

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.04.021

CSTR:32310.14.stbxb.2026.04.021

江雨芙, 史东梅, 刘方元, 等. 三峡库区典型县域土壤保持功能时空演变特征及驱动力[J]. 水土保持学报, 2026, 40(4): 454-464.

Jiang Yufu, Shi Dongmei, Liu Fangyuan, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of soil conservation function in a typical county of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4): 454-464.

三峡库区典型县域土壤保持功能时空演变特征及驱动力

江雨芙, 史东梅, 刘方元, 许 颖, 乔佳玉

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘 要: [目的] 为探究三峡库区土壤保持功能的时空演变特征及驱动力。[方法] 以三峡库区典型县域万州为例, 基于 1990—2020 年多源遥感数据, 运用 InVEST 模型评估土壤保持功能空间分异特征, 并结合地理探测器模型分析演变驱动机制, 探讨坡度对坡耕地土壤保持功能影响及调控措施。[结果] 1) 1990—2020 年, 万州土壤保持功能呈先增后减趋势, 空间格局呈东高西低, 土地利用以坡耕地、林地为主要类型。2) 万州土壤保持功能空间集聚特征显著, 低-低集聚区由北向西南扩展, 高-高集聚区集中于东部; 核密度高值区长期位于中部, 核密度值呈先波动下降、后回升趋势。3) 土壤保持功能空间分异的核心驱动因素为自然环境因素, 坡度(0.71)是主导因子, 其次为植被覆盖度(0.43)与土壤类型(0.24); 各因子交互作用均表现为增强效应, 其中坡度与温度、坡度与植被覆盖度等组合解释力最强($q > 0.75$)。4) 坡耕地土壤保持功能高低与坡度密切相关, $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 坡耕地土壤保持功能稳定 [$120.64 \sim 379.35 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], $8^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 坡耕地土壤保持功能处于中等水平 [$61.17 \sim 81.93 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], 可针对不同坡度采取差异化治理措施, 低坡度区推广秸秆覆盖与横坡垄作, 中坡度区结合工程与植物措施, $> 25^{\circ}$ 坡耕地需优先实施退耕还林还草。[结论] 研究结果可为三峡库区水土流失防控与生态修复提供科学依据。

关键词: 土壤保持功能; InVEST 模型; 时空演变; 驱动机制; 县域尺度; 三峡库区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0454-11

Spatiotemporal Evolution Characteristics and Driving Factors of Soil Conservation Function in a Typical County of Three Gorges Reservoir Area

Jiang Yufu, Shi Dongmei, Liu Fangyuan, Xu Ying, Qiao Jiayu

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of soil conservation in the Three Gorges Reservoir area. [Methods] Taking Wanzhou, a representative county in the Three Gorges Reservoir area, as a case study, multi-source remote sensing data from 1990 to 2020 were used. The InVEST model was applied to assess the spatial differentiation characteristics of soil conservation function, and the Geodetector model was employed to analyze the driving mechanisms of its evolution. The influence of slope on soil conservation in sloping cropland and corresponding regulation measures were also explored. [Results] 1) From 1990 to 2020, soil conservation function in Wanzhou exhibited a trend of increase followed by decrease, with a spatial pattern of higher values in the east and lower values in the west. Land use types were mainly sloping cropland and forest land. 2) Soil conservation function in Wanzhou demonstrated significant spatial clustering characteristics, with low-low clustering areas expanding from the north to the southwest, and high-high clustering areas concentrated in the eastern region. Kernel density high-value areas were consistently located in the central region, and kernel density values showed a fluctuating decrease followed by an increase. 3) Natural environmental factors were the primary drivers of spatial differentiation in soil conservation

收稿日期: 2026-02-02

修回日期: 2026-03-13

录用日期: 2026-03-27

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-14

资助项目: 国家自然科学基金长江水科学联合项目(U2340215); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2024TIAD-GPX0043)

第一作者: 江雨芙(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: gija2290016@163.com

通信作者: 史东梅(1970—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shidm1970@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

function. Slope ($q=0.71$) was the dominant factor, followed by vegetation coverage ($q=0.43$) and soil type ($q=0.24$). Interactions among all factors showed enhancement effects, among which combinations such as slope and temperature, and slope and vegetation coverage, exhibited the strongest effects ($q>0.75$). 4) Soil conservation function in sloping cropland was closely related to slope. On slopes from 3° to 8° , soil conservation function remained stable [from $120.64 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ to $379.35 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$]. On slopes from 8° to 25° , it was at a moderate level [from $61.17 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ to $81.93 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$]. Differentiated management measures could be adopted for different slope gradients: low-slope areas should adopt straw mulching and contour ridge tillage, medium-slope areas should combine engineering and vegetation measures, and slopes $>25^{\circ}$ should prioritize conversion of cropland to forest and grassland. [Conclusion] The results provide a scientific basis for soil erosion control and ecological restoration in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: soil conservation function; InVEST model; spatiotemporal evolution; driving mechanism; county scale; Three Gorges Reservoir area

Received: 2026-02-02

Revised: 2026-03-13

Accepted: 2026-03-27

Online(www.cnki.net): 2026-04-14

土壤保持功能是生态系统通过植被拦截、土壤抗蚀、地形滞蓄等作用减少泥沙输移,维持土壤肥力、保障流域完整性的关键服务^[1],土壤保持功能越强,侵蚀越弱,侵蚀强度越低^[2]。作为陆地生态系统的核心调节功能之一,在农业生态系统中,土壤保持功能通过抑制肥沃表土的高强度迁移与流失,减少土壤有机碳库及氮、磷、钾等关键养分库的损耗,维系土壤结构完整性与肥力稳定性,为农业生产力的长期可持续供给提供基础性保障;同时,土壤保持功能还通过拦截并削减坡面径流中的泥沙通量,降低泥沙向河流、湖泊等受纳水体的输入强度,既可缓解河道淤积、保障水体水文连通性,又能减少泥沙携带的氮磷营养盐向水体释放,进而有效抑制水体富营养化发生风险,为水生生态系统的结构完整与功能稳定提供关键调控支撑^[3]。因此,精准识别土壤保持功能的时空演变规律及其驱动机制,对制定针对性水土流失防控措施、保障区域生态安全具有重要意义^[4]。

IVEST模型基于连通性、泥沙输移比的经验方法量化流域内土壤保持功能,弥补通用水土流失方程(USLE)及修订版(RUSLE)缺少地块拦截上游泥沙模块的缺陷,实现从“侵蚀量”到“保持量”的评估^[5-6]。近年来,InVEST模型已广泛运用于大尺度土壤保持功能研究,主要体现在2个方面:一是时空动态演变分析,如喇露梦等^[7]对三峡库区2005—2015年的研究表明,土壤保持功能总体呈上升趋势,且空间异质性显著;柏跃波等^[8]对淮河流域的研究也揭示,时间变化规律和空间集聚特征。二是驱动机制解析,赵欣悦等^[9]在北三河流域的研究中,结合地理探测器模型量化降水、土地利用和地形等因素的贡献率;胡晓倩等^[10]则在南方红壤丘陵区证实退耕还林等生态工程

对提升土壤保持功能的核心驱动作用。InVEST模型在上述研究中被广泛应用,其模拟结果为区域生态修复和管理决策提供了重要的科学依据。

三峡库区坡耕地面临土壤侵蚀加剧、生态系统服务功能退化等突出问题^[11]。近年来,城市化进程加快与土地利用格局剧烈变化^[12]驱动了三峡库区土壤保持功能调节效能的显著改变。三峡库区地形以山地丘陵为主,坡耕地分布广泛,受强降雨、陡峭地形及高强度人类活动叠加影响,坡耕地成为土壤侵蚀高发区域^[13],也是三峡库区土壤保持功能研究的核心对象。本研究以万州为研究区,基于1990—2020年长时间序列遥感数据,运用InVEST模型与地理探测器,分析区域土壤保持功能的时空演变特征,揭示自然与社会经济因素的影响作用及其非线性交互增益,为三峡库区生态修复与水土流失防控提供量化依据与政策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

万州区($30^{\circ}24'\sim 31^{\circ}14'N$, $107^{\circ}55'\sim 108^{\circ}53'E$)位于三峡库区腹心,总面积 $3\,457 \text{ km}^2$,是三峡库区核心县域和长江上游重要生态区域^[11](图1)。研究区属亚热带季风性湿润气候,多年平均气温 17.7°C ,年平均降水量 $1\,243 \text{ mm}$,降水高度集中于5—9月,以山地、丘陵为主体,平均海拔约 500 m ,坡度 $>15^{\circ}$ 的区域占比 35% ,地表岩性以紫色砂页岩为主。长江向东横贯全境,土壤以紫色土和黄壤为主,分别占土壤总面积的 45% 和 25% ,其中紫色土广泛分布于低山丘陵区,黄壤集中于中低山湿润区。区域生态系统以森林和农田为主要类型,森林覆盖率 40% ,集中分布于南北山地,优势植被为常绿阔叶林、针叶林及灌草丛;农田占总面积的 30% ,且坡耕地占耕地总面积的 60% 以上。

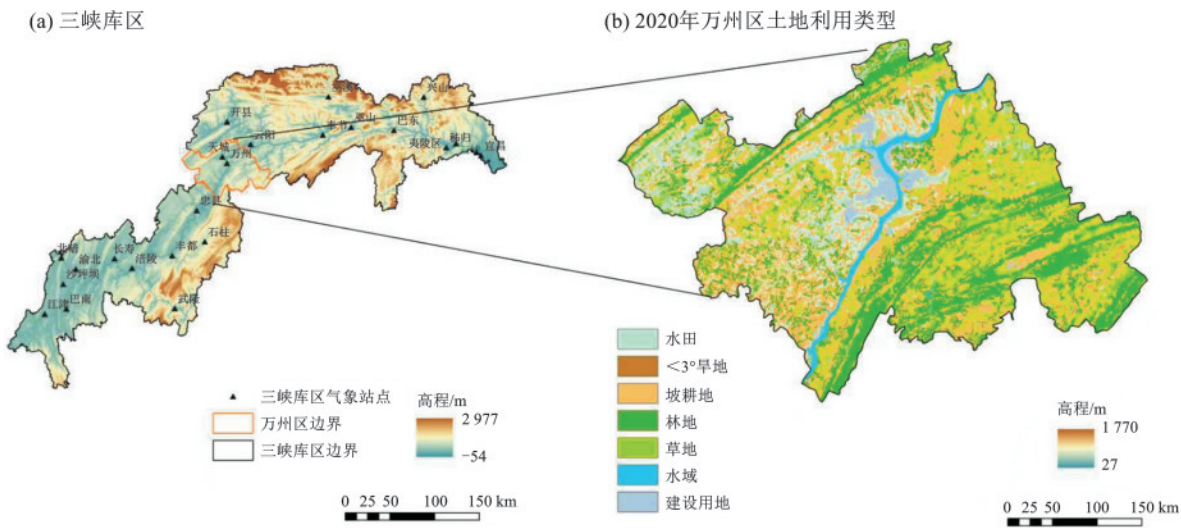


图1 研究区概况
Fig.1 Overview of study area

1.2 数据来源与处理

万州区 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年的土地利用数据,取自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。结合万州区土地利用类型的地域特征,利用 ArcGIS 软件对原始用地类型开展重分类,归并为 7 类,分别是水田、<3°旱地、坡耕地、林地、草地、水域和建设用地。为探究

土地利用变化的驱动机制,综合自然环境与社会经济发展等因素,共选取 13 个分析因子(表 1)。坡度、坡向需由数字高程模型(DEM)通过 ArcGIS 工具计算得到;植被覆盖度要利用归一化植被指数(NDVI)经计算获取;土壤侵蚀敏感性是结合坡度、土壤类型、植被覆盖度、降水量等因子,通过评价模型计算得出。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	数据描述	分辨率	数据来源
地理基础数据	行政区划高程数据及边界	30 m	国家基础地理信息中心 (http://www.ngcc.cn)
土地利用数据	1990—2020 年土地利用数据	30 m	中国科学院资源与环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)
土壤数据	土壤类型数据	—	世界土壤数据库(http://www.fao.org)
	土壤质地数据	1 km	世界土壤数据库(http://www.fao.org)
气象数据	日降水和年降水	30 m	中国气象数据共享网(http://data.cma.cn)
自然环境因子	归一化植被指数	30 m	国家青藏高原/第三极环境数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)
	年均温数据	1 km	国家青藏高原/第三极环境数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)
	地貌类型	1 km	中国 1:100 万地貌类型数据集(https://www.geodata.cn/)
社会经济因子	夜间灯光数据	1 km	美国国家海洋和大气管理局 DMSP/OLS(https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/)
	国内生产总值	1 km	中国科学院资源与环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	人口密度	1 km	中国科学院资源与环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)

1.3 土壤保持功能

采用生态系统服务与权衡综合评估模型的土壤保持模块,通过计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值^[14-15],定量评估三峡库区万州不同土地利用的土壤保持功能。具体计算公式为:

$$SEDRET_x = R_x K_x LS_x (1 - C_x P_x) + SEDR_x \quad (1)$$

$$SEDR_x = SE_x \sum_{y=1}^{x-1} USLE_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - SE_z) \quad (2)$$

$$USLE_x = R_x K_x LS_x C_x P_x \quad (3)$$

式中:SEDRET_x和SEDR_x分别为栅格x的土壤保持量和泥沙持留量;USLE_x和USLE_y分别为栅格x及其汇流路径的上游栅格y的实际侵蚀量;R_x、K_x、LS_x、C_x、P_x分别为栅格x的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、覆盖管理因子和水土保持措施因子;SE_x为栅格x的泥沙持留效率。

1.3.1 降雨侵蚀力因子(R) 基于三峡库区24个气象站点(图1)1990—2020年的日降雨数据,采用章文波等^[16]提出的修正公式计算年降雨侵蚀力(R),利用Kriging插值方法^[17]对各离散测站的 R 值进行空间插值,生成可视化的降雨侵蚀力栅格数据后对万州区进行掩膜提取。

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^K (D_j) \beta \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (5)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (6)$$

式中: M_i 为第 i 个半月时段的侵蚀力值, $\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$; K 为该半月时段内的天数; D_j 为半月时段内第 j 天的日雨量, mm ; α 和 β 为模型参数; P_{d12} 为日平均降雨量 $\geq 12\text{ mm}$, mm ; $P_{y\geq 12}$ 为日平均降雨量 $\geq 12\text{ mm}$ 的年平均降雨量, mm 。

1.3.2 土壤可蚀性因子(K) 采用EPIC模型计算^[18],结合全国第二次土壤普查提取的万州区土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒质量分数),计算公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3e^{\left[\frac{0.256S_i}{100} \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right]} \right\} \times \left(\frac{S_i}{S_i + C_1} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(22.95S_n - 5.51)} \right] \quad (7)$$

$$S_n = 1 - \frac{S_a}{100} \quad (8)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子, $(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{mm})$, K 为美国制单位,结果乘以0.1317转换为国际制单位 $(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{mm})$; S_n 为砂粒质量分数,%; S_i 为粉粒质量分数,%; C_1 为黏粒质量分数,%; C 为有机碳质量分数,%。

1.3.3 地形因子(LS) 基于符素华等^[19]提出的坡度分段计算方法,结合30 m分辨率的DEM数据提取坡长 LS 因子,计算公式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (9)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & 5^\circ < \theta \leq 9^\circ \\ \frac{\beta}{1+\beta} & \theta > 9^\circ \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\sin \theta / 0.0896}{3 \sin \theta^{0.8} + 0.56} \quad (11)$$

$$S = \begin{cases} 10.80 \times \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 6.80 \times \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.61 \times \sin \theta - 0.06 & 10^\circ < \theta \end{cases} \quad (12)$$

式中: L 为坡长因子; S 为坡度因子; λ 为栅格单元投影长度, mm ; m 为坡长效应指数; θ 为坡度, $(^\circ)$;最终合成无量纲地形因子(LS)。

1.3.4 植被覆盖因子(C)和水土保持措施因子(P) 根据相似地区土地利用类型(LULC)分级赋值,综合万州实地调查结果和径流小区监测数据修正的 C 、 P 值^[4,20-21]见表2。

表2 植被覆盖因子与水土保持措施因子的修正赋值
Table 2 Revised values of vegetation coverage factor (C) and soil and water conservation measure factor (P)

土地利用同类型	植被管理因子 (C)	水土保持措施因子 (P)
水田	0.18	0.15
旱地	0.23	0.35
有林地	0.01	1.00
灌木林地	0.06	1.00
疏林地	0.45	0.92
其他林地	0.01	1.00
高覆盖度草地	0.02	0.96
中覆盖度草地	0.02	0.95
低覆盖度草地	0.02	1.00
河渠	0	0.20
湖泊	0	0
水库、坑塘	0	0.20
滩地	0	0.50
城镇	0	0.50
农村居民点	0	0.50
工交建设用地	0.20	0.50
裸岩石砾地	0	0.92

1.4 空间分异性

1.4.1 空间自相关分析 空间自相关分析中,采用全局莫兰指数(global Moran's I)来衡量万州区水土保持功能的空间分布特征。全局莫兰指数(global Moran's I)用于判断研究区域内变量的整体空间关联模式^[22],计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为变量在第 i 个和第 j 个研究单元上的观测值; $\bar{x}$ 为变量的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵的

元素,用于表示第*i*个和第*j*个研究单元间的空间关系,当*i*和*j*相邻时, w_{ij} 取值为1,否则为0。

1.4.2 核密度与标准差椭圆 核密度估计(kernel density estimation)用于分析土壤保持功能在空间上的分布密度特征,通过计算特定位置周边的要素集聚程度,直观呈现其空间分布的热点区域与冷点区域^[23]。计算公式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (14)$$

式中: $f(x)$ 为在位置*x*处的核密度估计值;*n*为观测点的数量;*h*为带宽,是核密度估计中的关键平滑参数。 x_i 为第*i*个观测点的空间位置; $K(\cdot)$ 为核函数(kernel function),用于衡量观测点 x_i 对位置*x*的影响权重,计算公式为:

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (15)$$

$$u = \frac{x-x_i}{h} \quad (16)$$

式中:*u*为位置*x*与观测点 x_i 间的标准化距离。

标准差椭圆法借助对样本点标准差与协方差的计算,明确地理要素空间分布的中心位置、离散程度以及主轴方向,以此来展现地理现象在空间上的集中趋势和方向性特点^[24]。具体计算公式为:

$$\begin{cases} \bar{x} = \sum_{i=1}^m w_i x_i / \sum_{i=1}^m w_i \\ \bar{y} = \sum_{i=1}^m w_i y_i / \sum_{i=1}^m w_i \end{cases} \quad (17)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (w_i \tilde{x}_i \cos \theta - w_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^m w_i^2}} \quad (18)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (w_i \tilde{x}_i \sin \theta - w_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^m w_i^2}} \quad (19)$$

式中:*m*为万州参与分析的土壤保持功能栅格单元总数; w_i 为第*i*个栅格单元的权重,即该单元的土壤保持功能; x_i 、 y_i 分别为万州区第*i*个土壤保持功能栅格单元的空间中心坐标; σ_x 、 σ_y 分别为椭圆长轴与短轴的标准偏差; $\tilde{x}_i$ 、 $\tilde{y}_i$ 分别为第*i*个县级单元空间中心到平均中心的横、纵坐标偏差; θ 为椭圆方位角, (°)。

1.5 土壤保持功能时空演化驱动机制

地理探测器(geodetector)用于识别并量化驱动土壤保持功能(因变量)空间分异的因素(自变量),契合土壤保持过程的非线性与空间异质性特征;其

通过计算各自变量对因变量空间格局的解释力,评估不同因素对土壤保持空间分布的贡献^[25],计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (20)$$

式中:*q*为解释力值,取值为[0,1],*q*=0表示自变量对因变量无解释力;*L*为自变量的分类数量; N_h 为第*h*类(组)的样本数量;*N*为总样本数量; σ_h^2 为第*h*类(组)内因变量的方差; σ^2 为因变量的总方差。

2 结果与分析

2.1 县域土壤保持功能时空演变格局

1990—2020年万州土壤保持功能在空间上呈东南高、西北低分布格局,高值区主要分布于东部和北部林地覆盖区,低值区集中于西南部河谷及丘陵地带,与坡耕地和建设用地的分布重合。土壤保持功能均值呈先降后升趋势,由1990年的73.03 t/(hm²·a)波动上升至2020年的74.58 t/(hm²·a),整体提升1.55 t/(hm²·a)。从土地利用类型看,林地与草地的区域土壤保持功能最高的2种地类,坡耕地土壤保持功能较低;而建设用地、水域及平缓旱地的土壤保持功能始终处于最低水平。

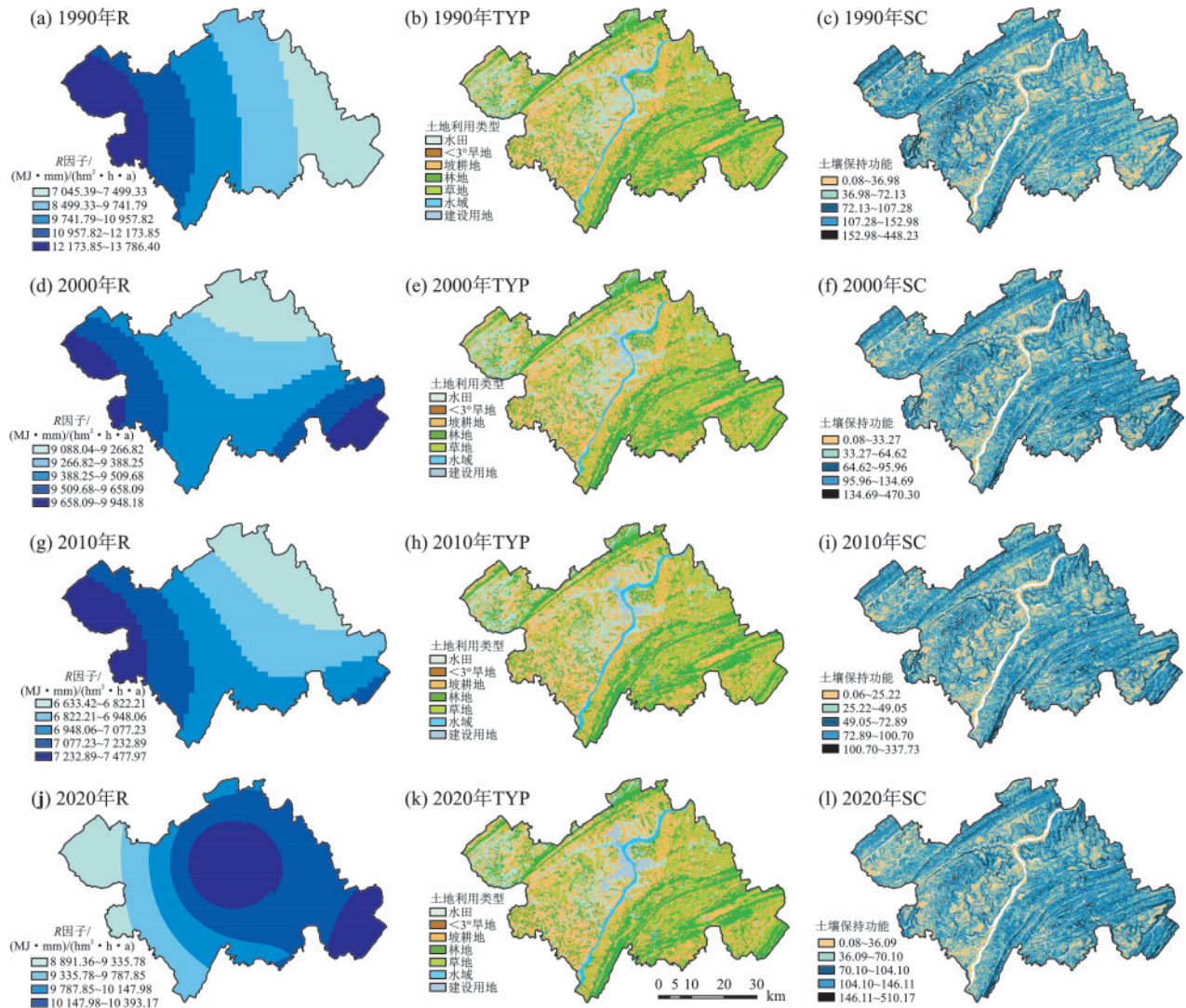
万州降雨侵蚀力(*R*)因子在研究期内整体呈“东低西高”空间分布格局(图2)。整体上,区域*R*因子在1990—2020年呈先降后升趋势,其中2010年为最低值,2020年有所回升。空间分布上,各年份*R*因子高值区逐年向研究区中部聚集,低值区由东向西迁移,最后呈自东南向西北递增的分布格局。

万州区土地利用分布格局基本保持一致,以坡耕地、林地为主要土地利用类型。坡耕地面积略有减少(从约1 255.18 km²降至1 208.84 km²),林地面积有所增加(从约899.08 km²增至953.12 km²),坡耕地占比约为区域总面积的48.88%。坡耕地主要分布在中北部和西部等地形起伏较高区域,林地广泛分布在东部、南部及西北部等区域,草地主要分布在西北部部分区域,建设用地集中分布在沿河及中心区域。

2.2 土壤保持功能空间异质性

万州区土壤保持功能核密度高值区长期集中于中部,时序上呈先波动下降、后逐步回升趋势,高值区位置随时间逐渐向东南扩散(图3)。高值区长期集中于中部标准差椭圆覆盖范围,形成显著且稳定的核心聚集区,土壤保持功能的空间分布整体格局未发生显著变动。时序变化上,土壤保持功能核密度整体呈先波动下降、后逐步回升趋势。1990年土

壤保持功能核密度高值达 606.27,高值区位于东北部林地;2000—2010 年土壤保持功能核密度高值降至 392.66,核心聚集区范围缩小,高值区转移到东南部,低值区位于中部;2020 年,核密度高值回升至 557.43,土壤保持功能在坡耕地集中区呈集聚态势,且集聚范围较 2010 年有所扩大。



注:R 为降雨侵蚀力;TYP 为土地利用类型;SC 为土壤保持功能。
图 2 万州降雨侵蚀力、土地利用类型和土壤保持功能的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of rainfall erosivity, land use types, and soil conservation function in Wanzhou

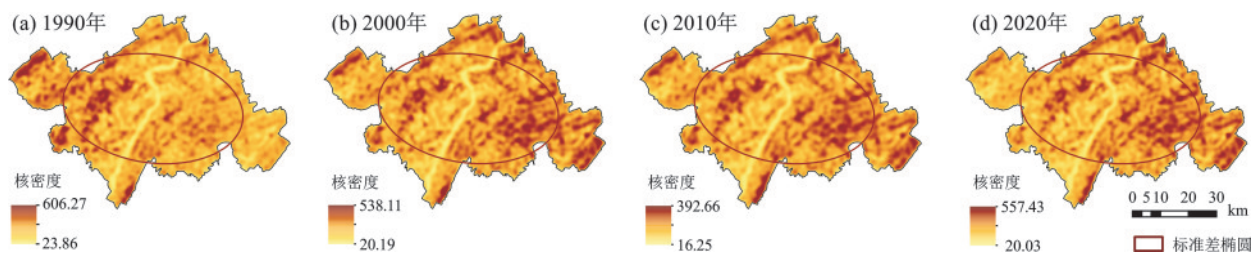


图 3 土壤保持功能核密度
Fig.3 Kernel density of soil conservation function

研究期间万州区土壤保持功能的全局 Moran's *I* 指数始终维持在 0.14~0.16, *Z* 为 53.68~60.83 ($p=0.01$), 表明其存在显著全局正空间自相关特征(表 3)。从时序变化看,土壤保持功能的空间集聚性呈“先减弱、后增强”的阶段性特征,1990—2010 年 Moran's *I* 指数从 0.15 缓慢降至 0.14, 2010—2020 年则回升至最高值 0.16。

2.3 土壤保持功能驱动机制

2.3.1 土壤保持功能单因子驱动效应的探测 万州土壤保持功能空间分异的核心驱动因子为坡度,其

他因子随时间序列变化明显(图4)。研究期间,坡度因子始终为主导因子,其解释力为0.71~0.75,显著高于其他因子的解释力。植被因子的驱动作用呈增强趋势,1990年归一化植被指数(NDVI)以0.44的解释力成为第2主导因子;2010年植被覆盖度的解释力降至0.21,但2020年回升至0.34并重新成为第2主导因子。部分社会经济与气候因子表现出阶段性调控特征,1990年和2000年,人口密度分别以0.39、0.43的解释力位列第3、第2主导因子,但在2010—2020年未能进入主导因子行列。气温仅在2000年(解释力为0.34)成为第3主导因子。

表 3 土壤保持功能空间自相关分析参数

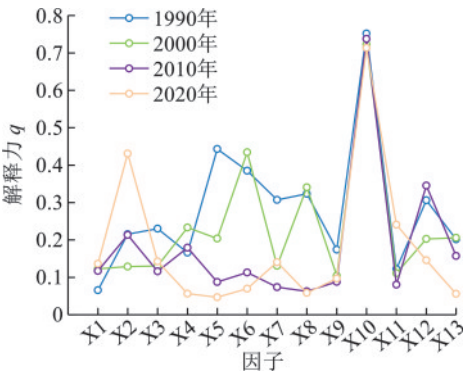
Table 3 Parameters of spatial autocorrelation analysis of soil conservation function

参数	1990年	2000年	2010年	2020年
Moran's I	0.15	0.14	0.14	0.16
Z-value	57.54	54.55	53.68	60.83
p	0	0	0	0

从驱动因子类型来看,自然环境因素中,坡度表现出较强的解释力,是万州区土壤保持功能的关键自然环境驱动因子;社会经济因素中,人口密度解释力较强。植被覆盖度作为反映植被覆盖状况的核心指标,在研究时段内解释力逐渐上升,在2020年达到最高值0.43。社会经济因素中,人口密度在1990—2000年解释力较高($q=0.39\sim0.43$),2010年后人口密度解释力逐渐下降($q<0.30$),人口因子对土壤保

持功能的影响减弱。田宇等^[4]研究表明,三峡库区土壤保持功能变化的影响因素贡献依次为海拔、坡度、降水、植被覆盖变化,人类活动干扰是土壤保持功能的主要驱动力。

2.3.2 土壤保持功能多因子交互驱动机制 土壤保持功能空间分异的驱动因子间交互作用类型表现为非线性增强和双因子增强,且任意双因子交互作用的解释力均超过单一因子(图5)。其中,坡度、植被覆盖度等核心自然因子与其他因子的交互增强效应尤为突出,如坡度(SLP)与温度(TEM)、坡度(SLP)与土壤类型(STYP)的交互组合,在各时期均表现出较高解释力。



注: X1~X13 分别为 SES(土壤侵蚀敏感性)、FVC(植被覆盖度)、NTL(夜间灯光数据)、GDP(国内生产总值)、NDVI(归一化植被指数)、POP(人口密度)、MAP(年平均降水量)、TEM(温度)、DEM(数字高程模型)、SLP(坡度)、STYP(土壤类型)、ASP(坡向)、GLT(地貌类型)。

图 4 土壤保持功能单因子探测结果
Fig.4 Results of single-factor detection of soil conservation function

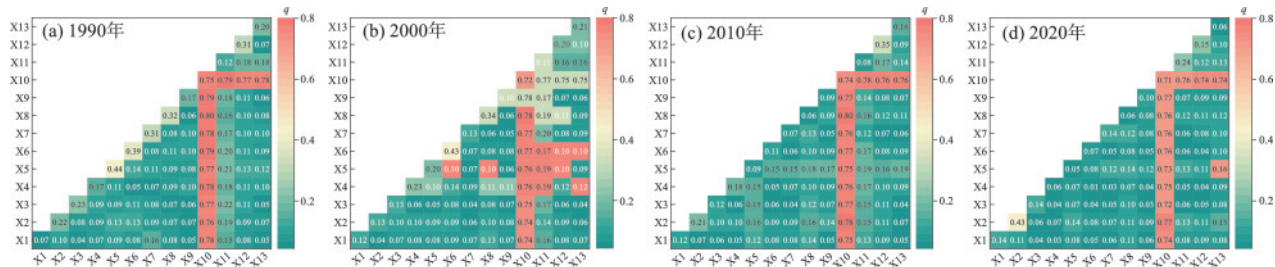


图 5 土壤保持功能交互探测结果
Fig.5 Results of interaction detection of soil conservation function

万州区土壤保持功能因子主导交互组合随时序演变呈现明显差异,主要表现为坡度(SLP)与温度(TEM)、植被覆盖度(FVC)的交互作用。1990年坡度(SLP)与温度(TEM)的交互作用最强($q=0.79$),2000年主导交互组合转变为坡度(SLP)与温度(TEM)($q=0.78$)、坡度(SLP)与数字高程模型(DEM)($q=0.78$)2类,地形因子(SLP、DEM)与气候因子(TEM)的交互作用共同主导土壤保持功能空间分布;2010年主导交互组合重新成为坡度(SLP)与

温度(TEM)($q=0.80$);2020年主导交互组合转变为坡度(SLP)与数字高程模型(DEM)($q=0.77$)、坡度(SLP)与植被覆盖度(FVC)($q=0.77$)2类,地形因子与植被因子的交互作用显著。

3 讨论

3.1 坡度对坡耕地土壤保持功能的影响

坡度分级显著影响土壤保持功能,万州区土壤保持功能时序上呈先降后升波动趋势,且低、中、高坡度区分别呈土壤保持功能较低且稳定、中等及高

侵蚀敏感的特征(图6)。与王欢等^[26]发现的坡度作为关键地形因子、与坡耕地土壤保持功能存在紧密关联、不同坡度分级下土壤保持功能呈明显差异结论一致。从时序变化来看,万州区土壤保持功能的平均值呈明显的先降后升的波动特征。坡耕地土壤保持功能平均值从1990年 $63.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 波动上升,在2020年达到 $63.76 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;低坡度($3^\circ \sim 8^\circ$)区坡耕地土壤保持功能整体处于较低且稳定的水平,主要原因在于1999年后退耕还林等政策^[27]推动使林地面积增加到 953 km^2 ,同时,坡耕地实施秸秆覆

盖、横坡垄作等水土保持措施^[28]改造坡面微地形,阻断径流通道、延长土壤入渗时间,使低坡度区由“侵蚀源”转为“沉积汇”^[29]。中坡度($8^\circ \sim 25^\circ$)区土壤保持功能处于中等水平,其功能平均值在2020年较1990年提升 $0.09 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。随着坡度增加,径流剪切力和输沙能力呈指数增长,侵蚀强度加剧,需要工程措施(梯田、浅沟)来截短坡长、分割径流能量。高坡度($>25^\circ$)区是土壤侵蚀的敏感区,其潜在的侵蚀风险极高^[30],也使高坡度坡耕地成为水土保持工程的重点实施区域^[31]。

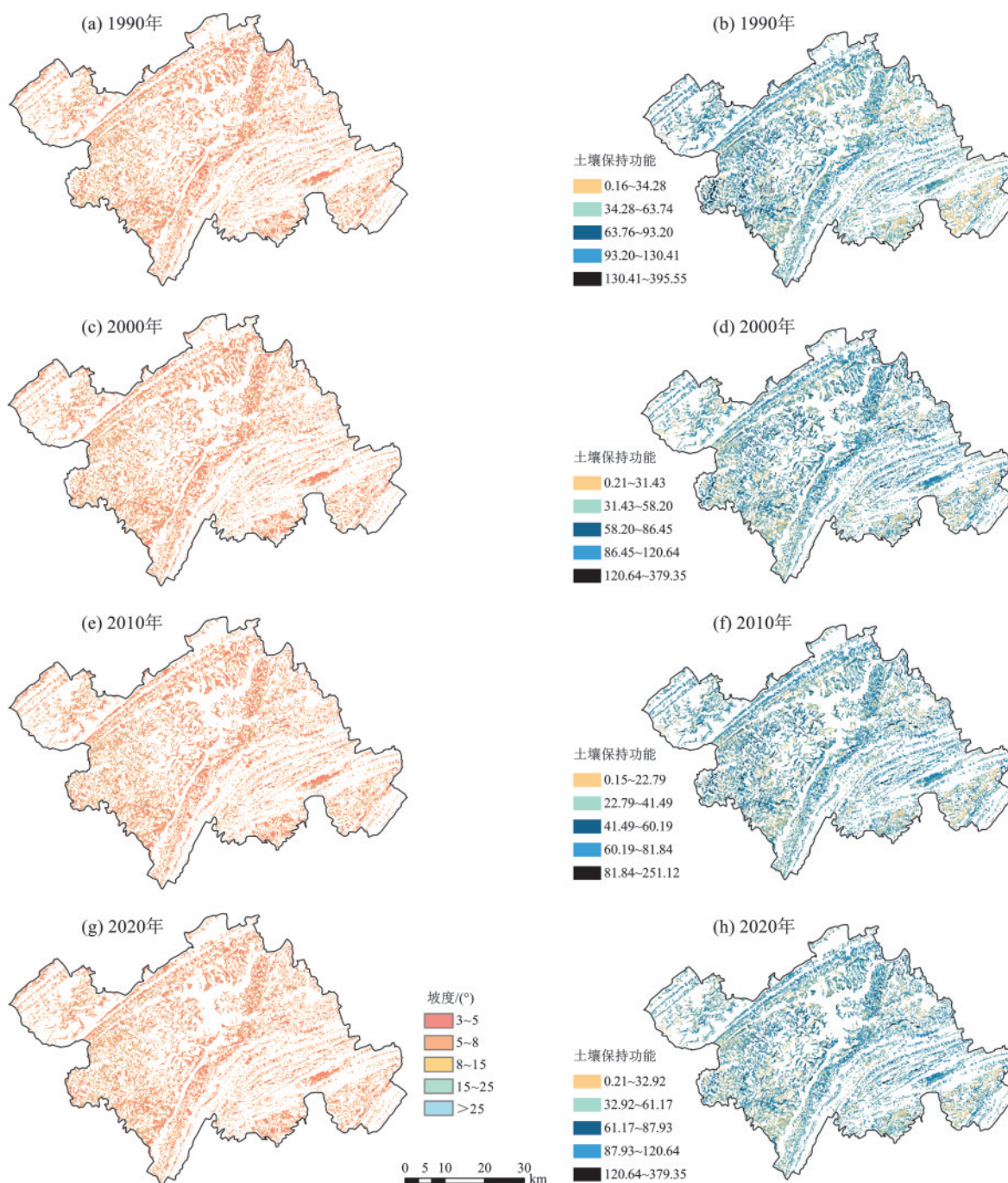


图6 不同坡度坡耕地土壤保持功能分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of soil conservation function in sloping cropland under different slope gradients

针对不同坡度的坡耕地,应采取差异化的水土保持措施以提升水土保持功能的适配性。在低坡度($3^{\circ}\sim 8^{\circ}$)区域,可推行秸秆覆盖与横坡垄作,通过增加地表覆盖和改变微地形来有效减少雨滴溅蚀,减缓径流,增加土壤入渗。西南紫色土区的室内模拟降雨试验^[32]发现,秸秆覆盖能有效改变侵蚀泥沙的分选过程,优先保护土壤中的细颗粒和养分。对于中坡度($8^{\circ}\sim 15^{\circ}$)区域,则需修建蓄水池以截短坡长、拦蓄径流,并搭配等高带状种植减缓流速、拦截泥沙,从而实现工程与生物措施的协同增效。对长江上游紫色土区植物篱系统的研究^[33]表明,植物篱带内土壤物理性质得到显著改善。秦巴山区地埂植物篱研究^[34]表明,植物篱抗冲、抗蚀性及临界坡长效应显著,是坡耕地坡面水土保持的有效生物措施。对坡度 $>25^{\circ}$ 陡坡耕地实施退耕还林还草,体现阈值管理和基于自然的解决方案的原则。

3.2 泥沙输移比(SDR)对坡耕地水土保持功能的影响

泥沙输移比作为量化坡耕地“侵蚀-滞留-输移”动态过程的核心参数,反映地块尺度上水土保持功能的实现机制。传统的土壤侵蚀模型(如USLE)主要聚焦于计算潜在的土壤流失量,但其模型框架并未包含对泥沙输移过程的模拟,因此,无法量化从地块实际输出的泥沙量^[35]。InVEST模型通过引入空间显式的SDR模块,有效地弥补了该不足^[36]。

在地块尺度上,SDR代表地块内因侵蚀而产生的泥沙,在输移至地块边界前被各种因素拦截和滞留的比例。坡面SDR变化,实质是侵蚀能量和径流挟沙量随时间变化的反映,是二者变化的函数。当径流输沙能力超过坡面侵蚀产沙量时,SDR较高;而当可供搬运的泥沙量超过径流的输沙能力时,泥沙发生淤积,SDR则较低^[37]。SDR值越小,表明地块内产生的泥沙大部分被就地拦截和沉积,意味着地块内部存在有效的“沉积汇”(如梯田的田面、植物篱或草带的背水侧、微地形的凹陷处)。该格局反映地块的泥沙拦截过程占主导地位,水土保持措施有效地打破坡面径流的连续性,降低系统的泥沙连通性。相对地,SDR值越大,地块具有高度的泥沙输送连通性,侵蚀产生的泥沙极易被径流挟带并输出地块边界。通常意味着地块“源-汇”结构失衡,以“侵蚀源”为主导,反映输移过程占主导。沉积汇的存在,反映地块对泥沙的拦截和留存功能,说明水土保持措施已发挥一定减沙作用,但整体效益有待提升^[38]。

SDR不仅可实现从“潜在侵蚀量”到“实际输沙量”的转换^[39],SDR同时受到空间尺度影响,在中小流域内部因子相对一致,泥沙输移“源-汇”结构更易

被工程活动破坏,“沉积汇”作用更显著,表现为较低连通性与较小SDR;而在更大流域或县域尺度,地形起伏、母质差异、下垫面破碎度与人类活动强度叠加,使SDR对空间尺度的敏感性增强。由此可见,在InVEST-SDR空间显式框架下,准确表征不同空间尺度下SDR响应特征,是提高坡耕地地块与县域尺度水土保持功能评估精度的关键。

4 结论

1) 1990—2020年万州不同土地利用类型的土壤保持功能总体呈波动上升趋势,空间分布呈东高西低格局。土壤保持功能平均值整体提升 $1.55\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,林地与草地土壤保持功能最高,坡耕地土壤保持功能较低;土壤保持功能空间集聚性显著,核密度高值区稳定分布在中部。

2) 万州不同土地利用类型土壤保持功能存在明显空间自相关,高-高集聚区集中于东部山地,低-低集聚区由北向西南扩展。土壤保持功能在空间上呈核心-边缘分布,2020年核密度值较2010年显著回升。

3) 万州坡耕地土壤保持功能空间分异的最强单因子是坡度($q=0.71\sim 0.75$),植被覆盖度的解释力随时间增强;社会经济因子如人口密度在早期影响显著,后期作用减弱;多因子交互作用均为增强型,其中坡度与温度、坡度与植被覆盖度组合在各时期起主导作用。

4) 坡度是坡耕地土壤保持功能的关键影响因素。低坡度($3^{\circ}\sim 8^{\circ}$)区可推广秸秆覆盖与横坡垄作,中坡度($8^{\circ}\sim 25^{\circ}$)区宜采用蓄水池与植物篱相结合的综合措施,高坡度($>25^{\circ}$)区退耕还林还草体现“阈值管理”和“基于自然的解决方案”的原则。

参考文献:

- [1] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.
Liu Yue, Zhao Wenwu, Jia Lizhi. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 432-440.
- [2] Zhang Caixia, Zhang Leiming, Li Shimei, et al. Soil conservation of national key ecological function areas[J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(6): 397-404.
- [3] 陶佳,张帆,周凤艳,等.辽西山地不同水土保持措施对坡面土壤养分流失的影响[J].生态学杂志,2025,44(8):2515-2521.
Tao Jia, Zhang Fan, Zhou Fengyan, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil nutrient loss on slope in mountainous re-gion of western Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(8): 2515-2521.
- [4] 田宇,朱建华,李奇,等.三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J].生态学杂志,2020,39(4):1164-1174.

- Tian Yu, Zhu Jianhua, Li Qi, et al. Spatial and temporal distribution of soil conservation and its driving forces in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1164-1174.
- [5] Sharp Richard, Tallis Heather T. Ricketts Taylor, et al. InVEST 3.8.0 User's Guide[R]. Stanford: The Natural Capital Project, Stanford University, 2018.
- [6] Hamel Pierre, Chaplin-Kramer Rebecca, Sim Soohong, et al. A new approach to modeling the sediment retention ecosystem service using InVEST[J]. Ecological Modelling, 2015, 306: 333-345.
- [7] 喇露梦, 勾蒙蒙, 李乐, 等. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1368-1377.
- La Lumeng, Gou Mengmeng, Li Le, et al. Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges Reservoir Area: A case study of Zigui County [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11): 1368-1377.
- [8] 柏跃波, 邓良, 洪欣, 等. 基于SRP-ES方法的淮河流域生态脆弱性评价: 以安徽段为例[J]. 环境工程学报, 2024, 18(9): 2625-2636.
- Bai Yuebo, Deng Liang, Hong Xin, et al. Ecological vulnerability evaluation of Huaihe river basin based on SRP-ES approach: A case study of Anhui section[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(9): 2625-2636.
- [9] 赵欣悦, 王金凤, 李庆, 等. 基于InVEST模型的北三河流域土壤保持功能研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(4): 487-496.
- Zhao Xinyue, Wang Jinfeng, Li Qing, et al. The function of soil conservation in Beisan River basin based on InVEST model[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2022, 40(4): 487-496.
- [10] 胡晓倩, 李忠武, 陈佳, 等. 南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 95-100.
- Hu Xiaoqian, Li Zhongwu, Chen Jia, et al. Soil conservation benefits of the grain for green program in the hilly red soil region of southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 95-100.
- [11] 陆传豪, 代富强, 刘刚才. 2000—2012年三峡库区土壤侵蚀动态变化: 以重庆市万州区为例[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 1-8.
- Lu Chuanhao, Dai Fuqiang, Liu Gangcai. Dynamic changes of soil erosion in Three Gorges Reservoir area from 2000 to 2012: A case study at Wanzhou district of Chongqing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 1-8.
- [12] Li Shicheng, Bing Zilu, Jin Gui. Spatially explicit mapping of soil conservation service in monetary units due to land use/cover change for the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): e468.
- [13] Cui Peng, Ge Yonggang, Lin Yongming. Soil erosion and sediment control effects in the Three Gorges Reservoir region, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(4): 289-297.
- [14] Tallis Heather T, Ricketts Taylor, Guerry Anne D, et al. InVEST 3.0.0 beta User's Guide [R]. Stanford, CA: The Natural Capital Project, 2013.
- [15] Tilahun A, Desta H. Soil erosion modeling and sediment transport index analysis using USLE and GIS techniques in Ada'a watershed, Awash River basin, Ethiopia [J]. Geoscience Letters, 2023, 10(1): e57.
- [16] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 33-40.
- Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Spatial distribution of rainfall erosivity in China[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(1): 33-40.
- [17] Wang Shengfeng, Xu Xinmiao, Lei Longwei. The evolution of spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in Henan Province, Central China[J]. Scientific Reports, 2024, 14: e25606.
- [18] 田芷源, 梁音, 赵院, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性因子更新方法与应用[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(6): 63-70.
- Tian Zhiyuan, Liang Yin, Zhao Yuan, et al. Updating method of soil erodibility factor in water-erosion areas of China and its application [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(6): 63-70.
- [19] 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.
- Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 105-110.
- [20] 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 Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, 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.
- [21] 许联芳, 张海波, 张明阳, 等. 南方丘陵山地土壤保持功能及其经济价值时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9): 1599-1605.
- Xu Lianfang, Zhang Haibo, Zhang Mingyang, et al. Spatial-temporal variation characteristics of the soil conservation function and its economic value in the southern hill and mountain area, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(9): 1599-1605.
- [22] 王振国, 杨国福, 聂文彬, 等. 乡村地表温度对富春江流域景观格局演变的多尺度响应[J]. 生态学杂志, 2025, 44(2): 575-589.
- Wang Zhenguo, Yang Guofu, Nie Wenbin, et al. Multi-scale response of rural land surface temperature to land-

- scape pattern evolution in the Fuchun River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(2): 575-589.
- [23] Zubaroglu A, Atalay V. Data stream clustering: A review [J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(2): 1201-1236.
- [24] Xu Yazhou, Hao Shuang, Cui Yuhuan, et al. Analysis of the spatiotemporal expansion and pattern evolution of urban areas in Anhui Province, China, based on nighttime light data[J]. Ecological Indicators, 2023, 157: e111283.
- [25] 丁悦, 蔡建明, 任周鹏, 等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素[J]. 地理科学进展, 2014, 33(5): 657-666.
- Ding Yue, Cai Jianming, Ren Zhoupeng, et al. Spatial disparities of economic growth rate of China's National-level ETDZs and their determinants based on geographical detector analysis[J]. Progress in Geography, 2014, 33(5): 657-666.
- [26] 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.
- Wang Huan, Gao Jiangbo, Hou Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1674-1686.
- [27] 吕平毓, 张铎, 熊中福, 等. 三峡库区成库前后干流万州段水体总磷特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(7): 162-167.
- Lü Pingyu, Zhang Jian, Xiong Zhongfu, et al. Characteristics of total phosphorus in Changjiang mainstream at Wanzhou section before and after Three Gorges Reservoir impoundment [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2020, 42(7): 162-167.
- [28] 卜崇峰, 蔡强国, 袁再健. 三峡库区等高植物篱的控蚀效益及其机制[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 14-18.
- Bu Chongfeng, Cai Qiangguo, Yuan Zaijian. Mechanism and effect of different contour hedgerow types on runoff and sediment erosion in Three Gorges Reservoir Area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4): 14-18.
- [29] 张萍. 基于SCS-CN的“侵蚀源”与“沉积汇”的识别及其应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- Zhang Ping. Identification and application of "erosive source" and "deposive sink" based on SCS-CN [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [30] 宁婷, 郭新亚, 荣月静, 等. 基于RUSLE模型的山西省生态系统水土保持功能重要性评估[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 205-210.
- Ning Ting, Guo Xinya, Rong Yuejing, et al. Evaluation of soil conservation function importance of ecosystems in Shanxi Province based on RUSLE model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 205-210.
- [31] Xu Xiangzhou, Liu Zeyu, Xiao Peiqing, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J]. Catena, 2015, 135: 231-239.
- [32] 曾世昌, 张海香, 梁珂, 等. 不同秸秆覆盖量下紫色土坡耕地侵蚀泥沙粒径分布特征[J]. 农业工程学报, 2025, 41(16): 145-154.
- Zeng Shichang, Zhang Haixiang, Liang Ke, et al. Distribution characteristics of eroded sediment particles in purple slope cultivated land under different straw mulch amount [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(16): 145-154.
- [33] 黎建强, 张洪江, 程金花, 等. 长江上游不同植物篱系统的土壤物理性质[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 418-424.
- Li Jianqiang, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, et al. Soil physical properties of different hedgerow systems in upper reaches of Yangtze River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 418-424.
- [34] 刘卉芳, 王向东, 涂洋, 等. 秦巴山区地埂植物篱水土保持效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 39-42.
- Liu Huifang, Wang Xiangdong, Tu Yang, et al. Research on soil and water conservation of terrace hedgerows in the qinba mountain area [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(10): 39-42.
- [35] Chen Xiao, Luo Zhibang, Wang Zhen, et al. Trade-offs between grain supply and soil conservation in the Grain for Green Program under changing climate: A case study in the Three Gorges Reservoir region [J]. Science of the Total Environment, 2024, 945: e173786.
- [36] 王珠娜, 王晓光, 史玉虎, 等. 三峡库区秭归县退耕还林工程水土保持效益研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 68-72.
- Wang Zhuna, Wang Xiaoguang, Shi Yuhu, et al. Effects of soil and water conservation of the conversion of farmland to forest in Zigui County of the Three Gorges Reservoir Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 68-72.
- [37] 闫语, 秦耀伟, 东嘉琪, 等. 京津冀地区生态系统服务权衡与协同关系及驱动因素分析[J]. 环境科学学报, 2025, 45(3): 493-506.
- Yan Yu, Qin Yaowei, Dong Jiaqi, et al. Analysis on ecosystem service trade-offs/synergies and drivers in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(3): 493-506.
- [38] Casabella-González M J, Borselli L, García-Meza J V. Improved MPSIAC model for soil erosion rate assessment in semiarid zones [J]. Journal of Arid Environments, 2023, 212: e104946.
- [39] 王天巍, 李念. 泥沙连通性定量表征指数研究进展及发展需求[J]. 生态学报, 2024, 44(24): 11497-11511.
- Wang Tianwei, Li Nian. Research progress and development demands of the quantitative index for sediment connectivity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11497-11511.