1}{n} \sum_i^n [KDE] \cdot A_i \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

式中: $[KDE]$ 为浈灞河流域不同等级侵蚀图斑等级赋值的核密度 ,轻度、中度、强度、极强和剧烈侵蚀等级赋值分别为 $2/m^2$ 、 $3/m^2$ 、 $4/m^2$ 、 $5/m^2$ 、 $6/m^2$; A_i 为浈灞河流域第 i 个图斑侵蚀模数 $t/(km^2 \cdot a)$ 。研究区侵蚀集中指数空间分布如图 8 所示。

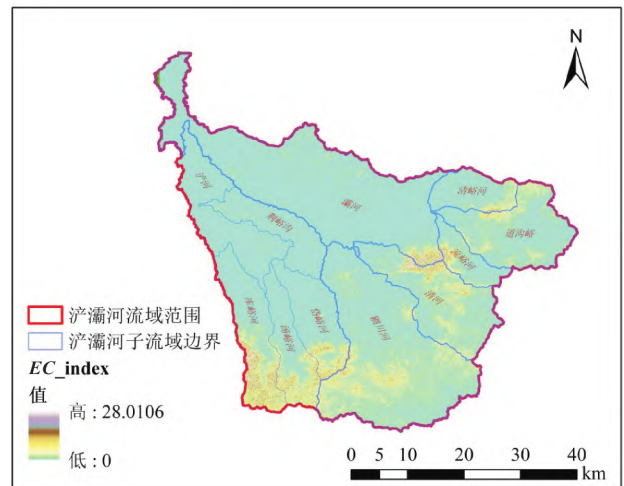


图 8 浈灞河流域侵蚀集中指数分布图

由表 4 可知 ,灞河流域土壤侵蚀量占浈灞河流域的 $74.94%$,灞河支流辋川河侵蚀量全流域占比为 $31.18%$,浈河支流库峪河侵蚀量全流域占比

11.07%。

从本文提出的侵蚀集中指数看,泾河流域大于渭河流域,表明泾河流域较高等级侵蚀图斑相对集中,识别区域内的水土流失情势仍较为严峻,应优先考虑调控措施布局;泾河支流库峪河、汤峪河侵蚀集中指数与侵蚀模数、侵蚀总量大小及空间分布保持一致,在识别区域汇流节点处上游及时开展相应措施后,减蚀效果也将较为明显。渭河支流清河与流峪河的侵蚀集中指数分别位于渭河流域前两位,而

侵蚀总量最大的辋川河流域的侵蚀集中指数仅列第三,表明渭河流域高侵蚀等级的图斑集中于清河与流峪河。通过模型结果推算,辋川河流域中度以下的侵蚀图斑占比高达 98.92%,也充分验证了本文提出的侵蚀集中指数的指示性。因此,在辋川河、清河及流峪河的侵蚀集中区域汇流节点上游,开展同等启蓄调控措施后,渭河流域减蚀澄清效果将最为明显。

表 4 泾渭河子流域土壤侵蚀及侵蚀集中指数

泾渭河流域 主要支流	侵蚀模数 $t/(km^2 \cdot a)$	面积 $/km^2$	面积占比 $\%$	侵蚀量 $/(t \cdot a^{-1})$	侵蚀量占比 $\%$	侵蚀集中指数 ECI
泾河	705.07	740.01	29.53	521758.85	25.06	0.35
库峪河	1337.13	172.33	23.29	230427.61	11.07	0.82
岱峪河	821.11	139.07	18.79	114191.77	5.48	0.32
荆峪沟	145.82	121.41	16.41	17704.01	0.85	0.02
汤峪河	1228.41	120.34	16.26	147826.86	7.10	0.58
渭河	883.64	1766.18	70.47	1560667.30	74.94	0.26
辋川河	1208.71	537.10	30.41	649198.14	31.18	0.35
清河	1325.80	231.84	13.13	307373.47	14.76	0.47
道沟峪	1124.04	217.23	12.30	244175.21	11.73	0.28
清峪河	911.98	92.41	5.23	84276.07	4.05	0.23
流峪河	1145.87	70.41	3.99	80680.71	3.87	0.38

4 结 论

本文基于 USLE 模型,定量核算了泾渭河流域土壤侵蚀强度空间分布特征,分析评价了泾渭河流域土壤侵蚀等级及空间分布,提出侵蚀集中指数,对各级子流域进行调控优先程度进行排序,形成主要结论如下:

(1) 泾渭河流域 2020 年平均土壤侵蚀模数为 $830.91 t/(km^2 \cdot a)$,土壤侵蚀总量为 $2.08 \times 10^5 t/a$,土壤侵蚀面积 $696.46 km^2$,主要以轻度与中度侵蚀为主。

(2) 泾渭河流域土壤侵蚀主要集中于渭河流域,渭河流域土壤侵蚀以辋川河流域为首,侵蚀量全流域占比 31.18%;泾河流域土壤侵蚀以库峪河流域为首,侵蚀量全流域占比 11.07%。

(3) 侵蚀集中指数(Erosion Concentration Index),可有效表征不同侵蚀等级图斑的聚集程度,在泾渭河流域轻度—中度为主的同级子流域调度措施优先级排序中,具备指示作用。从侵蚀集中指数来看,得出泾渭河流域同级子流域调控优先程度识别排序如下:①一级支流:泾河流域 > 渭河流域;②二

级支流:库峪河 > 汤峪河 > 清河 > 流峪河 > 辋川河 > 岱峪河 > 道沟峪 > 清峪河 > 荆峪沟。

(4) 依据侵蚀集中指数的优先程度识别排序,结合降雨径流预报成果,充分利用泾渭河流域内现有库坝系统,采用分级联调联控、应时启蓄拦沙等措施,可有效保障全运湖“水量充足、水质清澈”的目标要求。

参考文献:

- [1] 郭 喆. 水库型水源浊度预测分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [2] 华逢耀. 降雨径流对金盆水库分层及水质的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [3] 李馨欣. 小流域泥沙来源解析[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [4] 孙 超, 董旭荣, 韩伟刚, 等. 泾渭河流域水量联合调度技术方案[R]. 西安: 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2020.
- [5] 张启旺, 安俊珍, 王 霞, 等. 中国土壤侵蚀相关模型研究进展[J]. 中国水土保持, 2014(1): 43-46, 69.
- [6] 陈永宝, 黄传伟, 陈志伟, 等. USLE 在我国的应用和发展[J]. 中国水土保持, 2003(10): 15-17, 46.
- [7] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall erosion loss-

- ses from cropland east of the rocky mountains [M]. Agriculture Handbook 282. Washington ,DC: USDA - ARS , 1965.
- [8] Wischmeier W ,Smith D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning [M]. Agriculture Handbook 537. Washington ,DC: USDA - ARS ,1978
- [9] 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.
- [10] 司家济. 基于 ArcGIS 和 USLE 模型的颍河流域土壤侵蚀研究 [J]. 人民珠江 2020 ,41(6) : 93-98.
- [11] 肖 武 ,徐建飞 ,杨 坤 ,等. 基于 GIS 和 USLE 模型的巢湖流域土壤侵蚀评价 [J]. 科学技术与工程 , 2017 ,17(16) : 35-43.
- [12] Hengl T ,MacMillan R A. Predictive Soil Mapping with R [M]. Wageningen , the Netherlands: OpenGeoHub foundation , 2019.
- [13] 冯 强 ,赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展 [J]. 生态学报 2014 ,34(16) : 4461-4472.
- [14] 蔡崇法 ,丁树文 ,史志华. 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.
- [15] 王万忠 ,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究 [J]. 水土保持通报 ,1996 ,16(5) : 1-20.
- [16] 符素华 ,吴敬东 ,段淑怀 ,等. 北京密云石匣小流域水土保持措施对土壤侵蚀的影响研究 [J]. 水土保持学报 2001 ,15(2) : 21-24.
- [17] 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社 2008.
- [18] 何文虹 ,李占斌 ,吴发启 ,等. 西安市水土保持规划 (2016—2030 年) [R]. 西安: 西安市水利水保工作站 2016.

(上接第 218 页)

- [6] 池成渊. 龙门起重机箱形变截面支腿的折算惯性矩 [J]. 起重运输机械 ,1979(2) : 1-5.
- [7] 葛 华. 水电站门机变截面支腿的折算惯性矩 [J]. 起重运输机械 ,1992(5) : 4-7 ,18 2.
- [8] 马尔津逊(Marzinson) . 水工建筑物的启闭机械 [M]. 行少阜 ,周新民(译) . 北京: 水利电力出版社 ,1985.
- [9] 郁永熙. 变截面构件的折算惯性矩 [J]. 起重运输机械 ,1980(2) : 75-78.
- [10] 唐宪峰. 龙门起重机变截面支腿惯性矩折算方法 [J]. 起重运输机械 2009(7) : 27.
- [11] 起重机设计规范: GB/T 3811—2008. [S]. 北京: 中国标准出版社 2008.
- [12] 姚天富. 考虑车轮约束的门式起重机刚度建模研究 [D]. 长沙: 中南大学 2004.
- [13] 严 庆. 单向移动门式启闭机的结构优化设计 [D]. 衡阳: 南华大学 2019.
- [14] 祁林攀 ,辛勇军 ,赵春龙 ,等. 基于 ANSYS 的悬臂式双向门机结构有限元分析 [J]. 制造业自动化 2017 ,39(5) : 84-88.
- [15] 李 航. 门式启闭机门架结构有限元分析及优化设计 [D]. 成都: 西南石油大学 2016.