

基于不同植被覆盖因子的土壤侵蚀时空格局及差异分析 ——以三门峡市为例

饶振兴¹, 周鑫¹, 张林静², 许德合²

(1. 河南省第四地质勘查院有限公司, 河南 郑州 450001;

2. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】对比基于归一化差值植被指数 (NDVI) 与结构化植被指数两种覆盖管理因子构建方法对修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 土壤侵蚀估算的影响, 揭示三门峡市土壤侵蚀时空格局差异及其驱动机制, 为复杂地形区侵蚀评估与水土保持管理提供参考。【方法】基于 2000—2023 年 Landsat 卫星影像、降雨、土壤、数字高程模型 (DEM) 与土地利用等多源数据, 分别构建基于 NDVI 与结构化植被指数的两类植被覆盖与管理因子 (C 因子) (C_{NDVI} 和 C_s) 并驱动 RUSLE 估算侵蚀模数; 从时间序列、空间分布与坡度分级对结果进行对比, 并采用地理探测器识别主控因子及交互作用。【结果】①两种方法均表明研究期内土壤侵蚀总体显著下降, 但基于 C_{NDVI} 的结果年际波动更大; ②空间上高值区主要位于黄河沿岸及沟谷切割强烈的地区, 台塬与河谷平原以低值为主; ③侵蚀强度随坡度增大向高等级集聚, $\geq 25^\circ$ 陡坡剧烈侵蚀占比在 C_{NDVI} 法下为 29.36%~35.28%, 在 C_s 法下为 35.30%~47.97%; ④地理探测器显示坡度为主控因子, 植被单因子解释力较弱, 但与坡度、降雨交互呈显著增强, 且 C_s 法在交互项上表现出更高的 q 值。【结论】两类 C 因子对总体格局与趋势判断一致, 但对 RUSLE 结果的差异主要由陡坡 ($\geq 25^\circ$) 高侵蚀等级结构与年际波动刻画引起; 其中 C_s 法强调植被结构信息、 C_{NDVI} 法更强调绿度变化, 分别适用于复杂地形的精细分级评估与大范围长时序快速对比分析。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 覆盖管理因子; 结构化植被指数; 三门峡市

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

土壤侵蚀作为全球广泛存在的突出环境问题, 深刻影响着生态系统稳定性、土地资源可持续利用及区域社会经济发展^[1]。水土保持与水土流失防治是流域生态治理的重要组成部分, 近年来已上升为国家层面的重大战略任务。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》以及《黄河流域国土空间规划 (2021—2035 年)》均将土壤侵蚀防治与生态安全维护列为重点内容, 进一步凸显了在流域尺度上加强土壤侵蚀监测与定量评估研究的必要性^[2-3]。

在土壤侵蚀定量模拟研究中, 通用土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 及其修正模型 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 结构简单, 参数易于获取, 已经被广泛应用于区域尺度的土壤侵蚀强度估算^[4]。其中, 植被覆盖管理因子 (C 因子) 对模拟结果影响较大, 其估算不确定性较高。现有研究大多采用基于归一化差值植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 的经验模型进行估算^[5], 并已在黄土高原等典型侵蚀区进行了验证^[3,6]。该方法可以

在一定程度上反映植被覆盖变化对侵蚀过程的调控作用, 然而 NDVI 主要表征地表绿度信息, 难以描述植被群落的垂直结构特征及枯落物层的影响, 易低估森林和灌丛的减蚀能力^[7-8]。而结构化植被指数通过综合多种遥感指标表征乔木、灌木、草本及枯落物层的覆盖状况, 能更全面地反映植被对土壤侵蚀的抑制作用^[8-10]。

在土壤侵蚀驱动机制方面, 气候条件、地形特征、土地利用格局及人类活动等因素均会对侵蚀过程产生显著影响^[9,11]。地理探测器方法能够定量揭示空间分层异质性及多因子交互作用特征, 近年来被广泛应用于土壤侵蚀驱动因素分析^[12-13]。已有研究表明, 气候变化、土地利用变化以及生态工程建设等过程对区域侵蚀格局演变具有重要影响^[14-15]。然而, 现有研究多基于单一植被覆盖管理因子构建土壤侵蚀结果, 对于不同 C 因子估算方法下侵蚀模拟差异及其对驱动机制识别结果的影响, 仍缺乏系统对比分析。

本研究以黄河中游三门峡市为研究区, 基于

收稿日期/Received: 2025-12-31

修回日期/Revised: 2026-05-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42277325)。

第一作者: 饶振兴 (1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事环境地质方面的研究。E-mail: dizhiforth@163.com。

通信作者: 张林静 (1990—), 女, 讲师, 博士, 从事环境遥感方面的研究。E-mail: zhanglinjing@ncwu.edu.cn。

2000—2023 年多源遥感及环境数据, 分别采用 NDVI 与结构化植被指数两种方法构建植被覆盖管理因子, 结合 RUSLE 模型对研究区土壤侵蚀强度进行估算。在此基础上, 对比分析了不同 C 因子估算方法下土壤侵蚀的时间变化特征、空间分布格局及侵蚀等级演变过程, 利用地理探测器方法识别了主要驱动因子, 重点探讨了植被因子与气候、地形及土地利用等因子的交互作用特征。研究结果可为区域尺度合理选择土壤侵蚀模拟方法和优化水土保持措施提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

三门峡市位于河南省西部, 地处豫、晋、陕三省交界的黄河中游, 面积约 9936 km²。区内地形起伏大, 海拔约 250~2400 多米, 如图 1 所示, 地貌以山地、丘陵和黄土塬为主。气候属暖温带大陆性季风性半干旱气候, 年均气温约 13.7°C、年降水量约 600~700 mm。降水集中于 6—9 月。土壤类型以褐土为主, 粉粒含量高、结构性弱, 抗侵蚀能力较差。土地利用类型复杂, 耕地、林地与草地镶嵌分布; 植被以林地、灌丛及草本为主。

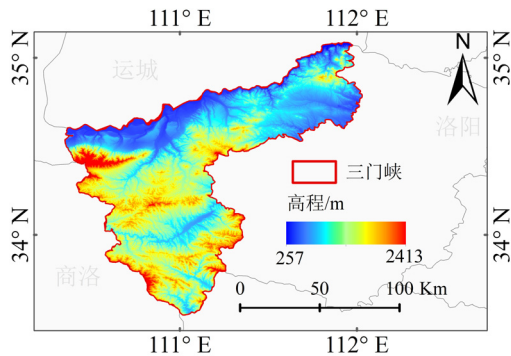


图 1 研究区概况图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据来源及预处理

本研究所用数据主要包括降雨、土壤、遥感影像、地形及土地利用等多种数据:

1) 降雨数据来源于国家青藏高原科学数据中心发布的逐月降水量栅格数据集 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2>)^[16], 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为月。

2) 土壤数据来源于土壤质地空间分布数据, 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=260>)。

3) 遥感影像数据基于 Google Earth Engine 平台获取, 2001—2012 年使用 Landsat5(TM)影像, 2013—2023 年使用 Landsat8(OLI)影像。

4) 地形数据采用的 30 m 空间分辨率的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM), 来源于地球资源数据云 (<https://gis5g.com/dataResourceDetail?resourcesId=60>)。

5) 土地利用数据采用 2020—2023 年中国 30 米土地覆盖数据集 (China Land Cover Dataset, CLCD)^[17]。为保证不同数据源在空间尺度上的一致性, 研究以 30 m 空间分辨率作为统一分析尺度。降雨等空间分辨率较粗的数据在保持原始特征的前提下, 重采样至 30 m, 并与遥感影像、DEM 及土地利用数据进行空间对齐后参与后续分析。

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀模型

本研究采用修正的通用土壤流失方程 RUSLE 定量计算研究区的土壤侵蚀量, 计算公式为:

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

式中: A 代表土壤侵蚀模数, t/(hm²·a), 乘以 100, 换算为 t/(km²·a); R 为降雨侵蚀力因子, (MJ·mm)/(hm²·h·a); K 为土壤可蚀性因子, (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm); LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子^[4]。

降雨侵蚀力因子 (R) 的计算方法较为多样, 不同方法的选择主要取决于降雨数据的时间分辨率及数据可获取性。研究采用了广泛应用的 Wischmeier 方程估算降雨侵蚀力^[11,18]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left[1.735 \times 10^{1.5 \lg \left(\frac{P_i^2}{P} \right) - 0.08188} \right] \quad (2)$$

式中: P_i 为该年第 i 月的降雨量, mm; P 为年降雨量, mm; R 为年降雨侵蚀力, (MJ·mm)/(hm²·h·a)。

土壤可蚀性因子 K 是定量判断土壤在降雨作用下侵蚀难易程度的重要指标, 其物理意义为标准小区裸地条件下单位降雨侵蚀力所引起的土壤流失量^[4]。本研究采用的是 Williams 等在 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) 模型中提出的方案, 该方法通过整合土壤中砂粒、粉粒、黏粒及有机碳的含量数据, 完成对土壤可蚀性的估算^[19], 其计算式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.75\text{SAN1}}{\text{SAN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SAN1})} \right] \quad (3)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子, $(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$; SAN 指代土壤砂粒含量、 SIL 指代粉粒含量、 CLA 指代黏粒含量、 C 指代有机碳含量; 另有衍生参数 $\text{SAN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

本研究根据研究区土壤质地空间分布数据, 获取研究区内各土壤类型对应的砂粒、粉粒、黏粒及有机碳含量比例, 然后按式 (3) 计算得到各土壤类型的 K 值。

坡度因子 S 表示在其他侵蚀因子相同条件下, 不同坡度区域土壤侵蚀量与等面积标准小区侵蚀量的比值^[4]。本文采用分段函数计算坡度因子^[20], 其式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03, & \theta < 5^\circ; \\ 16.8 \sin \theta - 0.50, & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ; \\ 21.91 \sin \theta - 0.96, & \theta \geq 10^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为坡度因子, θ 为坡度角。

坡度数据由研究区 DEM 数据在 ArcGIS 10.8 中计算获得。

坡长因子 L 表示在其他侵蚀因子相同条件下, 不同坡长区域土壤侵蚀量与等面积标准小区侵蚀量的比值。本文采用刘宝元^[20]提出的方法进行计算, 其计算式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m. \quad (5)$$

式中: L 为坡长因子, 22.13 为标准小区坡长; λ 为坡长, m 为坡长指数, 其取值如下:

$$m = \begin{cases} 0.2, & \theta < 1^\circ; \\ 0.3, & 1^\circ \leq \theta < 3^\circ; \\ 0.4, & 3^\circ \leq \theta < 5^\circ; \\ 0.5, & \theta \geq 5^\circ. \end{cases}$$

坡长数据是基于研究区 DEM 数据利用 ArcGIS 10.8 水文分析模块计算获得。

植被覆盖管理因子 (C) 用于反映植被覆盖状况对土壤侵蚀的削减作用。本文分别采用基于 NDVI 的经验模型和基于结构化覆盖指数的经验模型对 C 因子进行计算, 并对结果进行对比分析。

表 1 不同土地利用类型对应的水土保持措施因子 (P) 取值

Tab.1 Values of soil and water conservation practice factor (P) for different land use types									
土地利用类型		耕地					林地	草地	其他
坡度		$0^\circ \leq \theta < 5^\circ$	$5^\circ \leq \theta < 10^\circ$	$10^\circ \leq \theta < 15^\circ$	$15^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$20^\circ \leq \theta < 25^\circ$	$\theta \geq 25^\circ$		
P		0.1	0.221	0.305	0.575	0.735	0.8	1	1

2.2 地理探测器

为揭示土壤侵蚀空间分异的主导影响因素及其交互作用, 本文采用地理探测器 (Geographical Detector, GeoDetector) 方法进行分析, 并通过置换

基于 NDVI 数据, 采用指数衰减模型将其转化为 C 因子的计算公式为:

$$C_{NDVI} = \exp \left(-\alpha \times \frac{\text{NDVI}}{\beta - \text{NDVI}} \right). \quad (6)$$

式中 α 和 β 为经验系数, 参考已有研究的取值^[6], 分别为 2 和 1。

为弥补 NDVI 方法在区分不同植被结构方面的不足, 本文引入 Feng Qiang^[10]等在黄土高原流域研究中提出的结构化覆盖指数模型。该模型综合考虑乔木、灌木、草本及枯落物层等不同植被组分对地表覆盖的影响, 其计算公式为:

$$C_s = a + b \times \text{PVI} + c \times \text{NDSVI}. \quad (7)$$

式中: PVI 为垂直植被指数; NDSVI 为归一化枯落物指数; a 、 b 和 c 为回归系数, 参数取值均采用 Feng Qiang 等^[10]给出的结果, 分别为 0.681, -0.523 和 -1.255。

PVI 和 NDSVI 的计算公式为:

$$\text{PVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - a \times \rho_{\text{RED}} - b}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad (8)$$

$$\text{NDSVI} = \frac{\rho_{\text{SWIR1}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{RED}}}. \quad (9)$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 和 ρ_{SWIR1} 分别为近红外 (NIR)、红光 (Red) 与短波红外 1 (SWIR1) 波段的地表反射率; a 和 b 为 ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 特征空间中由裸土/低植被像元线性拟合得到的斜率和截距。本研究根据 Feng Qiang 等^[10]的研究结果, 取 1.088 和 0.056。

水土保持措施因子 (P) 为采取水土保持措施与未采取措施条件下土壤流失量之比, 其取值范围为 0~1, P 值越小表示水土保持措施效果越显著。本文基于研究区土地利用分类数据, 将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地和其他类型。结合 DEM 数据, 对耕地按坡度划分为 $0^\circ \leq \theta < 5^\circ$ 、 $5^\circ \leq \theta < 10^\circ$ 、 $10^\circ \leq \theta < 15^\circ$ 、 $15^\circ \leq \theta < 20^\circ$ 、 $20^\circ \leq \theta < 25^\circ$ 和 $\theta \geq 25^\circ$ 六个等级。水土保持措施因子 (P) 的赋值以土地利用类型、坡度分级为依据, 同时参考已有相关研究成果确定^[6], 具体取值见表 1。

检验评估 q 值的显著性, 显著性水平设为 0.05。以土壤侵蚀量作为因变量, 选取降雨、植被、土地利用和坡度等因子作为解释变量, 分别开展单因子探测和交互探测分析。降雨、植被及坡度等连续变量

按年采用分位数法离散为 5 类,土地利用则保留原始分类体系。计算过程中仅保留各因子在同一像元位置均为有效值的样本。为反映研究期整体空间格局,进一步对 2000—2023 年土壤侵蚀及相关因子进行像元尺度多年平均,并基于不少于 80% 年份具有有效值的像元开展多年平均地理探测器分析。

3 结果与分析

3.1 2000—2023 年三门峡土壤侵蚀的时间动态变化

对两种植被覆盖管理因子计算的 2000—2023 年的土壤侵蚀三门峡土壤侵蚀分别进行区域平均,其年度变化趋势如图 2 所示。2000—2023 年三门峡土壤侵蚀模数整体呈现明显的年际波动并总体表现为下降趋势。基于 C_{NDVI} 方法与 C_s 方法计算的结果在变化方向上基本一致,但数值幅度存在差异。研究初期的 2000—2005 年土壤侵蚀模数整体较高,年际波动显著,其中 C_{NDVI} 方法计算结果最大值出现在 2003 年,为 $6\,549.07\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, C_s 方法计算结果最大值出现在 2007 年,为 $6\,931.14\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2006—2012 年期间,两种方法计算结果虽总体下降,但波动仍较明显。2013 年以后,土壤侵蚀模数总体维持在较低水平,到 2023 年, C_{NDVI}

和 C_s 方法计算的三门峡市平均土壤侵蚀模数分别降至 $363.99\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1\,242.80\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。 C_{NDVI} 方法对年际变化响应更强, C_s 方法结果相对平缓。

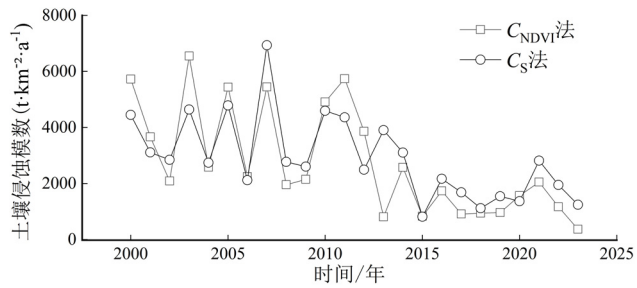


图 2 基于 C_{NDVI} 和 C_s 方法的三门峡市土壤侵蚀模数年际变化

Fig.2 Interannual variation of soil erosion modulus in Sanmenxia City based on C_{NDVI} and C_s methods

参照水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准》,研究将土壤侵蚀强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈及剧烈六个等级,对应的土壤侵蚀模数阈值分别为微度侵蚀[0, 500)、轻度侵蚀[500, 2500)、中度侵蚀[2500, 5000)、强烈侵蚀[5000, 8000)、极强烈侵蚀[8000, 15000)和剧烈侵蚀(≥ 15000)。将两种方法计算的土壤侵蚀模数进行分级,每年的统计结果如图 3 所示。

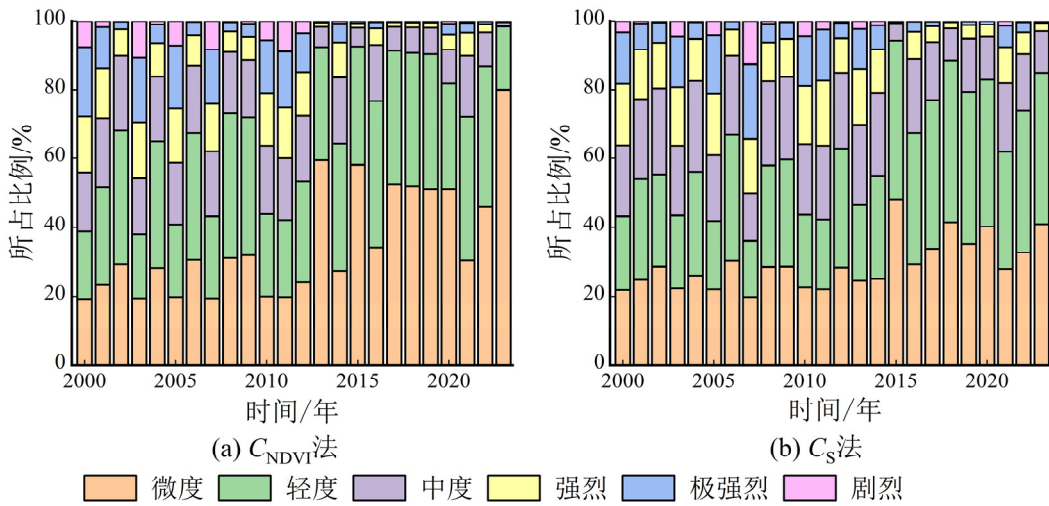


图 3 2000—2023 年三门峡市不同土壤侵蚀强度等级面积比例的年际变化

Fig.3 Interannual variation of soil erosion modulus in Sanmenxia City

2000—2023 年,微度和轻度侵蚀面积比例整体呈上升趋势,而中度及以上侵蚀面积比例总体呈下降趋势。 C_{NDVI} 方法结果中,侵蚀等级结构变化较明显,研究初期以轻度和中度侵蚀为主,2013 年后微度侵蚀面积比例显著增加,2023 年微度和轻度侵蚀面积比例分别为 79.99%和 18.31%,中度及以上侵蚀面积比例明显下降。 C_s 方法结果变化趋势与 C_{NDVI} 基本一致,但年际波动较小、等级转化幅度较弱;2023 年微度和轻度侵蚀面积比例分

别为 40.87%和 44.14%,中度及以上侵蚀面积占比仍相对较高,向低等级侵蚀转化不如 C_{NDVI} 明显。

3.2 2000~2023 年三门峡土壤侵蚀空间动态变化

基于 C_{NDVI} 和 C_s 两种方法计算得到的 2000、2010、2023 年三门峡市土壤侵蚀空间分布如图 4 所示。 C_{NDVI} 和 C_s 两种方法计算的土壤侵蚀空间分布在各年份均表现出显著的地形控制特征:高侵蚀强度区主要分布于黄河两岸及沟谷切割强烈的丘陵区,低侵蚀强度区主要集中在河谷平原等地势相

对平缓区域,侵蚀强度整体随时间变化呈现出减弱的趋势。 C_{NDVI} 法的结果中(图 4a~c), 2000 和 2010 年剧烈和极强烈侵蚀区分布较广,到 2023 年,研究区以微度为主,轻度及以上侵蚀区范围明显缩小。 C_S 法结果(图 4d~f)的空间分布特征总体与

C_{NDVI} 法的结果一致,但表现得更为平滑;2000 年和 2010 年仍可识别出一定范围的中高侵蚀区,至 2023 年侵蚀强度同样明显下降,整体以低值区为主,但局部区域仍保留少量较高侵蚀斑块,其减蚀幅度相较 C_{NDVI} 法略弱。

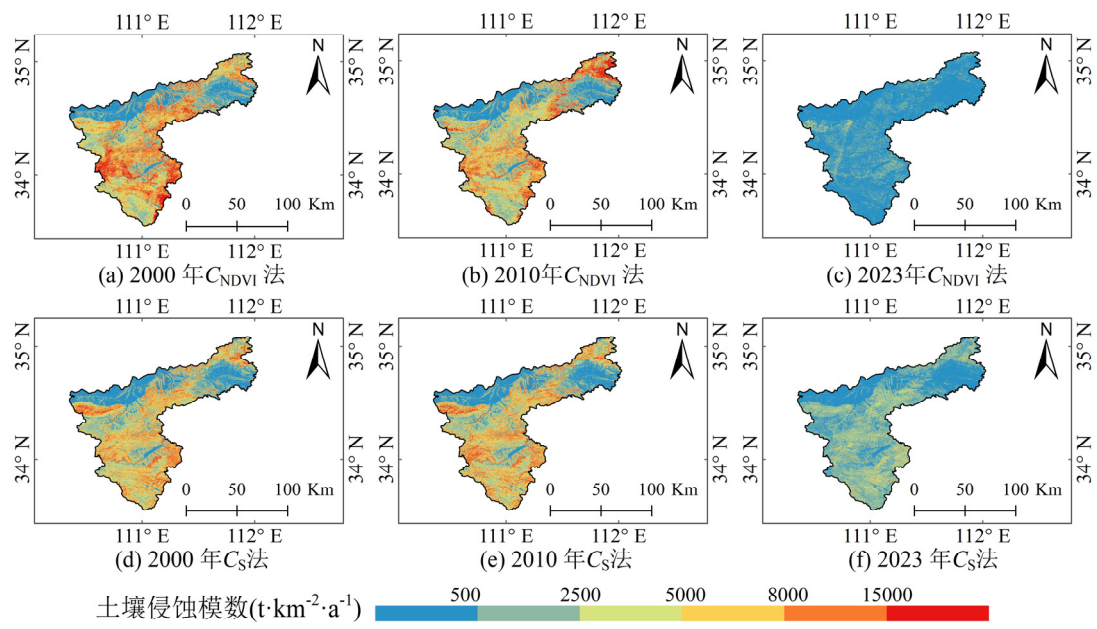


图 4 2000、2010 和 2023 年三门峡市土壤侵蚀强度空间分布对比

Fig.4 Comparison of spatial distribution of soil erosion intensity in Sanmenxia City in 2000, 2010 and 2023
为揭示土壤侵蚀强度的空间演化特征,对三门峡市 2000—2010 年与 2011—2023 年两个阶段的侵蚀等级转化进行了分析,如图 5 所示。

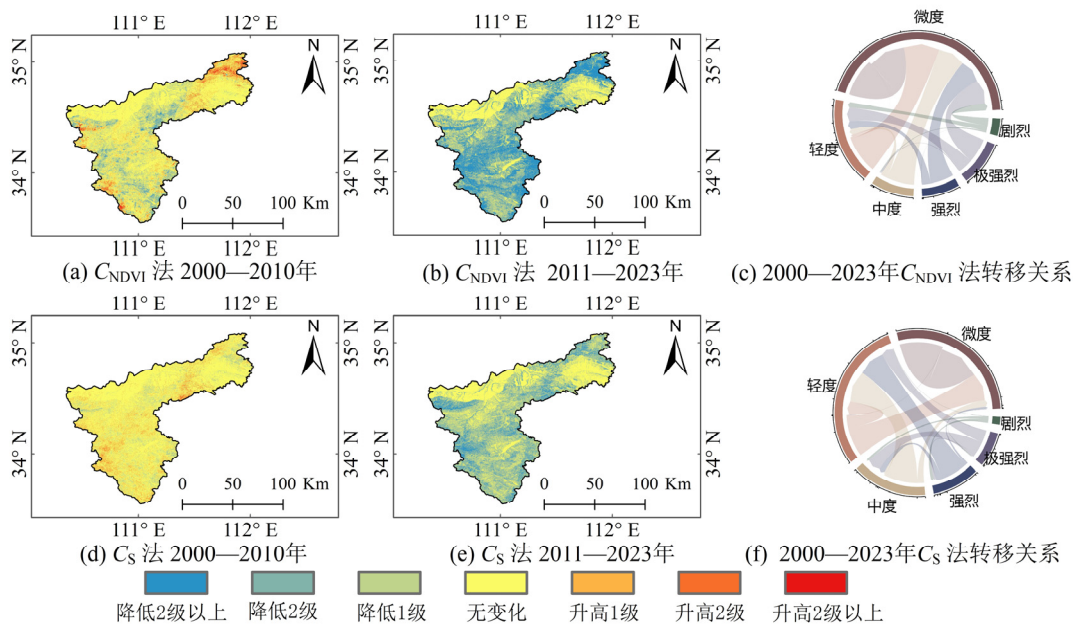


图 5 不同时段三门峡市土壤侵蚀等级空间转化特征

Fig.5 Spatial transition characteristics of soil erosion grades in Sanmenxia City during different periods

两种方法均以侵蚀等级降低和基本不变为主,侵蚀升高 2 级以上区域较少,而 2011—2023 年侵蚀等级降低 1 级及以上区域明显增加。 C_{NDVI} 与 C_S 法的结果在前一阶段均表现出一定的等级波动,后

一阶段减蚀特征更为突出,且 C_{NDVI} 法向低等级转化幅度更大(图 5)。 C_{NDVI} 法结果中微度侵蚀保持率 19.17%,轻度转微度为 18.47%; C_S 结果微度和轻度侵蚀保持率分别为 21.67%和 6.84%,同时

轻度和中度向低等级转移较明显。

3.3 不同植被因子表征方法下土壤侵蚀响应差异与稳定性分析

对图 5 所示的土壤侵蚀等级空间转化进行统计发现,不同土地利用类型下基于 C_{NDVI} 与 C_S 方法计算的侵蚀等级变化幅度存在明显差异。总体上,两种方法均表现出由高等级向低等级转化的减蚀趋势, C_{NDVI} 方法的等级下降幅度更大, C_S 方法变化相对平缓。林地、灌丛和草地中, C_{NDVI} 方法的侵蚀等级降低 2 级以上的比例由 2000—2010 阶段的 13.07%、12.82%和 7.74%升至 2010—2023 的 65.81%、74.33%和 52.98%, C_S 法的相对应比例从 1.00%、0.78%和 0.79%上升至 44.71%、48.82%和 38.51%。耕地和水域中,两种方法在后一阶段均表现出更明显的减蚀特征,但 C_S 方法的变化范围仍小于 C_{NDVI} 法。2000—2023 不同坡度等级下侵蚀强度等级的多年平均面积比例如表 2 和表 3 所示,两种方法结果均表现出随坡度增加,侵蚀等级由低强度向高强度转变的规律。

表 2 基于 C_{NDVI} 方法的 2000—2023 年不同坡度等级下侵蚀强度等级的多年平均面积比例 %

Tab.2 Multi-year average area proportion of soil erosion intensity grades under different slope classes from 2000 to 2023 based on the C_{NDVI} method %

坡度等级	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
0~5°	94.57	4.84	0.37	0.12	0.07	0.03
5~15°	45.85	40.85	8.27	3.08	1.66	0.29
15~25°	17.11	42.27	20.77	10.67	7.48	1.70
25~35°	14.26	34.60	21.78	13.31	11.86	4.19
>35°	13.26	30.87	20.59	13.75	14.13	7.40

表 3 基于 C_S 方法的 2000—2023 年不同坡度等级下侵蚀强度等级的多年平均面积比例 %

Tab.3 Multi-year average area proportion of soil erosion intensity grades under different slope classes from 2000 to 2023 based on the C_S method %

坡度等级	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
0~5°	95.61	3.89	0.32	0.10	0.05	0.03
5~15°	47.03	40.88	8.54	2.57	0.87	0.11
15~25°	9.04	46.05	26.93	11.94	5.41	0.63
25~35°	2.95	31.59	30.16	19.34	13.25	2.71
>35°	1.92	23.47	26.64	20.91	19.73	7.33

在 0~5°缓坡区,两种方法均以微度侵蚀为绝对优势;随着坡度增至 5~15°和 15~25°,轻度和中度侵蚀比例逐渐增加;在 25°以上陡坡区,强烈及以上侵蚀比例明显增加,且 C_S 方法中高强度侵蚀比例总体高于 C_{NDVI} 法。总体来看, C_{NDVI} 方法对

侵蚀减弱的响应更敏感,而 C_S 方法结果更平缓、稳定,并保留了更多中高等级侵蚀信息。为进一步评估两种方法在地形主导条件下对侵蚀强度变化的响应稳定性,选取坡度 $\geq 25^\circ$ 的陡坡区,对 2000—2023 年中度及以上侵蚀面积比例的年际变化特征进行统计。结果显示,两种方法在年际变化方向上总体一致,但 C_{NDVI} 方法波动更为明显,其年际标准差和变异系数分别为 0.296 和 0.564,均高于 C_S 方法的 0.240 和 0.353,说明 C_S 方法在陡坡区对侵蚀强度变化的响应更为平缓。

3.4 土壤侵蚀空间分异的主控因子及其交互作用分析

地理探测器分析结果如图 6 和图 7 所示,坡度因子的 q 值最高,在 C_{NDVI} 和 C_S 方法下平均分别为 0.409 和 0.436,说明地形对侵蚀格局影响最强;降雨因子的 q 值相对较低,平均分别为 0.060 和 0.066,其解释力弱于坡度;土地利用类型因子的 q 值分别为 0.063 和 0.076,整体处于较低水平。植被因子在两种方法下差异明显, C_{NDVI} 方法的平均 q 值为 0.083,而 C_S 方法仅为 0.013,表明植被因子单独作用时解释力有限,其作用更多通过与其他因子的交互体现。地理探测器的交互检测结果表明,“坡度 $\times$ 植被”与“降雨 $\times$ 植被”均表现出增强作用,对应平均 q 值在 C_{NDVI} 方法下分别为 0.558 和 0.163,在 C_S 方法下分别为 0.610 和 0.099;其中“坡度 $\times$ 植被”解释力最强,说明植被作用在地形约束下得到显著增强。“土地利用 $\times$ 植被”在两种方法下平均 q 值分别为 0.142 和 0.141,差异较小。对比 C_{NDVI} 与 C_S 两种方法可见, C_S 法在单因子“坡度”及交互因子“坡度 $\times$ 植被”上解释力更强,而 C_{NDVI} 法在单因子“植被”及“降雨 $\times$ 植被”交互作用上更为突出,反映出两种方法在植被因子及其复合作用表征上的差异。多年结果显示,两种方法的 q 值变化总体较平稳,但不同因子上的差异方向并不完全一致,说明其对土壤侵蚀空间分异的解释具有一定一致性,同时也存在方法响应差别。

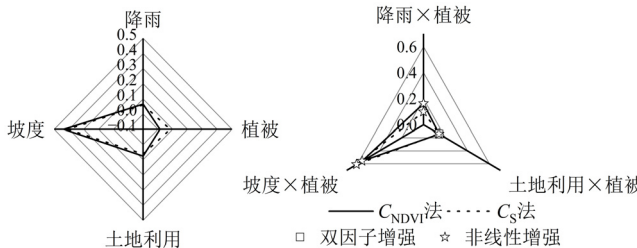


图 6 地理探测器识别的三门峡市土壤侵蚀主控因子及其交互作用特征

Fig.6 Dominant factors and their interactions influencing soil erosion in Sanmenxia City identified by the Geographical Detector

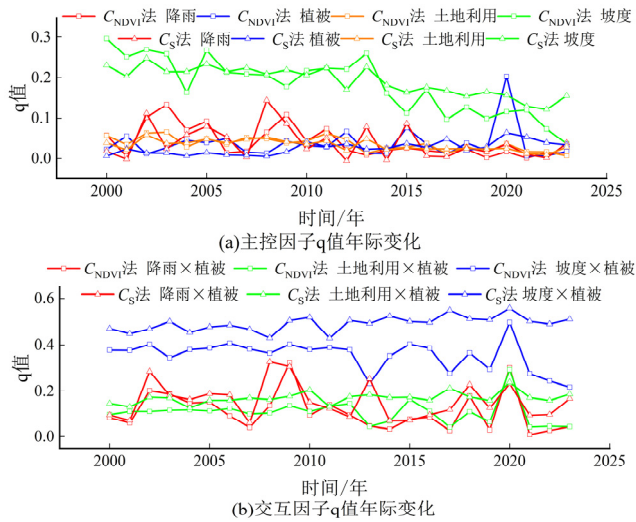


图7 三门峡市土壤侵蚀主控因子及其交互作用的年际 q 值变化特征

Fig.7 Interannual variation of q -values for dominant factors and their interactions affecting soil erosion in Sanmenxia

4 讨论与结论

4.1 讨论

土壤侵蚀由多因素共同控制。降雨提供侵蚀外力并驱动年际波动,地形条件决定坡面汇流路径与侵蚀能量的空间分配,植被与土地利用变化则通过拦截雨滴动能、增加地表粗糙度、改善入渗等过程改变坡面产流产沙^[9]。本研究表明,侵蚀空间分异以地形约束为主,高风险区多分布于起伏大、沟谷切割强烈的区域;多年尺度上侵蚀总体减弱,与黄土高原及其周缘地区关于生态工程与植被恢复促进侵蚀下降的研究结论一致^[5,21]。

两种 C 因子构建方案对总体格局判断一致,但在侵蚀量级与等级结构刻画上存在差异。 $NDVI$ 反演 C 因子是区域尺度研究中常用路径,具有数据易得、实现简便和适于长时间序列分析等优势^[7],但主要反映植被绿度信息,在高覆盖或冠层结构复杂条件下可能出现饱和,对林下的灌草层、枯落物层等结构性防护信息的表达相对不足^[9]。 C_S 强调将乔、灌、草及枯落物等组分信息纳入统一表达,使 C 因子对地表综合防护特征的特征更充分^[10]。延河流域的研究已采用结构化植被指数开展侵蚀动态分析,并讨论了其对侵蚀过程解释的作用^[6]。在本研究中,两种 C 方案的差异可能是绿度信息与结构信息在 C 因子表达中的侧重点不同。差异在坡度敏感区更为集中:在 25° ~ 35° 坡段, C_S 法结果中中度、强烈和极强烈侵蚀面积比例分别为 30.16%、19.34%和 13.25%,高于 C_{NDVI} 法的 21.78%、13.31%和 11.86%;在 $>35^{\circ}$ 坡段, C_S 法结果强烈和

极强烈侵蚀面积比例分别为 20.91%和 19.73%,亦高于 C_{NDVI} 法的 13.75%和 14.13%。相关研究指出,在 $RUSLE$ 区域化应用中, C 因子是造成侵蚀量级差异的重要来源之一,尤其在植被结构复杂或地形起伏较强区域更为明显^[4,7]。

驱动机制分析坡度对侵蚀空间分布的解释力最高, C_{NDVI} 法和 C_S 法平均分别为 0.409 和 0.436;降雨平均 q 值分别为 0.060 和 0.066,与相关研究基于地理探测器识别侵蚀驱动的结论一致^[12,13]。两方案在交互项表征上存在差异:两种方案下“坡度×植被”均表现出最强解释力;而 C_{NDVI} 法对年际绿度变化更敏感,更便于刻画绿度波动与侵蚀响应幅度之间的联系。

不同模型结构与因子参数化方案会显著影响土壤侵蚀模数的估算水平,从而降低跨流域、跨尺度以及跨研究结果的可比性。已有研究给出的侵蚀模数在不同区域之间跨度较大^[6]。除自然条件差异外,侵蚀模数还可能受参数化方案的系统性影响,尤其是 C 因子函数形式、 P 因子赋值规则以及 R 因子数据来源与算法选择等。本研究结果与已有研究的河南省结果类似^[22]。

本研究对两种 C 因子方案的比较更侧重于其对空间格局、高风险区识别及驱动机制解释的影响。在植被结构复杂、地形起伏较强且需要精细刻画侵蚀等级结构的情景下, C_S 更适用于表征地表综合防护特征;而在大范围、长时间序列的快速评估与可重复对比分析中,基于 $NDVI$ 的 C_{NDVI} 因数据易得、实现简便而更具操作性^[9,10,14]。后续研究可结合流域径流泥沙观测、小区试验数据或权威同尺度成果,在同一条件下开展偏差评估与交叉验证,进一步量化两种 C 方案的不确定性来源并界定其适用范围。

4.2 结论

1) 2000—2023 年三门峡市土壤侵蚀总体减弱、等级结构向低强度转移: C_{NDVI} 法的结果中微度和轻度侵蚀面积比例分别为 79.99%和 18.31%, C_S 法的结果分别为 40.87%和 44.14%,两方案年际变化方向一致,但波动幅度存在差异。

2) 侵蚀空间分异以地形约束为主,高风险区主要分布于黄河两岸及沟谷切割强烈丘陵区。地理探测器表明坡度解释力最高, C_{NDVI} 和 C_S 方法下平均 q 值分别为 0.409 和 0.436;“坡度×植被”和“降雨×植被”均表现为增强作用。

3) 两种 C 因子方案对总体格局判断一致,但会改变高风险区等级结构刻画, 25° 以上陡坡区中高等级侵蚀比例在 C_S 法的结果下整体高于 C_{NDVI}

法, 其中 25~35°坡段为 13.25%~30.16% (C_{NDVI} 为 11.86%~21.78%), >35°坡段为 19.73%~20.91% (C_{NDVI} 为 13.75%~14.13%); 陡坡区年际离散程度亦不同, 变异系数 C_s 法为 0.353, 低于 C_{NDVI} 法的 0.564。

4) C 因子差异主要集中在 $\geq 25^\circ$ 陡坡的高等级侵蚀结构及其年际波动表征: C_s 法侧重反映植被分层/结构防护特征, 适用于复杂地形的精细分级评估; C_{NDVI} 法侧重植被绿度变化, 适用于大范围、长时序快速评估与可重复对比分析。

参 考 文 献

- [1] Wen Linsheng, Peng Yun, Zhou Yunrui, et al. Study on soil erosion and its driving factors from the perspective of landscape in Xiushui watershed, China[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 8182.
- [2] Wu Quanlong, Jiang Xiaohui, Shi Xiaowei, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of soil erosion and its driving mechanisms—a case study: Loess Plateau, China[J]. CATENA, 2024, 242: 108075.
- [3] 穆兴民, 杜敏, 邵伟婷, 等. 黄土高原沟壑区土壤侵蚀特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 96-102. [Mu Xingmin, Du Min, Shao Yiting, et al. Analysis of soil erosion characteristics on the tableland of loess plateau[J]. Journal of North University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2023, 44(6): 96-102.]
- [4] Renard K G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington, DC: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [5] 王丰, 刘金铜, 付同刚, 等. 基于 RUSLE 模型的太行山区土壤侵蚀时空分异特征及影响因子研究[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(7): 1064-1076. [Wang Feng, Liu Jintong, Fu Tonggang, et al. Spatio-temporal variations in soil erosion and its influence factors in Taihang Mountain area based on RUSLE modeling[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(7): 1064-1076.]
- [6] 刘欢欢, 刚成诚, 温仲明. 基于结构化植被指数的延河流域土壤侵蚀时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 1-7. [Liu Huanhuan, Gang Chengcheng, Wen Zhongming. Soil Erosion Dynamics Analysis in the Yanhe Basin During 2000—2018 Based on the Structural Vegetation Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 1-7.]
- [7] Xiong Muqi, Leng Guoyong, Tang Qihong. Global Analysis of the Cover-Management Factor for Soil Erosion Modeling[J]. Remote Sensing, 2023, 15(11): 2868.
- [8] Guo Geng, Pan Ying, Kuai Jie, et al. A more accurate approach to estimate the C-factor of RUSLE by coupling stratified vegetation cover index in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 541: 120979.
- [9] 田培, 毛梦培, 潘成忠. 植被调控水土流失机制研究进展及展望[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 131-140. [Tian Pei, Mao Mengpei, Pan Chengzhong. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1): 131-140.]
- [10] Feng Qiang, Zhao Wenwu, Ding Jingyi, et al. Estimation of the cover and management factor based on stratified coverage and remote sensing indices: a case study in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(3): 775-790.
- [11] Shi Shangyu, Zheng Wende, Han Jianqiao, et al. Dominance of human activities in reducing soil erosion on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 133835.
- [12] 马含, 符素华, 董丽霞, 等. 基于地理探测器的土壤侵蚀空间分异关键影响因子分析[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(2): 33-38. [Ma Han, Fu Suhua, Dong Lixia, et al. Analysis of key affecting factors in soil erosion spatial differentiation based on GeoDetector[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(2): 33-38.]
- [13] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological indicators, 2016, 67: 250-256
- [14] Wen Boqing, Huang Chenlu, Zhou Chen, et al. Spatiotemporal dynamics and driving factors of soil erosion in the Beiluo River Basin, Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 110976.
- [15] Zhang Biao, Guo Jialong, Fang Haiyan, et al. Soil erosion projection and response to changed climate and land use and land cover on the Loess Plateau[J]. Agricultural Water Management, 2024, 306: 109187.
- [16] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集 (1901-2024)[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心/第三极环境数据中心 (2023) [2025-09-11]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2>. [Peng Shouzhang. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901-2024)[DS/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center (2023) [2025-09-11]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2>.]
- [17] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover and its

- dynamics in China from 1990 to 2019[J].Earth System Science Data 2021,13(8):3907-3925.
- [18] Wischmeier W H,Smith D D.Predicting rainfall erosion losses:a guide to conservation planning[M].Department of Agriculture,Science and Education Administration,1978.
- [19] Williams J,Nearing M,Nicks A,et al.Using soil erosion models for global change studies[J].Journal of Soil and Water Conservation,1996,51(5):381-385.
- [20] 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.
- [21] Li Ping,Xie Zhan,Yan Zihan,et al.Assessment of vegetation restoration impacts on soil erosion control services based on a biogeochemical model and RUSLE[J].Journal of Hydrology:Regional Studies,2024,53:101830.
- [22] 王美娜,范顺祥,舒翰俊,等.河南省土壤侵蚀时空分异特征及土壤保持经济价值[J].生态环境学报,2024,33(5): 730-744.[Wang Meina,Fan Shunxiang,Shu Han jun,et al. Spatio-temporal variations in soil erosion and its economic value of soil conservation in Henan province[J].Ecology and Environmental Sciences,2024,33(5):730-744.]

Spatiotemporal Patterns and Differential Analysis of Soil Erosion Based on Different Vegetation Cover Factors: A Case Study of Sanmenxia City

RAO Zhenxing¹, ZHOU Xin¹, ZHANG Linjing², XU Dehe²

(1. The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Province Co., Ltd., Zhengzhou, 450001, China; 2. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, 450046, China)

Abstract: 【Objective】 This study reveals the spatiotemporal variations and driving mechanisms of soil erosion in Sanmenxia City by comparing the effects of two cover management factor (C) construction approaches, one based on NDVI and the other on a structured vegetation index on RUSLE soil erosion estimation. It serves as a reference for erosion assessment and soil and water conservation management in complex terrain regions. **【Methods】** Two types of cover-management factors (C) of NDVI (C_{NDVI}) and structured vegetation index-based (C_s) were developed to drive RUSLE for estimating soil erosion modulus based on multi-source data from 2000 to 2023, including Landsat remote sensing, rainfall, soil, DEM, and land-use datasets. The GeoDetector approach was used to determine the primary regulating elements and their interactions after the findings were compared in terms of time series, geographical distribution, and slope categorization. **【Results】** (1) Both methods indicate a significant overall decline in soil erosion during the study period, the results based on C_{NDVI} exhibit larger interannual fluctuations, whereas those based on C_s are more stable. (2) Spatially, high erosion values are mainly concentrated along the Yellow River and in areas with intense gully incision, while tablelands and river valley plains are dominated by low erosion values. (3) Erosion intensity increasingly aggregates into higher classes with increasing slope. For steep slopes $\geq 25^\circ$, the proportion of severe erosion accounts for 29.36% to 35.28% under the C_{NDVI} results, compared with 35.30% to 47.97% under the C_s results. (4) According to the GeoDetector data, the main regulating element is slope. While vegetation alone has comparatively little explanatory power, its interactions with precipitation and slope reveal a strong enhancing impact. Furthermore, larger q-values for the interaction terms are shown in the C_s data. **【Conclusion】** Disparities in the RUSLE results are mostly caused by the two C-factor formulations' differing descriptions of the high-erosion class structure and interannual variability on steep slopes ($\geq 25^\circ$), but they both produce consistent interpretations of the overall geographical pattern and temporal trends. C_{NDVI} emphasizes changes in greenness, while C_s gives more weight to vegetation structure information. As a result, whereas the latter is more suited for quick, extensive comparisons across lengthy time series, the former is more appropriate for fine-grained classification and evaluation in difficult terrain

Keywords: soil erosion; RUSLE model; cover-management factor; structured vegetation index; Sanmenxia City