

基于三峡库区重庆段不同降雨分区的 土壤侵蚀多因子综合作用分析^{*}

胡秋宁, 肖作林, 刘 睿

(重庆师范大学 地理与旅游学院 地理信息系统应用研究重庆高校市级重点实验室, 重庆 401331)

摘要:阐明三峡库区重庆段土壤侵蚀时空变化特征,揭示不同降雨空间分区下多驱动因子对土壤侵蚀综合作用的分异规律,为区域内土壤侵蚀防治宏观决策提供科学参考。基于多源遥感影像、气象数据、DEM及土壤数据,采用 WaTEM/SEDEM 模型模拟三峡库区重庆段 2000—2020 年土壤侵蚀量,采用 ISODATA 聚类方法进行降雨空间分区,采用地理探测器进行多因子综合作用分析。研究结果显示:1) 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年研究区平均土壤侵蚀模数分别为 108.78、109.11、86.9、47.52 和 21.16 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,土壤侵蚀状况整体呈现缓解趋势,土壤发生强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀的区域大幅减少。2) 植被覆盖度因子在高降雨区对土壤侵蚀的解释力最高;土地利用类型、坡度、地貌类型、土壤类型、高程等因子在 2010 年低降雨区对土壤侵蚀的解释力较高,在 2020 年不同降雨区对土壤侵蚀的解释力则无明显差异。3) 在高降雨区,植被覆盖度与其他因子的交互作用对土壤侵蚀的解释力最高;2010 年在低降雨地区,坡度与其他因子的交互作用对土壤侵蚀的解释力较高;各驱动因子在不同降雨区的土壤侵蚀高风险区分异规律明显。由研究结果可知,三峡库区重庆段土壤侵蚀变化明显,不同降雨区划中不同驱动因子对土壤侵蚀的综合作用存在明显差异。

关键词:土壤侵蚀;降雨空间分区;综合作用;地理探测器;三峡库区重庆段

中图分类号:P208;S157.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)05-0055-09

土壤侵蚀是全球性重要生态环境问题之一^[1],对这一问题进行驱动机理揭示是生态建设和可持续发展的需要,也是相关领域的研究热点^[2-3]。地形、土地覆被变化和降雨条件作为影响流域产沙过程的关键因素,在较早的时候就得到了学界的共识^[4],而降雨通过溅蚀和形成径流冲刷造成土壤侵蚀则被认为是影响土壤侵蚀变化的关键自然因素^[5]。

有研究表明,将多个因素作综合考虑时,它们对土壤侵蚀的综合影响并不是各因素单独效应的简单叠加,而是存在一定的耦合作用^[6]。因此,在较大空间尺度以及较长时间尺度上,降雨具有的高度时空异质性与其他因素形成极具复杂性的时空耦合模式具有很大研究潜力。深刻理解降雨条件与其他驱动因素对土壤侵蚀变化的耦合作用机制,对根据气候条件来因地制宜地开展区域水土流失治理、合理调控土地覆被格局等宏观决策具有重要的现实意义。

2001 年,彭文英等人^[7]发现不同土地利用类型的产流产沙在不同的降雨强度下存在明显分异;卫伟等人^[8]基于对自然降雨事件在时间上的聚类分析,探讨了土壤侵蚀对降雨格局的响应,发现降雨集中、雨强高、历时短的降雨是黄土高原流域产沙的主要驱动因素;Yao 等人^[9]对洛河的一条支流流域的研究则表明在降雨量充沛的季节,土地覆被对流域产沙的影响程度会有所降低;钟莉娜等人^[10]通过构建降雨及土地利用格局指数,研究了陕北黄土丘陵沟壑区多流域降雨和土地利用格局对流域产沙的影响,发现在流域面积较小时,降雨格局对流域产沙的影响要大于土地利用格局的影响。此外,Ochoa 等人^[11]在安第斯山脉厄瓜多尔段的研究中发现,植被覆盖度在雨季和旱季条件下对流域产沙的影响有明显不同之处;Paroissien 等人^[12]通过对未来情景模拟,发现法国 La Peyne 地区土壤侵蚀速率对不同降雨条件和土地利用组合相对敏感。然而,以上研究多聚焦于降雨和另一因

^{*} 收稿日期:2022-09-26 修回日期:2023-09-27 网络出版时间:2023-06-25T16:20

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42001388);重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2019jcyj-msxmX0515);中国博士后科学基金面上资助西部地区博士后人才资助计划(No. 2019M653830XB)

第一作者简介:胡秋宁,女,研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用,E-mail:hqnoops@aliyun.com;通信作者:肖作林,男,副教授,博士,E-mail:xiaoli@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20230623.1020.004

子对土壤侵蚀的耦合作用,对多因子综合作用的研究仍显不足。

三峡库区作为世界上独特的地理单元,是中国乃至全球典型的生态脆弱区。在该区域内,山地、丘陵地形面积占比约为 95.7%,且山高坡陡、地形破碎,景观类型复杂多样。2018 年重庆市水利局监测数据显示,三峡库区重庆段水土流失面积达 1.85 万 km^2 ,占重庆市幅员面积的 40% 左右^[13],因此,该区域内土壤侵蚀问题依然严峻。基于上述研究背景,本研究以三峡库区重庆段为研究区,在该区域进行降雨空间分区的基础上,采用地理探测器定量解析土壤侵蚀变化的多因子综合作用,希望为深化区域尺度土壤侵蚀变化的驱动机制研究提供参考,并为三峡库区的土壤侵蚀防治宏观决策提供科学依据。

1 研究区概况

三峡库区重庆段(东经 $105.8^\circ \sim 110.2^\circ$ 、北纬 $28.5^\circ \sim 31.7^\circ$)位于长江上游下段(图 1),面积约为 46 134 km^2 。区域地形以山地、丘陵为主,地形破碎,生态脆弱,人地矛盾突出。区域气候类型以亚热带季风气候为主,气温和降雨具有明显的空间异质性,多年平均降雨量在 1 150 mm 左右,强烈的水力侵蚀造成严重水土流失。区域植被类型丰富,以暖性针叶林、常绿阔叶林、针阔混交林和灌木林为主。区域主要土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,它们的面积占比分别为 49.74%、45.07%、1.12%、2.12%、1.90% 和 0.05%。截至 2020 年末,三峡库区重庆段常住人口约为 1 387.36 万人,城镇化率约为 64.68%,地区生产总值达 9 691.57 亿元^[14]。

2 数据与研究方法

2.1 研究数据来源

气象数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的全国月降雨数据;数字高程模型数据(DEM)源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 100 m $\times$ 100 m;植被覆盖数据源于 NASA(<https://earthdata.nasa.gov/>)、MODIS 16 天合成、500 m 的 NDVI 数据;土壤类型数据源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的全国 1:100 万土壤类型数据集;土地利用数据源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m $\times$ 30 m。上述所有研究数据经统一坐标处理,并重采样为 100 m $\times$ 100 m 栅格^[15-16]。

2.2 研究方法

2.2.1 WaTEM/SEDEM 模型

采用 WaTEM/SEDEM 模型计算土壤侵蚀模数^[17],具体计算公式为:

$$A = R \times K \times T \times C \times P,$$

式中: A 为土壤侵蚀模数数值,单位 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; R 为降雨侵蚀力因子数值,单位 $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; K 为土壤可蚀性因子数值,单位 $\text{kg} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$; C 为植被覆盖与管理因子数值; P 为水土保持措施因子数值; T 为地形因子数值。除 K 、 P 的取值参考文献[18-19](表 1), R 、 T 和 C 的计算方法如下。

1) R 的计算参考文献[20],有 $R = 0.043 \cdot 8P_1^{1.61}$,其中 P_1 为年平均降雨量数值,单位 mm。

2) T 的计算公式为 $T = L \times S$,其中 L 、 S 的计算参考文献[21],有:

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \theta < 5^\circ, \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.5, 5^\circ \leq \theta < 10^\circ, \\ S = 21.9 \sin \theta - 0.96, \theta \geq 10^\circ. \end{cases}$$

$$L = (\lambda / 22.13)^m,$$

其中: λ 为坡长数值,单位 m; θ 为坡度;22.13 为标准小区坡长数值,单位 m;系数 m 的取值如下:

$$\begin{cases} m = 0.2, \theta < 0.5^\circ, \\ m = 0.3, 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ, \\ m = 0.4, 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ, \\ m = 0.5, \theta \geq 3^\circ. \end{cases}$$

3) C 的计算采用蔡崇法等人^[22]的算法,具体如下:

$$\begin{cases} C=1, 0 \leq f < 0.1\%, \\ C=0.6508-0.3436 \times \log_{10} f, 0.1\% \leq f < 78.3\%, \\ C=0, f \geq 78.3\%. \end{cases}$$

其中 f 的计算公式为: $f = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$, I 为栅格植被归一化指数, $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为植被归一化指数的最大值和最小值。

2.2.2 降雨空间分区

采用 ISODATA 聚类方法在栅格水平上对研究区降雨进行空间分区。ISODATA 是 K-means 算法的改进,它不仅能通过调整样本所属类别完成聚类分析,而且能自动进行类的“合并”和“分裂”,从而得到较为合理的各个聚类。在 ArcGIS 环境中,将 2010 年与 2020 年降雨量空间分布栅格数据输入聚类工具,选用最大似然算法实现低、中、高共 3 个降雨区的分类,它们的降雨量范围分别为 <100 mm、 $100 \sim 1200$ mm、 >1200 mm(图 2)。

2.2.3 地理探测器

地理探测器是探测空间异质性并揭示相关驱动因子的一种方法,本研究采用了该方法中的因子探测、风险探测和交互探测。

因子探测的核心思想是通过检测各要素的空间分布一致性来权衡自变量的解释力,解释力大小由 q 值来衡量,值域为 $[0, 1]$ 。 q 值越大说明自变量对土壤侵蚀空间分布解释力越大。 q 值的计算公式如下:

$$q = 1 - \left(\sum_{h=1}^l (N_h \sigma_h^2) \right) / (N \sigma^2),$$

其中: $h=1, 2, \dots, l$ 为自变量 X 的分层数; N_h 和 N 分别为层 h 内和区域内的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全局 Y 值的方差。

交互探测是地理探测器相对于其他统计方法的优势,可用于检测自变量之间的交互作用。风险探测可判断驱动因子层级间的土壤侵蚀是否有明显差别,并识别土壤侵蚀高风险区。对研究区采用规则格网分区^[23],兼顾采样点密度与模型计算效率,将格网大小设为 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$,对每个格网中心进行采样,生成采样点 18 970 个。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时空变化特征

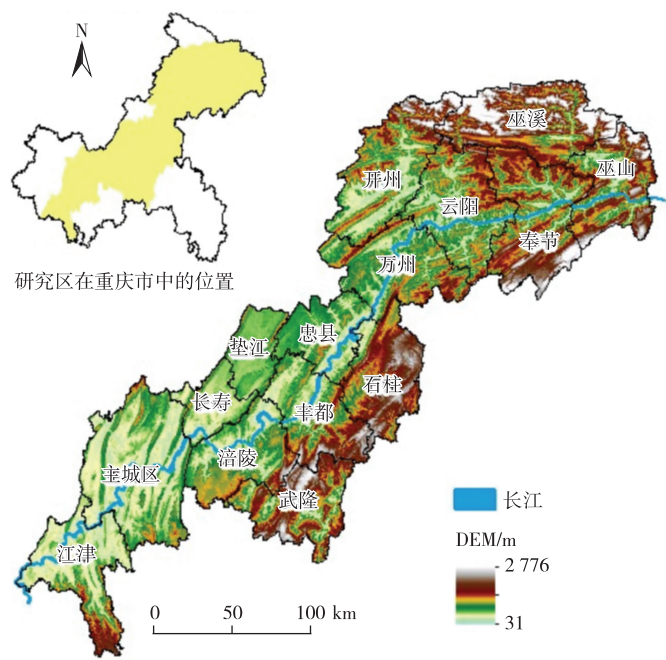
基于 WaTEM/SEDEM 模型计算了三峡库区重庆段在 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 5 个时间截面的土壤侵蚀模数,具体数值如图 3a 所示。根据中国水利部对土壤侵蚀等级划分的标准,将研究区土壤侵蚀模拟结果进行分级,具体如图 3b、c、d、e、f 所示,其中微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀的分级标准分别为 $<5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $5 \sim 25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $>25 \sim 50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $>50 \sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $>80 \sim 150 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $>150 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。总体来看,2000—2020 年三峡库区重庆段土壤侵蚀整体呈减少趋势;轻度以上等级土壤侵蚀在研究区内均有分布,2015 年后则集中在库首和库腹的区县如在武隆、丰都、涪陵、忠县、万州、开州、云阳、奉节等;对研究区不同土壤侵蚀等级按它们对应的土地面积由大到小进行排序,依次为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀。

3.2 基于地理探测器的不同降雨区划下土壤侵蚀定量归因

3.2.1 驱动因子显著性分析

因子探测结果如图 4 所示,从中可以看出不同驱动因子对土壤侵蚀的解释力有明显差异。植被覆盖度因子在 2 个研究时间截面对土壤侵蚀的解释力均为最高,说明三峡库区重庆段植被覆盖度对土壤侵蚀的影响最显著。用线性回归方法对研究区 2000—2020 年植被覆盖度进行逐像元趋势分析(图 5a),发现 21 年间研究区绝大部分地区植被覆盖度呈现增加趋势(图 5b),这是研究区土壤侵蚀整体减少的重要原因。从图 4 中可看出在不同降雨分区,驱动因子对土壤侵蚀的作用强度存在较明显分异特征。植被覆盖度因子对土壤侵蚀的解释力随着降雨量降低而明显减小,而其他 5 个驱动因子在这一方面则表现出相反趋势,例如:2010 年土地利用类型因子在高降雨区和中降雨区对土壤侵蚀的解释力较低,但在低降雨区对土壤侵蚀的解释力较高, q 值却接近 0.2,与植被覆盖度因子 2020 年在中降雨区和 2010 年在低降雨区对土壤侵蚀的解释力接近。此外,2010 年坡度、地貌类型、

土壤类型、高程等驱动因子在低降雨区对土壤侵蚀的解释力较高;但 2020 年上述因子在不同降雨区划对土壤侵蚀的解释力差异不明显。



注:底图来源于国家测绘地理信息局,审图号:渝 S(2020)071 号,下同。

图 1 三峡库区重庆段区位

Fig. 1 Location of the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

表 1 土壤可蚀性因子和水土保持措施因子的取值

Tab. 1 Values of soil erodibility factor and soil and water conservation measure factor

因子	具体取值
K	红壤 0.007 5、黄红壤 0.007 7、黄壤 0.015 6、黄壤性土 0.014 5、黄棕壤 0.016 2、暗黄棕壤 0.018 2、黄褐土 0.019 2、棕壤 0.007 2、石灰土 0.017 1、棕色石灰土 0.018 6、黄色石灰土 0.016 7、酸性紫色土 0.019 6、石灰紫色土 0.017 4、粗骨土 0.007 7、酸性粗骨土 0.005 5、钙质粗骨土 0.009 7、山地草甸土 0.017 6、水稻土 0.018 5、潴育水稻土 0.019 5、渗育水稻土 0.018 6、潜育水稻土 0.019 2
P	坡度小于 5°的耕地 0.100、坡度范围为 5°~10°的耕地 0.221、坡度范围为 >10°~15°的耕地 0.305、坡度范围为 >15°~20°的耕地 0.575、坡度范围为 >20°~25°耕地 0.705、坡度大于 25°的耕地 0.800、林地 1、水域 0、草地 1、裸土 1、裸岩 0

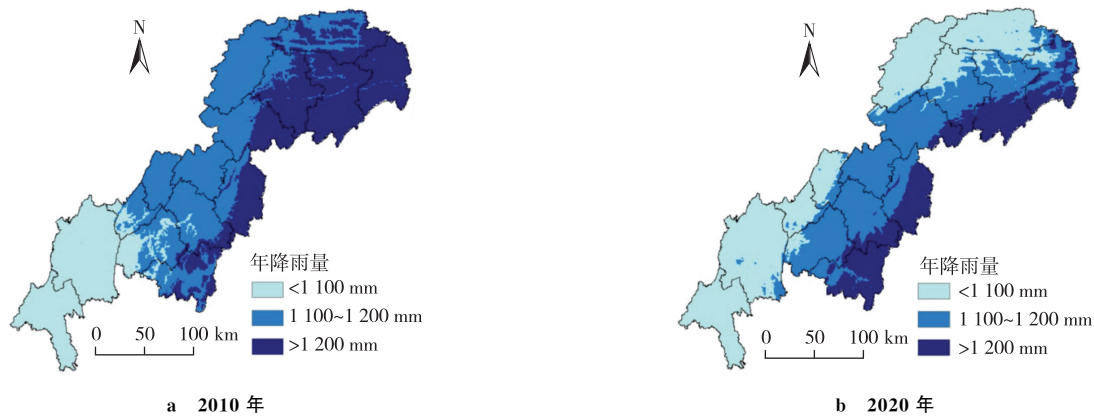


图 2 三峡库区重庆段降雨区划

Fig. 2 Rainfall zones in the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

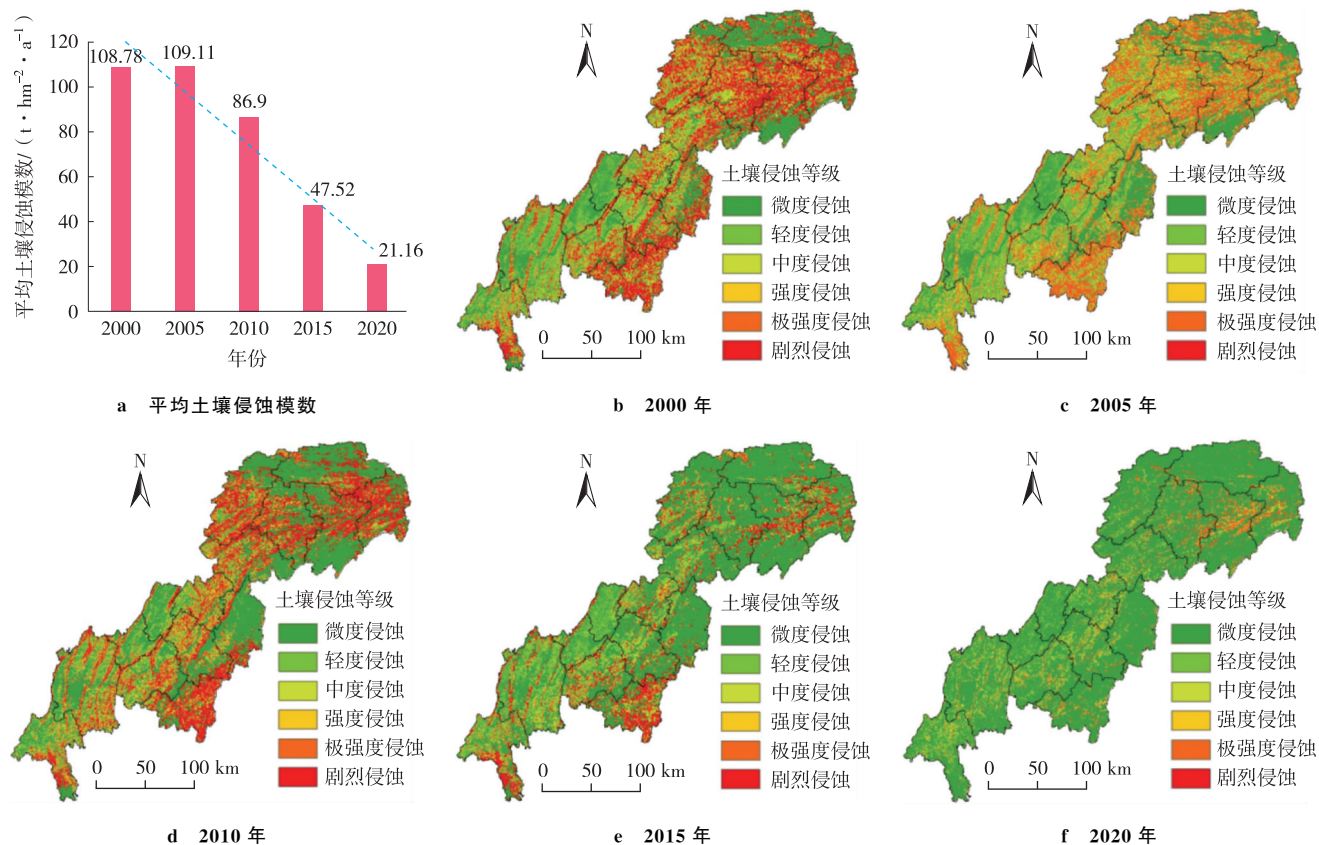


图 3 三峡库区重庆段土壤侵蚀空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil erosion in the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

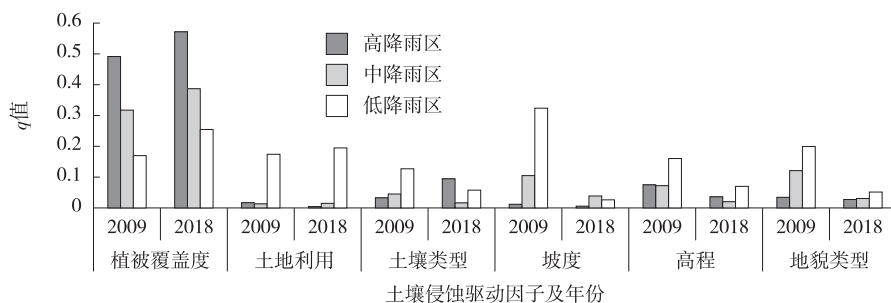
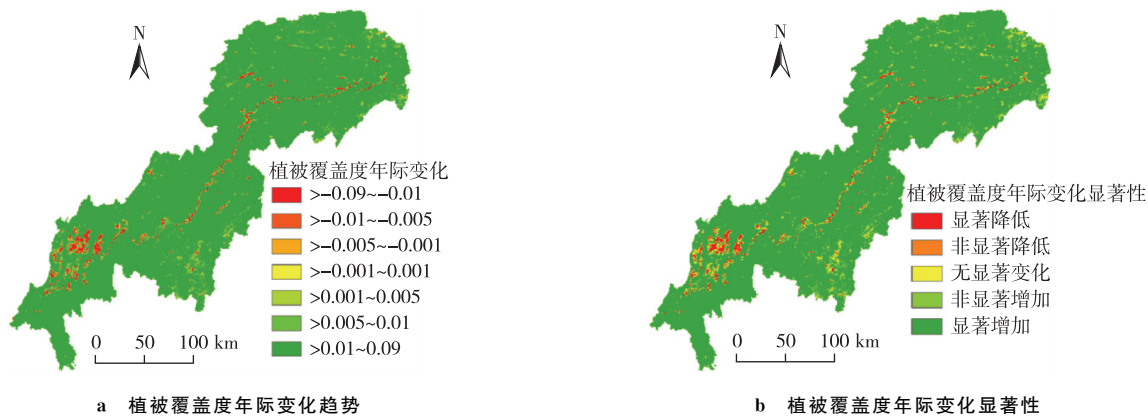
图 4 不同降雨区划土壤侵蚀驱动因子 q 值统计Fig. 4 Statistics of q -value of soil erosion driving factors of different rainfall zones

图 5 三峡库区重庆段植被覆盖度年际变化

Fig. 5 Interannual variation of vegetation coverage in the Chongqing Section of Three Gorges Reservoir Area

3.2.2 土壤侵蚀驱动因子交互作用分析

交互作用探测结果显示,研究区驱动因子两两间交互作用均会增强对土壤侵蚀的解释力,并且在不同降雨区存在明显分异特征。选取不同降雨区划中对土壤侵蚀的解释力排在前 4 位的驱动因子两两间交互作用作为主导交互作用类型,如表 2 所示。2010 年和 2020 年在高降雨区和中降雨区,植被覆盖度同其他因子的交互作用对土壤侵蚀的解释力均为最高,且在高降雨区所对应的 q 值均高于 0.3。2010 年在低降雨区,植被覆盖度与其他因子的交互作用对土壤侵蚀的解释力仅有 1 项保持最高,而坡度与其他因子的交互作用对土壤侵蚀的解释力则位列第 2 到第 4 位,对应的 q 值均在 0.4 左右。据此推断,在降雨量充足的区域,植被覆盖度是土壤侵蚀的关键控制因子,且降雨量的减少可在一定程度上放大坡度因子对土壤侵蚀的影响。整体来看,在所有驱动因子两两间交互作用中,植被覆盖度因子和坡度因子的交互作用对土壤侵蚀的解释力最强。

表 2 不同降雨区土壤侵蚀驱动因子交互作用探测
Tab. 2 Detection of the interaction of soil erosion driving factors in different rainfall areas

年份	降雨区划	第 1 主导 交互作用及 q 值	第 2 主导 交互作用及 q 值	第 3 主导 交互作用及 q 值	第 4 主导 交互作用及 q 值
2010	高降雨区	植被覆盖度 $\cap$ 坡度 0.512	植被覆盖度 $\cap$ 土壤类型 0.507	植被覆盖度 $\cap$ 土地利用类型 0.502	植被覆盖度 $\cap$ 地貌类型 0.473
	中降雨区	植被覆盖度 $\cap$ 坡度 0.497	植被覆盖度 $\cap$ 地貌类型 0.412	植被覆盖度 $\cap$ 土地利用类型 0.386	植被覆盖度 $\cap$ 土壤类型 0.349
	低降雨区	植被覆盖度 $\cap$ 坡度 0.451	坡度 $\cap$ 高程 0.433	坡度 $\cap$ 土壤类型 0.401	坡度 $\cap$ 土地利用类型 0.382
2020	高降雨区	植被覆盖度 $\cap$ 土壤类型 0.338	植被覆盖度 $\cap$ 坡度 0.326	植被覆盖度 $\cap$ 地貌类型 0.316	植被覆盖度 $\cap$ 土地利用类型 0.311
	中降雨区	植被覆盖度 $\cap$ 地貌类型 0.259	植被覆盖度 $\cap$ 坡度 0.250	植被覆盖度 $\cap$ 土壤类型 0.246	植被覆盖度 $\cap$ 土地利用类型 0.215
	低降雨区	植被覆盖度 $\cap$ 地貌类型 0.218	植被覆盖度 $\cap$ 坡度 0.203	植被覆盖度 $\cap$ 高程 0.182	植被覆盖度 $\cap$ 土地利用类型 0.175

3.2.3 土壤侵蚀驱动因子风险探测

运行风险探测器模块量化了不同驱动因子层间土壤侵蚀量的差异性,在 95%置信水平识别土壤侵蚀高风险区。表 3 显示,各驱动因子在不同降雨区的土壤侵蚀高风险区存在明显差异。植被覆盖度与土壤侵蚀的空间分布呈现负相关性,且植被覆盖度高风险区值域随降雨量减少而略有上升。在高降雨区,最易发生土壤侵蚀的土地利用类型为旱地;在中降雨区和低降雨区,草地和园地则更容易发生土壤侵蚀。2010 年,随着降雨量的减少,研究区中土壤侵蚀高风险区的坡度有增加的趋势;2020 年土壤侵蚀高风险区的坡度大部分在 $>20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围。此外,2020 年土壤侵蚀高风险区的高程随降雨量减少而降低。高降雨区最易发生土壤侵蚀的地貌类型为中海拔台地和小起伏低山;在中降雨区和低降雨区,最易发生土壤侵蚀的地貌类型则以海拔高程在 500~1 000 m 的低海拔和中小起伏山地为主。

4 结束语

本研究采用多时相遥感影像、数字高程模型、水文气象资料等多源数据,基于地理探测器空间分区视角,定量分析了 2000—2020 年三峡库区重庆段的土壤侵蚀时空变化规律及多驱动因子的综合作用,主要结果如下:

- 1) 研究时段内研究区平均土壤侵蚀模数呈减小趋势;轻度侵蚀以上等级土壤侵蚀在全区均有分布,2015 年后则集中于库首和库腹;21 年来研究区土壤侵蚀状况呈现好转趋势,土壤发生强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀的区域大幅减少。
- 2) 在不同降雨区,驱动因子对土壤侵蚀的作用强度存在较明显分异特征。相较于其他因子,植被覆盖度因子对土壤侵蚀的解释力最高,但随着降雨量减少而明显减小。土地利用类型、坡度、地貌类型、土壤类型、高程等

驱动因子在 2010 年低降雨区对土壤侵蚀的解释力较高,但在 2020 年不同降雨区中对土壤侵蚀的解释力的差异不明显。

表 3 不同降雨区划土壤侵蚀高风险区识别
Tab. 3 Identification of high risk areas for soil erosion in different rainfall zones

土壤侵蚀驱动因子	高降雨区		中降雨区		低降雨区	
	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年
植被覆盖度	>0.6~0.7	>0.5~0.6	>0.7~0.8	>0.6~0.7	>0.7~0.8	>0.7~0.8
土地利用类型	旱地	旱地	草地	园地	草地	园地
土壤类型	黄壤	钙质粗骨土	黄壤	黄褐土	石灰土	紫色石灰土
坡度	>15°~20°	>20°~25°	>20°~25°	>20°~25°	>25°~30°	>5°~10°
高程	0~336 m	>336~641 m	>641~946 m	0~336 m	>641~946 m	0~336 m
地貌类型	中海拔台地	小起伏低山	中起伏低山	低海拔平原	中起伏低山	小起伏中山

3) 在降雨充足的区域,植被覆盖度是土壤侵蚀的关键控制因子。在 2010 年低降雨区,植被覆盖度与其他因子主导的交互作用对土壤侵蚀的解释力有所下降,坡度与其他因子为主导的交互作用对土壤侵蚀的解释力较高。各驱动因子在不同降雨区的土壤侵蚀高风险区分异规律明显。

土壤侵蚀作为地表关键过程,受到多种因子共同影响,驱动机理复杂。从多因子综合分析角度定量解析土壤侵蚀驱动因素,对当地开展水土保持及生态恢复建设具有重要意义。本研究采用 WaTEM/SEDEM 模型对三峡库区重庆段土壤侵蚀模数进行模拟,并与前人研究结果取得了较好的一致性^[14,24]。然而,目前在三峡库区,多驱动因子间的耦合作用研究尚显薄弱。降雨作为土壤侵蚀的直接驱动因素具有高度时空异质性,本研究在基于对降雨空间分区的基础上开展多因子综合作用研究,定量分析了不同降雨区的植被覆盖度、土地利用类型、土壤类型、坡度、高程和地貌类型单因子作用及交互作用对土壤侵蚀的影响。本研究结果可有助于深化区域尺度土壤侵蚀变化的驱动机制研究,为三峡库区土壤侵蚀防治提供科学依据。需要说明的是,本研究仅考虑了降雨的空间异质性,并未考虑时间异质性;同时,人类活动日益剧烈,正在成为土壤侵蚀的主要驱动因素,而本研究在选取驱动因子时对人类活动的关注不够充分。因此,增加考虑降雨时间异质性及强化人类活动对土壤侵蚀作用的研究是今后工作的重点。

参考文献:

[1] 史志华,王玲,刘前进,等. 土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.
SHI Z H, WANG L, LIU Q J, et al. Soil erosion: from comprehensive control to ecological regulation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 198-205.

[2] KEO Soksamnang,何洪鸣,赵宏飞,等. 黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究,2018, 25(2):1-7.
KEO S, HE H M, ZHAO H F, et al. Analysis of rainfall erosivity change and its impacts on soil erosion on the Loess Plateau over more than 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 1-7.

[3] 张攀,姚文艺,刘国彬,等. 土壤复合侵蚀研究进展与展望[J]. 农业工程学报,2019,35(24):154-161.
ZHANG P, YAO W Y, LIU G B, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 154-161.

[4] 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.
WANG Z L. Analyses of affecting factors of soil erosion and its harms in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 32-36.

[5] KINNELL P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(14): 2815-2844.

[6] 秦伟,曹文洪,左长清. 植被与地形对侵蚀产沙耦合影响研究评述[J]. 泥沙研究,2015(3):74-80.
QIN W, CAO W H, ZUO C Q. Review on the coupling influences of vegetation and topography to soil erosion and sediment yield [J]. Journal of Sediment Research, 2015(3): 74-80.

- [7] 彭文英,张科利.不同土地利用产流产沙与降雨特征的关系[J].水土保持通报,2001,21(4):25-29.
PENG W Y,ZHANG K L. Relationship of runoff and sediment with rainfall characteristics in different land use[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2001,21(4):25-29.
- [8] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区不同降雨格局下土地利用的水土流失效应[J].水土保持通报,2006,26(6):19-23.
WEI W,CHEN L D,FU B J,et al. Soil and water loss affected by landuse under different rainfall patterns in the semi-arid Loess Hilly Area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2006,26(6):19-23.
- [9] YAO X L,YU J S,JIANG H. Roles of soil erodibility,rainfall erosivity and land use in affecting soil erosion at the basin scale [J]. Agricultural Water Management,2016,174:82-92.
- [10] 钟莉娜,王军,赵文武.多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2017,72(3):432-443.
ZHONG L N,WANG J,ZHAO W W. Comparative analysis of the effect of rainfall pattern and land use pattern on soil erosion in different-scale watersheds:a case study in hilly and gully area of the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(3):432-443.
- [11] OCHOA P A,FRIES A,MEJIA D,et al. Effects of climate,land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes[J]. Catena,2016,140:31-42.
- [12] PAROISSIEN J-B,DARBOUX F,COUTURIER A,et al. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc,France)[J]. Journal of Environmental Management,2015,150(1):57-68.
- [13] AMUNDSON R,BERHE A A,HOPMANS J W,et al. Soil and human security in the 21st century[J]. Science,2015,348(6235):647.
- [14] 温莉.基于遥感与GIS的三峡库区重庆段土壤侵蚀动态变化研究[D].重庆:西南大学,2019.
WEN L. Study on dynamic changes of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing using remote sensing and GIS technologies[D]. Chongqing:Southwest University,2019.
- [15] 陈正发,龚爱民,宁东卫,等.基于RUSLE模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.
CHEN Z F,GONG A M,NING D W,et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in Yunnan Province based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(6):7-14.
- [16] 陈羽璇,杨勤科,刘宝元,等.基于CSLE模型的珠江流域土壤侵蚀强度评价[J].中国水土保持科学,2021,19(6):86-93.
CHEN Y X,YANG Q K,LIU B Y,et al. Assessment of soil erosion intensity in Pearl River Basin based on CSLE model[J]. Science of Soil and Water Conservation,2021,19(6):86-93.
- [17] Van ROMPAEY A J J,VERSTRAETEN G, Van OOST K,et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2001,26(11):1221-1236.
- [18] 吴昌广,曾毅,周志翔,等.三峡库区土壤可蚀性K值研究[J].中国水土保持科学,2010,8(3):8-12.
WU C G,ZENG Y,ZHOU Z X,et al. Soil erodibility K value in Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of Soil and Water Conservation,2010,8(3):8-12.
- [19] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.
FANG G L,XIANG B,ZHAO W,et al. Study on soil erosion in Lasa River Basin based on GIS and RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(3):6-12.
- [20] YU B F,ROSEWELL C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales[J]. Australian Journal of Soil Research,1996,34(1):139-152.
- [21] 刘宝元,毕小刚,符素华.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010:70-81.
LIU B Y,BI X G,FU S H. Beijing soil loss equation[M]. Beijing:Science Press,2010:70-81.
- [22] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
CAI C F,DING S W,SHI Z H,et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000,14(2):19-24.
- [23] 樊舒迪,刘振华,朱明帮,等.基于地理探测器的广州市土地利用时序变化及影响因素研究[J].西南农业学报,2022,35(10):2276-2289.
FAN S D,LIU Z H,ZHU M B,et al. Research on time series change and influencing factors of land use in Guangzhou city based on Geodetector[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2022,35(10):2276-2289.

[24] 王铭烽. 三峡库区水库运行前后土壤侵蚀动态变化及人为驱动机制[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2020.

WANG M F. Dynamic changes and human drivers of soil erosion before and after reservoir operation in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2020.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Integrated Effect of Multi-Factors on Soil Erosion under Different Rainfall Zones in the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

HU Qiuning, XIAO Zuolin, LIU Rui

(Chongqing Key Laboratory of GIS Application, College of Geography and Tourism,
Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Clarifying the spatial and temporal variation characteristics of soil erosion in the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area and revealing the pattern of the effect with multiple factors on soil erosion under different rainfall spatial partitions, and to provide scientific reference for the decision of soil erosion control in this area. Based on multi-source remote sensing images, meteorological data, DEM and soil data, taking the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area as the study area, the WaTEM/SEDEM model was used to simulate soil erosion from 2000 to 2020. The ISODATA clustering method was used for spatial partitioning of rainfall. Geographical detector was used for multi-factor integrated analysis. The results of the study show that: 1) The average soil erosion modulus in the study area was 108.78, 109.11, 86.9, 47.52, and 21.16 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020, respectively, with an overall mitigating trend in the soil erosion situation, and a significant reduction in intense, very intense and severe erosion. 2) The vegetation cover factor had the highest explanatory power for soil erosion in the high rainfall zone; the factors of land use type, slope, geomorphologic type, soil type, and elevation had a higher explanatory power for soil erosion in the low rainfall zone in 2010, while there was no significant difference in the explanatory power of soil erosion in the different rainfall zones in 2020. 3) In the high rainfall area, the interaction between vegetation cover and other factors has the highest explanatory power for soil erosion. In 2010, in the low rainfall area, the interaction between slope and other factors has a higher explanatory power for soil erosion. There is an obvious pattern of differentiation of the driving factors in different rainfall zones with high risk of soil erosion. From the results of the study, it can be seen that soil erosion in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir Area changes significantly, and there are obvious differences in the combined effects of different driving factors on soil erosion in different rainfall zones.

Keywords: soil erosion; spatial zoning of rainfall; combined effect; geographical detector; the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑 方 兴)