

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.032

赵丽娜,李瑞,袁江,等.喀斯特流域径流侵蚀力的时空分异及其对岩溶特征因子的响应[J].水土保持学报,2024,38(1):60-69,78.

ZHAO Lina, LI Rui, YUAN Jiang, et al. Spatial-temporal variation of runoff erosivity in Karst Basin and its response to Karst characteristic factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1)60-69, 78.

喀斯特流域径流侵蚀力的时空分异及其对岩溶特征因子的响应

赵丽娜^{1,2}, 李瑞^{1,2}, 袁江^{1,2}, 敬俊^{1,2}

(1.贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳 550001;2.国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵阳 550001)

摘要: [目的] 西南喀斯特区土壤侵蚀问题十分突出,严重影响着区域社会经济的可持续发展。而喀斯特流域特征环境因子如何影响土壤侵蚀的直接驱动力—径流侵蚀力,目前尚不十分明晰。[方法] 以西南喀斯特地区的野纪河流域为例,基于流域出口水文站长系列高频实测数据,采用水土评估工具(SWAT)和偏最小二乘模型(PLSR)评估了 2005—2020 年流域径流侵蚀力的时空演变特征,解析了主要喀斯特环境因子对径流侵蚀力的影响。[结果] 流域多年平均径流侵蚀力为 $2\,326.47\text{ m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$,并具有较强的空间异质性,2005 年径流侵蚀力高值主要分布北部和中部,而 2010—2020 年,径流侵蚀力高值区逐步向中南部转移。时间上,受益于岩溶区“十一五”以来坡耕地水土流失综合治理、石漠化综合治理等生态修复工程的实施,野纪河流域径流侵蚀力总体上呈降低趋势。岩性、基岩裸露、坡度是影响野纪河流域径流侵蚀力变化的主导控制因子,对径流侵蚀力时空分异的共同解释度达 57.7%。[结论] 研究结果可为喀斯特流域水侵蚀导致的水土流失综合治理提供理论参考,有助于制定更加精准和有效的政策和措施,改善喀斯特区生态环境,促进该地区的可持续发展。

关键词: 径流侵蚀力;喀斯特;土壤侵蚀;SWAT 模型;PLSR 模型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)01-0060-10

Spatial-Temporal Variation of Runoff Erosivity in Karst Basin and Its Response to Karst Characteristic Factors

ZHAO Lina^{1,2}, LI Rui^{1,2}, YUAN Jiang^{1,2}, JING Jun^{1,2}

(1.School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] The soil erosion issue is very prominent in the karst region of southwest China and significantly affects the sustainable development of the regional economy. However, it is currently not very clear how the characteristic environmental factors of karst basins affect the direct driving force of soil erosion and runoff erosivity. [Methods] Taking the Yeji River Basin in the karst region of southwest China as an example and basing on the long-term and high-frequency field measurement data at the outlet hydrological station of the basin, the spatiotemporal change characteristics of runoff erosivity from 2005 to 2020 were evaluated and the influence of main karst environmental factors on runoff erosivity was analyzed by the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and the Partial Least Squares Model (PLSR). [Results] The average annual runoff erosivity was $2\,326.47\text{ m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$, with strong spatial heterogeneity. In 2005, the high runoff erosivity was mainly distributed in the northern and central parts of the basin. During 2010—2020, the high runoff erosivity area gradually shifted to the central and southern parts of the basin. In terms of time, benefiting from the implementation of ecological restoration projects such as comprehensive control of soil and water loss in sloping farmland and comprehensive control of rocky desertification since the 11th Five-Year Plan, the runoff erosivity of the Yeji River Basin had been generally decreasing year by year. Lithology,

收稿日期:2023-08-04

修回日期:2023-09-28

录用日期:2023-10-08

网络首发日期(www.cnki.net):2023-12-14

资助项目:贵州省基础研究计划项目(黔科合基础—ZK[2023]重点 029);国家自然科学基金项目(32060372)

第一作者:赵丽娜(1998—),女,硕士研究生,主要从事喀斯特山地景观及生态恢复研究。E-mail:1563296304@qq.com

通信作者:李瑞(1979—),男,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:rlfer@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

exposed bedrock, and slope were the dominant control factors, which jointly explained 57.7% of the spatiotemporal variation of runoff erosivity in the Yeji River Basin. [Conclusion] These results can provide a theoretical reference for the comprehensive control of soil erosion in karst basins and help to formulate more precise and effective policies and measures to improve the ecological environment of the karst area and promote the sustainable development of the region.

Keywords: runoff erosivity; Karst; soil erosion; SWAT model; PLSR model

Received: 2023-08-04

Revised: 2023-09-28

Accepted: 2023-10-08

Online(www.cnki.net): 2023-12-14

土壤侵蚀是全球土地退化的最主要威胁^[1],每年约有 250~400 亿 t 的土壤被侵蚀,造成价值约 28 608 亿元的经济损失^[2]。中国西南地区是世界上三大喀斯特集中分布区之一,面积约 $5.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[3]。由于特殊的地球化学背景和不合理的人类活动,土壤侵蚀成为该区域最严重的环境问题。而喀斯特地区的土层普遍瘠薄,土壤侵蚀造成的危害远高于黑土和黄土地区,并极易导致基岩的裸露,从而形成石漠化景观。因此,加强喀斯特区土壤侵蚀机制相关研究十分迫切且必要。

径流作为泥沙的重要媒介,直接决定土壤流失的危害,是诱发坡面土壤侵蚀的最主要动力。它通过冲刷表层土壤和运输沉积物加剧坡面、沟壑和山谷的水土流失。然而,相较于降雨,径流的监测和量化往往具有更大的难度。以往的研究多集中于探讨降雨及降雨侵蚀力对土壤侵蚀潜在风险的影响^[4-6],往往忽略径流与径流侵蚀力在土壤流失中的作用。目前,对于径流侵蚀力的相关研究,WISCHMEIER 等^[7]提出了降雨侵蚀力指标 EI_{30} 和径流因子的复合降雨侵蚀力指标,间接表达地表径流对土壤侵蚀的综合效应;或是将其作为参数进行计算流域的产沙量^[8-9],很少有学者单独对径流侵蚀力展开研究。然而,径流侵蚀力作为坡面土壤侵蚀的主要动力,直接反映坡面土壤侵蚀的潜在风险。因此,针对喀斯特区径流侵蚀力及其潜在影响机制的研究,有助于深入理解流域土壤侵蚀机制,并为水力侵蚀的防控提供重要参考。

偏最小二乘模型(PLSR)是一种新型多元统计分析模型,集多元回归分析、相关性分析和主成分分析 3 种分析方法优点于一身,是研究响应变量和自变量之间复杂交互关系的一种新手段,能够检测因子间存在共线情况,并能识别各因子与响应变量的正负相关性^[10],适用于多元问题解析,在地理学、生态学领域等广泛应用^[11]。因此,本研究用 PLSR 模型对径流侵蚀力的控制因子及其共同作用进行解析。此外,径流侵蚀力受到气候事件的频率、强度等影响,这些因素导致估算径流侵蚀力的不确定性很大,由于流域径流实测数据获取较为困难及模拟试验的复杂性,流域

尺度的径流侵蚀力研究多集中于经验统计阶段^[12],不能准确地反映径流侵蚀力的长期动态特征。因此,进一步加强对径流侵蚀力演变、驱动机制相关研究,以更好地了解径流对土壤侵蚀的潜在影响,特别是正遭受严重土壤侵蚀威胁的西南喀斯特地区。

本文基于 SWAT 和 PLSR 模型评估和分析了野纪河流域径流侵蚀力的时空变化及其主导控制因子,旨在:(1)量化和分析野纪河流域径流侵蚀力的时空演变特征;(2)解析喀斯特特征因子对径流侵蚀力的影响,探明主导特征因子;(3)阐明不同喀斯特特征因子对径流侵蚀力的影响机制。研究结果可为喀斯特地区水土流失治理和生态系统恢复提供重要的理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州野纪河流域位于中国西南腹地($105^{\circ}51'56''-106^{\circ}23'30''\text{E}$, $26^{\circ}50'23''-27^{\circ}25'47''\text{N}$),是乌江一级支流、长江二级支流,同时是长江上游重要的水源补给区(图 1)。该河自西北和西南向东北汇入乌江,全长 87.35 km,流域面积 $2\,165.83 \text{ km}^2$ 。流域处亚热带季风性湿润气候区,气候温和,降雨丰沛,雨热同季,年平均气温 $13\sim 18^{\circ}\text{C}$,年平均降水量约 $1\,200 \text{ mm}$ 。流域植被类型以针叶林、荒漠化灌草丛等为主。根据贵州省第三次石漠化调查公报,野纪河流域喀斯特面积达 $1\,688.83 \text{ km}^2$,占流域总面积的 77.98%,石漠化土地面积 $1\,231.17 \text{ km}^2$,占流域喀斯特区面积的 72.90%;水土流失面积 602.75 km^2 ,占流域总面积的 27.85%。流域人口密度较大,达 $300 \text{ 人}/\text{km}^2$ 。由于特殊的喀斯特生态环境,加之人类活动频繁,进一步加剧了野纪河流域生态系统的脆弱性。因此,野纪河流域岩溶地貌广泛发育,选取该流域作为研究区具有典型性和代表性。

野纪河流域建有水文观测站 1 处(石板塘水文站),中心坐标 $106^{\circ}10'37''\text{E}$, $27^{\circ}08'51''\text{N}$,观测内容包括水位、泥沙含量、降雨量等参数。石板塘水文站控制范围面积约为 948.94 km^2 。本研究以该范围作为研究区。

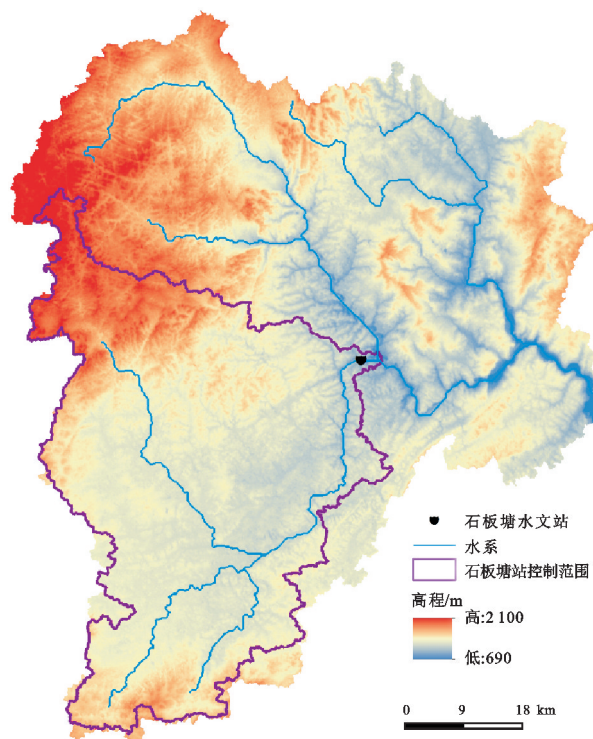


图 1 研究区 DEM

Fig. 1 DEM in the study area

1.2 数据来源

数据包括数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、土地利用数据、土壤数据、气象数据和水文数据等。(1)DEM 数据用于提取流域范围、坡度^[13-14]、海拔、地表粗糙度等;(2)气象数据包括逐日降水量、日最高气温和日最低气温、日照时间、日平均相对湿度和日平均风速;(3)水文数据包括 2005—2020 年逐日径流数据,用于 SWAT 模型的率定和验证,以及野纪河流域径流侵蚀力的模拟和计算;(4)基岩裸露率基于 Landsat TM 和 Landsat 8 遥感影像(来源于地理空间数据云),运用 ENVI 5.3 对流域遥感影像进行提取获得(见 1.3.5)。数据来源见表 1。

表 1 主要数据来源

Table 1 Primary data sources

数据名称	数据来源	备注
遥感图像	地理空间数据云/30 m	http://www.gscloud.cn/
土地利用	中国科学院资源与环境科学数据中心/30 m	https://www.resdc.cn/
土壤数据	中国科学院资源与环境科学数据中心/1 km	https://www.resdc.cn/
水文数据	贵州省水文水资源局	野纪河流域石板塘水文站
气象数据	中国气象数据网	http://data.cma.cn/plus/index.html
岩性数据	贵州省林业局	贵州省全国第三次石漠化普查数据库
DEM	中国科学院资源与环境科学数据中心/30 m	https://www.resdc.cn/

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型 SWAT 模型充分考虑流域地理空间异质性,被广泛应用于流域尺度的水文模拟^[15]。SWAT 模型描述单位时间内流域水循环过程,并遵循水量平衡方程。计算公式^[16]为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{deep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中: SW_t 为土壤最终含水量 (mm); SW_0 为土壤初期含水量; t 为时间 (天); R_{day} 为日降雨量 (mm); Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量; E_a 为第 i 天地表蒸发量 (mm); W_{deep} 为第 i 天透过土壤层的渗透量和侧流量 (mm); Q_{gw} 为第 i 天的地下水含量 (mm)。

1.3.2 SWAT 模型构建 SWAT 模型构建是基于 DEM 数据提取河网分布,通过河网分布将整个流域划分为若干子流域,之后将每个子流域再划分为一定数量的水文响应单元 (hydrologic response unit, HRU)。每个 HRU 是在同一个子流域内有着相同的土地利用类型、土壤类型和坡度的区域。之后通过气象数据与模型耦合,以 HRU 为最小模拟单元,在每个 HRU 内单独进行径流过程模拟,通过叠加得到子流域径流模拟值,最终在流域内河网汇集的条件下得到整个流域的总径流模拟值。

(1)子流域划分:输入 DEM 数据用于生成流域河网水系和分割子流域。基于流域划分界面添加子流域出水口,然后点击功能模块,手动添加流域出水口。最后,将流域划分为 31 个子流域。

(2)水文响应单元划分:通过各子流域内部土地利用、土壤类型和坡度叠加分析,生成 969 个水文响应单元,并将土地利用、土壤类型和坡度的阈值设为 10%,即每个子流域的某种土地利用和土壤类型的面积比 < 10% 时,其在模型模拟中将被不考虑。之后,重新计算剩下的土地利用和土壤类型的面积比,目的是将整个子流域的面积得到 100% 的模拟。

(3)模型数据的写入:继子流域和水文响应单元划分工作完成后,输入研究区所需日平均温度、日最高/最低温度、日累积 24 h 降水量、日平均风速等参数,以构建气象数据库。气象数据输入完成,意味着构建 SWAT 模型所需的基础数据输入完成。

(4)模型运行:子流域及 HRU 的划分及气象数据库的构建工作完成后,运行 SWAT 模型。在 SWAT 模型 Setup and Run SWAT Model Simulation 模块输入模拟时间;模型输出文件选择 All,输出的文件和数据库选择河道输出文件 (output.rch)、子流域输出文件 (output.sub) 和 HRU 输出文件 (output.hru);点击运行按钮 Run Swatchcheck,检查

并识别模型可能存在的问题;最后保存模拟结果。完成以上步骤后,基于 SWAT—CUP 软件进行水文参数敏感性分析及模拟结果的率定与验证等工作,得到模型的校准与验证结果,使其达到区域适用性的条件。

因为输入降雨数据的步长为日,故采用 SCS[公式(2)]^[17] 曲线法计算每个 HRU 上产生的地表径流,再通过流域内部河网的汇流而得到整个流域的径流模拟值。

$$Q_{\text{surf}} = \frac{R_{\text{day}} - I_a^2}{R_{\text{day}} - I_a + S}$$

(2)

式中: Q_{surf} 为累积径流量或净雨($\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$); R_{day} 为第 i 天的降水量; I_a 为初损,包括地表蓄水、截流和产流前的下渗($\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$); S 为持蓄系数($\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$)。

1.3.3 SWAT 模型的率定与验证 SWAT 模型参数繁多,为了提高模型的校准效率,在模型校验之前进行参数的敏感性分析以减少需要调整的参数。本文利用 SWAT—CUP 中的 SUFI—2 算法对本研究构建的 SWAT 模型进行参数敏感性分析。选取 11 个与径流相关的主要参数,经过 SUFI—2 多次迭代运算,计算出最佳参数值(表 2)。

表 2 模型敏感性参数

Table 2 Model sensitivity parameters

参数代码	物理意义	取值
v__ALPHA_BF.gw	基流系数	0.15
v__GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	135.00
v__ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.25
v__CH_N2.rte	主河道曼宁系数值	0.255
r__REVAPMN.gw	浅层地下水再蒸发系数	326.15
v__CANMX.hru	最大冠层截留量	0.15
v__EPCO.hru	植被蒸腾补偿系数	0.85
v__BIOMIX.mgt	生物混合效率系数	0.75
r__SLSUBBSN.hru	子流域平均坡长	87.00
v__GWQMN.gw	浅层地下水径流参数	0.5
r__CN2.mgt	SCS 径流曲线系数	0.18

本研究利用 SWAT—CUP 工具的 SUFI—2 算法对敏感性最高的参数进行率定和验证,数据选用石板塘水文站 2005—2015 年的逐月平均流量,将 2005—2010 年设为率定期,2011—2015 年设为验证期。采用纳什效率系数 NSE 和决定性系数 R^2 评价模型在研究区的适用性。一般模型性能等级和主要特征见表 3。

NSE 用以表征模型的总体效率,其值与模型的可信度呈正比关系,计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S - M)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{S} - \bar{M})^2}$$

(3)

R^2 用以表征模型的模拟值与实测值之间的变化趋势, R^2 越接近 1,则模拟效果越好,计算公式为:

$$R^2 = \left[\frac{\sum (M - \bar{M})(S - \bar{S})}{\sqrt{\sum (M - \bar{M})^2 \sum (S - \bar{S})^2}} \right]^2$$

(4)

式中: M 为模拟值; S 为实测值; $\bar{M}$ 为模拟平均值; $\bar{S}$ 为实测平均值; n 为实测值个数。

表 3 模型总体性能评级

Table 3 Overall model performance rating

性能	NSE	R^2
很好	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.70 < R^2 \leq 1.00$
好	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.60 < R^2 \leq 0.70$
令人满意	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.50 < R^2 \leq 0.60$
不满意	$0.50 < NSE$	$0.50 < R^2$

1.3.4 径流侵蚀力计算 径流侵蚀力的计算,基于 SWAT 模型对相关参数的模拟,然后采用修正通用土壤流失方程(MUSLE)推荐的径流侵蚀力因子公式^[18]计算得到:

$$RE = 11.8 \times (Q_{\text{surf}} \times q_{\text{peak}})^{0.56}$$

(5)

式中: RE 为径流侵蚀力值 $[\text{m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$; Q_{surf} 为地表径流(mm/h); q_{peak} 为峰值流量(m^3/s)。

1.3.5 基岩裸露率提取 本文基于 NDRI 的像元二分模型,参考前人^[19]的方法进行提取:

$$D = \begin{cases} 0 & N_{\text{NDRI}} < N_{\text{NDRI}_0} \\ 1 & N_{\text{NDRI}} > N_{\text{NDRI}_r} \\ (N_{\text{NDRI}} - N_{\text{NDRI}_0}) / (N_{\text{NDRI}_r} - N_{\text{NDRI}_0}) & N_{\text{NDRI}_0} \leq N_{\text{NDRI}} \leq N_{\text{NDRI}_r} \end{cases}$$

(6)

$$NDRI = \frac{TM7 - TM4}{TM7 + TM4}$$

(7)

式中: $NDRI$ 为归一化岩石指数; $TM7$ 为短波红外,波长在 $2.08 \sim 2.35 \mu\text{m}$; $TM4$ 为近红外,波长在 $0.76 \sim 0.90 \mu\text{m}$,根据像元二分法 2%对应的像元值为 $NDRI_0$, 98%对应的像元值为 $NDRI_r$; D 为岩石裸露率。

1.3.6 偏最小二乘模型 本文采用 PLSR 建模,用于识别径流侵蚀力的潜在变量。在充分调查喀斯特研究区域相关特征因子的基础上,本文选取地形、基岩裸露率、岩性、土地利用、地表粗糙度 5 个一级特征因子,15 个二级特征因子作为潜在因子(表 4)。为避免模型过度拟合,引入交叉验证来确定组分数量^[20],模型中 R^2 和 Q^2 累积指数衡量模型的拟合优度和预测优度,当 $R^2 > 0.5$ 时,PLSR 模型被认为可以提供良好的预测。PLSR 计算模型计算公式为:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)(O_i - O_m) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$$

(8)

$$Q^2 = 1.0 - \frac{\text{PRESS}}{SS}$$

(9)

$$Q_{\text{cum}}^2 = 1.0 - \prod \left(\frac{\text{PRESS}}{\text{SS}} \right)_m \quad (m = 1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

式中: n 为流域数; P_i 和 O_i 为 1 年的预测和观测年; P_m 和 O_m 为预测和观测的平均值; PRESS 为预测误差和平方; SS 为残差平方和; Q_{cum}^2 为主成分累积模型预测能力; m 为 PLSR 分量的个数。此外, 在 PLSR 建模中, 预测因变量的重要性由预测中的变量重要性 (VIP) 表示。计算公式为:

$$\text{VIP}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \omega_{ji}^2 \cdot \text{SSY}_i \cdot J}{m \cdot \text{SSY}_{\text{total}}}} \quad (11)$$

式中: ω_{ji} 为 j 变量和 i 变量的权重值; SSY_i 为第 i 变量的解释方差和 j 个变量数的平方和; $\text{SSY}_{\text{total}}$ 为解释因变量的平方之和。有关 SSY_i 和 SSY 总量计算见前人^[21]研究结果。

VIP > 1 的因素与解释因变量最相关, 被认为是 PLSR 模型的显著影响预测因素。回归系数 (b) 反映预测因子对因变量影响的方向和强度。本文采用 SIMCA 13.0 进行 PLSR 建模。

表 4 拟选喀斯特特征因子

Table 4 Karst feature factor is to be selected

一级变量	二级变量	单位
地形	海拔	m
	坡度	(°)
裸露基岩	基岩裸露率	%
岩性	白云岩与碎屑岩	%
	灰岩夹碎屑岩	%
	灰岩与碎屑岩	%
	连续白云岩	%
	连续石灰岩	%
	硅质岩与变质岩	%
土地利用	耕地	%
	草地	%
	林地	%
	灌木林	%
	城乡居住地	%
地表粗糙度	地表粗糙度	%

1.3.7 Mann-Kendall 突变检验 Mann-Kendall 是一种非参数统计检验, 常用于预测水文气象时间序列数据的长期和突然变化, 如温度、降水、径流^[22]等。本文用其检测径流侵蚀力的变化趋势和时间突变。检测方法为:

时间序列 $D_2, D_3, \dots, D_n$ 构建有序柱 r_i ; r_i 表示 $D_i > D_j (1 \leq j \leq i)$ 的样本积累数。等级级数 (S_k) 的计算方法为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

式中: 当 $D_i > D_j, r_i = 1$; 当 $D_i \leq D_j, r_i = 0 (j = 1, 2, \dots, i)$ 。 S_k 的期望值 $E(S_k)$ 及其序列方差 $V_{ar}(S_k)$

的定义为:

$$E(S_k) = n(n+1)/4 \quad (13)$$

$$V_{ar}(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72 \quad (14)$$

数据序列被认为是独立的, 检验统计量 (UF_k) 计算方法为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{V_{ar}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

UF_k 呈标准正态分布, 给定显著性水平 α 。查找正态分布表, 可以得到临界值 U_α 。例如, 当 $\alpha = 0.05$ 时, 其临界值为 $U_\alpha = \pm 1.96$; 当 $|UF_k| > |U_\alpha|$ 时, 说明序列有显著趋势变化。当 $UF_k > 0$ 时, 表明序列呈上升趋势; 当 $UF_k < 0$ 则呈下降趋势。当 UF_k 超过临界值时, 上升或下降趋势达到显著水平。当 UF_k 和 UB_k 2 条曲线相交时, 交点是突变的开始^[23]。

1.3.8 普通克里金插值 普通克里金插值利用区域变化量的原始数据和变异函数的结构特点, 对未知样点进行线性无偏、最优化估计。计算公式为:

$$P(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i P(x_i) \quad (16)$$

式中: $P(x_0)$ 为 x_0 点处估计降雨量; $P(x_i)$ 为第 i 站的实测降雨量; ω_i 为第 i 个观测点对插值点的权重; n 为实测雨量站的数量。

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型验证

根据模型模拟结果的参数评价标准, 当 $R^2 > 0.5$ 、 $\text{NSE} > 0.5$ 时, 模拟结果可接受。野纪河流域 SWAT 模型的校准与验证结果见图 2。可以看出, 率定期 (2005—2010) 和验证期 (2011—2015) SWAT 模型的校准和验证结果的 R^2 和 NSE 值均大于 0.5, 模拟结果达到精度要求。验证期间的 R^2 和 NSE 值略低于率定期, 这可能是由于模型参数的不确定性及验证期数据与率定期数据差异等原因导致的。总体来说, SWAT 模型适合野纪河流域水文过程的模拟。

2.2 径流侵蚀力的时空演变特征

由图 3 可知, 2005—2020 年野纪河流域的径流侵蚀力变化范围为 $20.03 \sim 4\,355.95 \text{ m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$, 年均径流侵蚀力 $2\,326.47 \text{ m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$, 最高和最低值分别出现在 2012 年 [$4\,355.95 \text{ m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$] 和 2011 年 [$843.65 \text{ m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$]。野纪河流域径流侵蚀力的空间异质性强烈, 呈散点状分布于流域各处。流域径流侵蚀力由 2005 年的中北部较高、南部较低, 转变为 2020 年的中部较高、四周较低的分布格局。时间上, 野纪河流域径流侵蚀力总体上呈不显著减弱的趋势。此外, M-K 突变检验的结果显示流域径流侵蚀力随时间呈波动变化, 在 2005—2020 年发生了 5 次突变, 但所有突变都不显著 ($p > 0.05$) (图 4)。

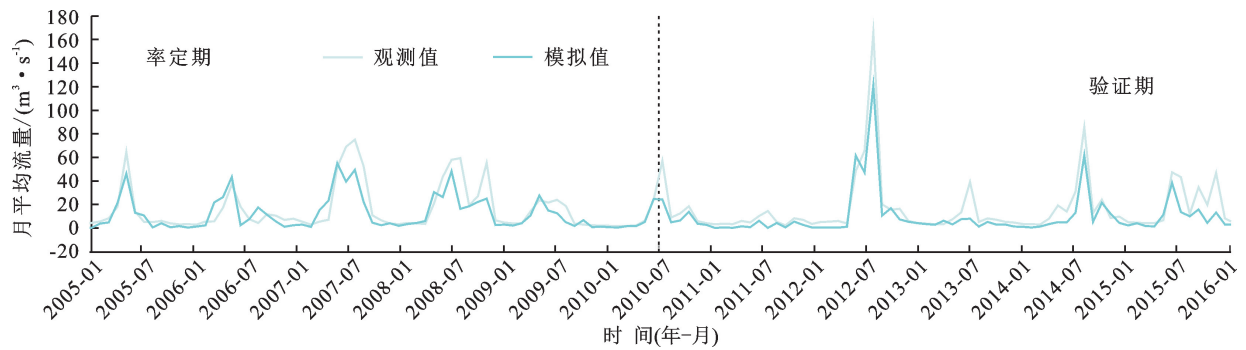


图 2 野纪河流域径流过程实测/模拟曲线

Fig. 2 Measured/simulated curve of runoff process in the Yeji River Basin

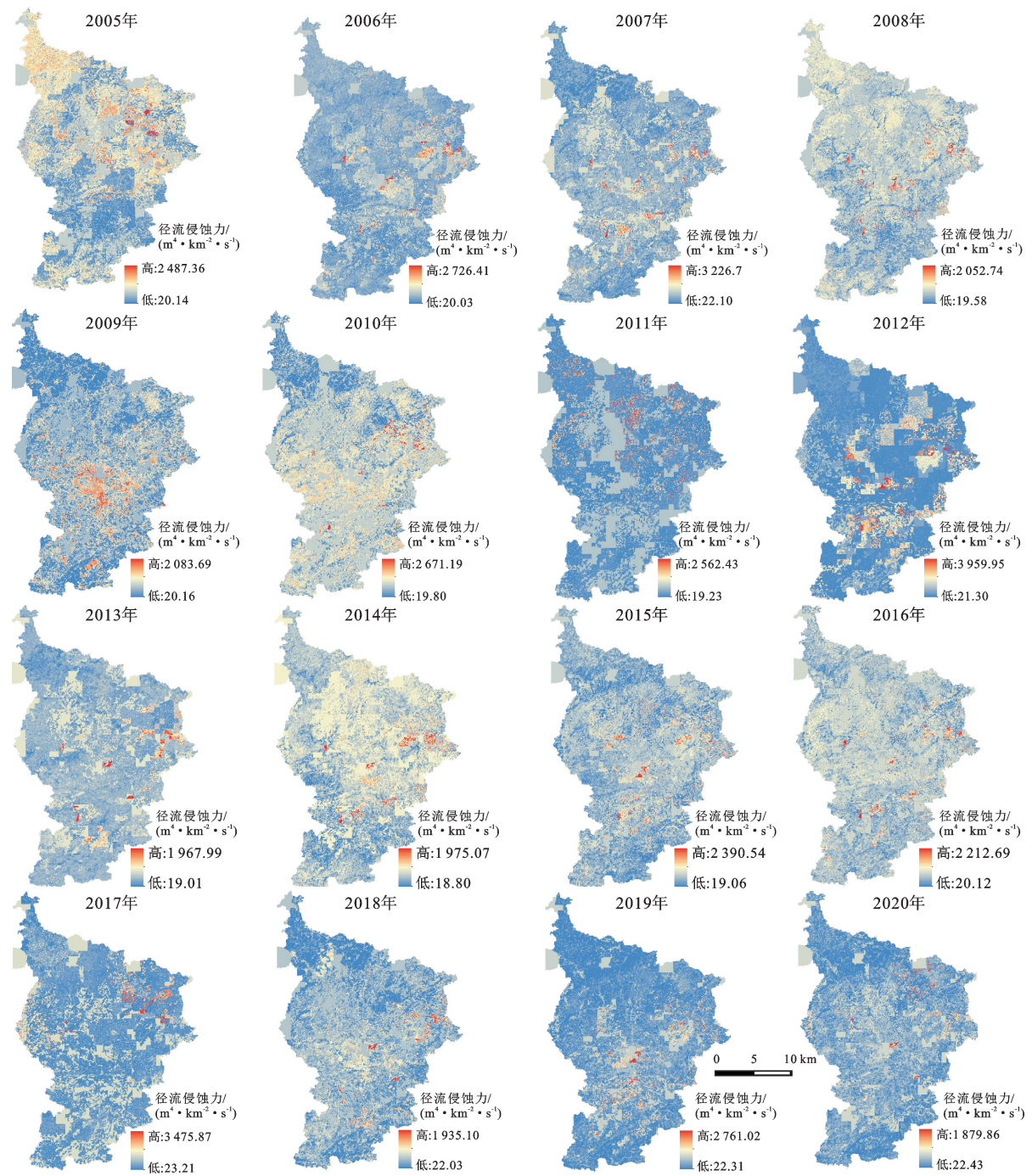


图 3 野纪河流域径流侵蚀力的时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of runoff erosivity in the Yeji River Basin

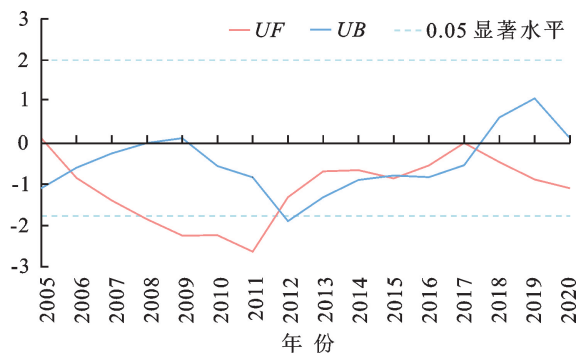


图 4 野纪河流域径流侵蚀力 M-K 突变检验

Fig. 4 M-K mutation test of runoff erosivity in the Yeji River Basin

2.3 喀斯特特征因子对径流侵蚀力的影响

表 5 为使用 PLSR 模型计算的野纪河流域径流侵蚀力最优模型。在 PLSR 模型中,第 1 个成分(白云岩与碎屑岩)对径流侵蚀力解释度为 29.0%,第 2 个成分(基岩裸露率)、第 3 个成分(坡度)和第 4 个成分(灰岩夹碎屑岩)的加入使模型的解释方差分别增加到 43.5%,51.0%,57.7%。当增加到第 5 个成分时, Q^2_{cum} 对模型的解释度下降,表明继续向模型添加更多的成分并没有改善已解释的方差。因此,白云岩与碎屑岩、基岩裸露率、坡度和灰岩夹碎屑岩是野纪河流域径流侵蚀力空间分异的主导喀斯特特征因子,共同解释了流域径流侵蚀力的 57.7%。

表 5 野纪河流域径流侵蚀力的偏最小二乘回归 (PLSR) 模型
Table 5 Partial least squares regression (PLSR) model of runoff erosivity in the Yeji River Basin

R^2	Q^2	组分	Y 中可解释的 变异的百分比	Y 的累积解释的 变异 / %	Q^2_{cum}
0.577	0.527	1	0.290	0.290	0.253
		2	0.145	0.435	0.278
		3	0.076	0.510	0.327
		4	0.067	0.577	0.527
		5	0.097	0.674	0.341

注:组分 1,2,3,4,5 分别为白云岩与碎屑岩、基岩裸露率、坡度、灰岩夹碎屑岩及海拔。

由图 5 可知,导致径流侵蚀力空间分异的主导喀斯特特征因子包括白云岩与碎屑岩($VIP=1.56, b=0.280$)和基岩裸露率($VIP=1.32, b=0.029$)、坡度($VIP=1.30, b=0.280$)和灰岩夹碎屑岩($VIP=1.22, b=-0.210$)。回归系数显示,对径流侵蚀力影响因子中,白云岩与碎屑岩、基岩裸露率、坡度、地表粗糙度、灰岩与碎屑岩、城乡居住地、连续白云岩与径流侵蚀力呈现正相关关系,表明径流侵蚀力随着前述因子的增加而增加;而灰岩夹碎屑岩、海拔、耕地、灌木林、草地、连续石灰岩、林地、硅质岩及变质岩与径流侵蚀

力呈现负相关关系。

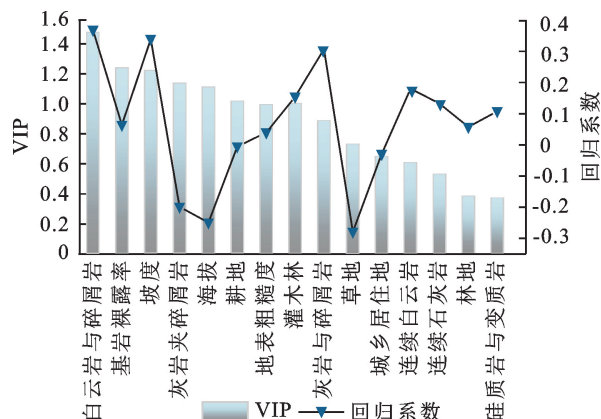


图 5 PLSR 模型中环境因子的 VIP 值与回归系数

Fig. 5 VIP values and regression coefficients of environmental factors in the PLSR model

3 讨论

3.1 径流侵蚀力的时空变化

由图 3 可知,2005—2020 年流域径流侵蚀力变化具有较强的空间异质性。2005 年流域径流侵蚀力呈四周分散式,高值主要出现在中上游,呈现中部和北部高、南部低的空间格局,而 2006 年以后,径流侵蚀力高值区逐步向中部和南部零星转移。首先,降雨是坡面径流的直接来源,其时空分布格局直接影响径流侵蚀力的时空分异。由图 6 可知,降雨空间分布格局较好地契合了径流侵蚀力的分布特征,2005 年高值主要在中北部,2006 年后高值主要在中南部区域。径流侵蚀力高值区石漠化较为严重,植被覆盖较差,不能较好地拦截降雨径流,从而造成径流侵蚀力高值区的聚集。其次,径流侵蚀力的空间分布格局还与流域水土流失治理的重点也有一定关系。2005 年以前,流域水土流失治理重点区域主要在南部,而北部治理在一定程度上被忽视,进而导致北部的径流侵蚀较强^[24],此后流域径流侵蚀力空间格局逐渐发生改变,已有研究^[25-26]发现,2011 年贵州省的经济密度西北部高于东南部,以贵阳市为中心辐射外围。主要是随着城镇化的发展,人口逐步向中、南部转移,密集的社会经济加剧了区域土壤侵蚀,而流域北部由于石漠化治理等生态工程的陆续实施,生态环境逐渐好转,从而降低径流侵蚀风险。

时间上,2005—2020 年,流域降雨虽呈现增加的趋势(图 6),但径流侵蚀力高值区总体上呈减少趋势,这表明野纪河流域侵蚀风险呈下降趋势,这主要归因于生态治理工程的实施。

2000 年以来,尤其是“十一五”(2011 年)以来,西南喀斯特地区石漠化问题逐步引起广泛关注,国家为此投入了大量的人力、物力和财力,启动了诸如国家岩溶地区坡耕地水土流失综合治理专项、石漠化综合

治理专项、退耕还林等生态修复工程。这些生态工程的有效实施使石漠化扩展趋势得以遏制^[24],流域生

态条件发生了显著的改善,从而影响了研究区径流侵蚀力的时间演变。

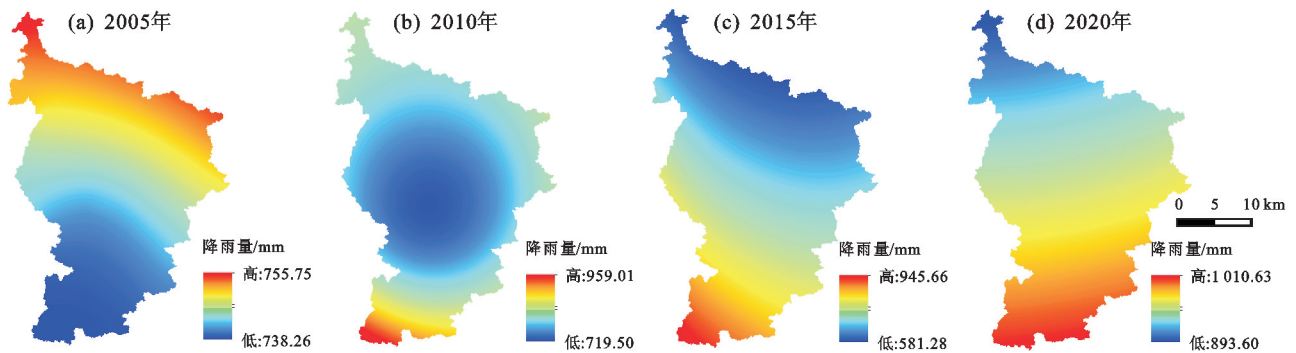


图 6 研究区 2005—2020 年降雨时空分布

Fig. 6 Spatial and temporal distribution of rainfall in the study area from 2005 to 2020

3.2 喀斯特特征因子对径流侵蚀力空间分异的影响机制

本文运用 PLSR 模型研究不同喀斯特特征因子对流域径流侵蚀力的影响。结果显示,白云岩与碎屑岩、基岩裸露率、坡度及灰岩夹碎屑岩是野纪河流域径流侵蚀力主导喀斯特特征因子,对径流侵蚀力的共同影响达 57.7%。

岩石是形成土壤的物质基础,而土壤是植物生长发育的基础。土壤中氮(N)、磷(P)、钾(K)等为植物生长提供营养^[27],但土壤养分与岩石类型、构造、风化程度等密切相关,因此岩石通过影响土壤养分来影响植物的生长和分布。反过来,植物通过产生有机酸和腐殖质来影响凋落物、微生物等来调解土壤养分的固定和矿化^[28-29],促进岩石的形成和分解。岩性差异影响区域水土资源和植被变化,也影响水流对地表材料的冲刷和侵蚀能力,因此岩性是影响喀斯特生态环境差异的一个重要基础条件。

喀斯特山区广泛发育多孔岩石基质、裂隙(缝)、孔道影响地表水渗漏率和地表径流,但不同岩性抗侵蚀性能不同。白云岩的风化过程以物理崩解为主^[30],有利于化学风化;白云岩孔隙均匀,有利于整体溶蚀。石灰岩在受力时节理裂隙分布不均,易形成岩石裂缝和洞穴,表现为差异性溶蚀^[31]。岩性差异导致二者溶蚀残余物具有不同堆积和丢失方式。石灰岩区土粒易聚集在岩体裂隙和地下孔隙中,而白云岩溶蚀残余物质均匀分布地表。有研究^[19]表明,白云岩和径流侵蚀力显著相关。一般来说,白云岩边坡土壤较薄,岩石占比大且高度风化。因此,白云岩边坡土壤覆盖薄且持水能力差。HUANG 等^[32]研究发现,石灰岩上植被明显优于白云岩。石灰岩裂隙多,水分通过蒸腾作用和植被生长影响植被水分消耗。在区域土壤侵蚀防治中,可根据不同岩性分布制定相应的水土保持对策,坚持科学的水土流失和水土保持监测机制,进一步促进喀斯特地区资源合理利用和可

持续发展。

基岩裸露率显著影响径流侵蚀力,两者呈显著正相关,即径流侵蚀力随着基岩裸露率的增加而增加。基岩裸露是石漠化的一个基本特征,可以反映喀斯特地区岩石荒漠化的发展程度^[33]。而基岩裸露率的增加意味着地表土层变薄,植被盖度下降,降低降雨的拦截能力,增加坡面流流量,进而增强径流侵蚀力。控制基岩裸露率对于治理石漠化具有重要意义。在喀斯特区石漠化治理中,应加大封山育林、退耕还林还草等措施力度,控制径流的潜在侵蚀能力,从而遏制石漠化的进一步发展。

坡度是影响径流侵蚀力的重要地形因子。本研究表明,坡度与径流侵蚀力呈显著正相关。这与前人^[33]研究结果一致,即相同降雨条件下,坡度越大,产流量越大,径流侵蚀力越强,土壤侵蚀风险增加。坡度对地表径流的形成和发展具有重要影响。坡度越小,入渗率可能越大,则坡面流速越低,导致坡面流减少,坡度越大则呈相反趋势。同时,坡度增加会加大坡面径流重力在顺坡方向的分力,使坡面流流速提升,进而增大坡面径流的剪切力,增强径流的挟沙能力^[34],从而加大径流侵蚀力。此外,坡度增加使入渗减少,影响植被生长发育,削弱降雨过程中植被的截流和蒸腾等作用,导致径流量增加和产流时间提前^[35],使径流侵蚀力的加大。在喀斯特区水土流失治理中,应适当采取改变微地形的工程措施,如坡改梯等,降低斜坡坡度,从而降低侵蚀潜力。

3.3 不足及展望

本文利用 SWAT 模型模拟野纪河流域径流侵蚀力的变化。结果表明,野纪河流域 SWAT 模型率定期和验证期 R^2 分别达 0.70 和 0.73, NSE 分别为 0.64 和 0.53,符合模型评价标准,即模型在野纪河流域基本适用。但与我国黄土高原等非喀斯特区相比,验证结果相对偏低,如地处黄土高原的关川河流域率定期

和验证期 R^2 分别为 0.85 和 0.78, NSE 分别为 0.86 和 0.84^[36]。产生这一差异, 可能有以下原因:

第 1, 与喀斯特地区地表/地下“二元”水文结构有关。喀斯特地区存在诸多地下通道, 如岩溶孔隙、裂隙、溶洞等, 流域径流一部分存储地下通道; 另一部分可能通过地下河的形式汇入外流域, 从而造成一定误差。

第 2, 与喀斯特地区岩石出露有关。目前 SWAT 模型模块中裸土地和裸岩石质地均归为裸地这一类型, 采用的计算公式相同, 忽略了石漠化对坡面径流的影响, 导致模拟结果存在一定误差。

第 3, 由于喀斯特地区大量裂(孔)隙、落水洞等岩溶通道的存在, 降水在渗漏过程中具有直接快速的特点, SWAT 模型未考虑这一特性, 在模拟中使用与均质土壤相同的地下水渗透延迟速度, 忽略快速通道和均质土壤渗透的延迟比差异, 导致模拟结果存在误差。

总体来说, 从率定和验证结果来看, SWAT 模型基本适用喀斯特流域, 但基于前述原因, 未来需依据喀斯特“二元”水文特征, 加大试验力度, 为改进 SWAT 等模型在喀斯特地区的应用提供参考。此外, 由于数据可获得性和有效性, 本研究喀斯特特征因子并不全面, 在未来的研究中, 深入野外调查, 进一步考虑更多的喀斯特特征因子, 更全面地解耦这些特征因子对流域径流侵蚀力的影响机制, 为喀斯特地区土壤侵蚀和石漠化防治提供更精准的指导。

4 结论

SWAT 模型基本适用于喀斯特地区水文过程的模拟。研究期间, 野纪河流域多年平均径流侵蚀力为 $2\,326.47\text{ [m}^4/(\text{km}^2 \cdot \text{s})]$ 。流域径流侵蚀力具有较强的空间异质性, 并随着时间呈波动变化。2005 年径流侵蚀力高值主要分布在流域北部和中部, 而此后则逐渐向中南部转移。2005—2020 年, 野纪河流域径流侵蚀总体上呈减少趋势; 基岩裸露率、岩性、坡度是影响野纪河流域径流侵蚀力空间格局的主导喀斯特特征因子, 共同解释了野纪河流域径流侵蚀力空间分异的 57.7%。

参考文献:

- [1] YUAN M T, ZHANG Y, ZHAO Y Y, et al. Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River Basin, China[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 739: e140066.
- [2] MONTANARELLA L. Agricultural policy: Govern our soils[J]. Nature, 2015, 528(7580): 32-33.
- [3] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [4] 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 W B, XIE Y, LIU B Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China[J]. Journal of Mountain Research, 2003, 21(1): 33-40.
- [5] 莫崇勋, 蓝华鲲, 杨莹, 等. 广西典型岩溶区流域降雨侵蚀力变化特征及影响因素研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(5): 1204-1213.
MO C X, LAN H K, YANG Y, et al. Study on the characteristics and influencing factors of rainfall erosivity in typical Karst areas of Guangxi[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(5): 1204-1213.
- [6] 司文洋. 祁连山地区降雨侵蚀力时空变化特征及情景预测研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
SI W Y. Spatial and temporal characteristics of rainfall erosion in Qilian Mountains and scenario prediction[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [7] WISCHMEIER W H, SMITH D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[Z]. U S Department of Agriculture Handbook, 1978: 285-291.
- [8] 吕明权, 吴胜军, 温兆飞, 等. 基于 SCS-CN 与 MUSLE 模型的三峡库区小流域侵蚀产沙模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 860-867.
LÜ M Q, WU S J, WEN Z F, et al. Modelling soil erosion and sediment yield in a small watershed of Three Gorges Reservoir area based on SCS-CN and MUSLE model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 860-867.
- [9] 王盛萍, 张志强, 唐寅, 等. MIKE-SHE 与 MUSLE 耦合模拟小流域侵蚀产沙空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 92-98, 386.
WANG S P, ZHANG Z Q, TANG Y, et al. Evaluation of spatial distribution of soil erosion and sediment yield for a small watershed of the Loess Plateau by coupling MIKE-SHE with MUSLE [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 92-98, 386.
- [10] FANG N F, SHI Z H, CHEN F X, et al. Partial least squares regression for determining the control factors for runoff and suspended sediment yield during rainfall events[J]. Water, 2015, 7(12): 3925-3942.
- [11] 张志敏, 杜景龙, 陈德超, 等. 典型网状河网区域土地利用和景观格局对地表季节水质的影响: 以江苏省溧阳市为例[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1524-1540.
ZHANG Z M, DU J L, CHEN D C, et al. Effects of land use and landscape pattern characteristics on seasonal surface water quality in a typical reticulated river network area: A case study of Liyang City, Jiangsu Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1524-1540.
- [12] 王民, 崔灵周, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下径流侵蚀力

- 与地貌特征的动态响应关系[J].水利学报,2008,39(9):1105-1110.
- WANG M, CUI L Z, LI Z B, et al. Dynamic response relationship between runoff erosivity and topographic feature under the condition of artificial simulated rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9):1105-1110.
- [13] 冷佩,宋小宁,李新辉.坡度的尺度效应及其对径流模拟的影响研究[J].地理与地理信息科学,2010,26(6):60-62,74.
- LENG P, SONG X N, LI X H. Study on slope' scale effect and its impact on runoff simulation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(6):60-62, 74.
- [14] 王英,龚家国,贾仰文,等.基于不同分辨率 DEM 提取坡度值的转换关系研究[J].水利水电技术,2019,50(8):45-51.
- WANG Y, GONG J G, JIA Y W, et al. Study on conversion relationship of slope information extracted from different resolution DEM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8):45-51.
- [15] 冯畅.变化环境下涟水流域蓝水绿水资源的响应特征分析[D].长沙:湖南师范大学,2018.
- FENG C. Impacts of changing environment on blue and green water resources and their response characteristics in the Lianshui river basin[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2018.
- [16] 田扬,肖桂荣.基于 CMADS 驱动下 SWAT 模型的敖江流域径流模拟[J].长江科学院院报,2020,37(11):27-32.
- TIAN Y, XIAO G R. Runoff simulation for aojiang river basin using SWAT model driven by China meteorological assimilation driving datasets[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11):27-32.
- [17] United States Department of Agriculture. Soil conservation service: National engineering landlook [M]. Cross section 4. Washington: Govt. Print. Off. 1972.
- [18] 王瑞滢,张大帅,周末,等.基于 HEC-HMS 模型的西南山区中小河流模拟产沙研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(5):119-127.
- WANG R Y, ZHANG D S, ZHOU M, et al. HEC-HMS model-based study on simulated sediment yield of medium and small rivers in mountainous regions of southwest China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(5):119-127.
- [19] PAN L D, LI R, SHU D C, et al. Effects of rainfall and rocky desertification on soil erosion in Karst area of Southwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(11):3118-3130.
- [20] ZHANG H Y, SHI Z H, FANG N F, et al. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China[J]. Geomorphology, 2015, 234:19-27.
- [21] FARRÉS M, PLATIKANOV S, TSAKOVSKI S, et al. Comparison of the variable importance in projection (VIP) and of the selectivity ratio (SR) methods for variable selection and interpretation[J]. Journal of Chemometrics, 2015, 29(10):528-536.
- [22] SHI P, LI Z B, LI P, et al. Trade-offs among ecosystem services after vegetation restoration in China's Loess Plateau[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(3):2703-2713.
- [23] WANG J S. Determining the most accurate program for the Mann-Kendall method in detecting climate mutation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 142(3):847-854.
- [24] 文林琴,栗忠飞.2004—2016 年贵州省石漠化状况及动态演变特征[J].生态学报,2020,40(17):5928-5939.
- WEN L Q, LI Z F. Evolution characteristics of rocky desertification during 2004—2016 in Guizhou Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17):5928-5939.
- [25] 左太安,刁承泰,苏维词,等.毕节试验区石漠化时空演变过程和演变特征[J].生态学报,2014,34(23):7067-7077.
- ZUO T A, DIAO C T, SU W C, et al. Spatial-temporal evolution process and its evaluation characteristic of rocky desertification in Bijie experimental area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23):7067-7077.
- [26] 龙剑,朱海宁,曹邦宇.基于标准差椭圆模型的贵州省经济密度空间差异分析[J].当代经济,2014(13):114-117.
- LONG J, ZHU H N, CAO B Y. Spatial difference analysis of economic density in Guizhou Province based on elliptic model of standard deviation [J]. Contemporary Economics, 2014(13):114-117.
- [27] 舒媛媛,黄俊胜,赵高卷,等.青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J].生态学报,2016,36(2):394-402.
- SHU Y Y, HUANG J S, ZHAO G J, et al. Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2):394-402.
- [28] 田大伦,项文化,闫文德.马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征[J].生态学报,2004,24(10):2207-2210.
- TIAN D L, XIANG W H, YAN W D. Comparison of biomass dynamic and nutrient cycling between *Pinus massoniana* plantation and *Pinus elliottii* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10):2207-2210.

(下转第 78 页)

- 态环境效应研究[J].湖南农业科学,2021(8):91-94.
- YAO L L, MA J, LI Y J, et al. Study on Beijing land utilization change and its ecological environmental effect[J].Hunan Agricultural Sciences,2021(8):91-94.
- [28] 胡莹洁,孔祥斌,张宝东.30年来北京市土地利用时空变化特征[J].中国农业大学学报,2018,23(11):1-14.
- HU Y J, KONG X B, ZHANG B D. Spatiotemporal features of land use change in Beijing in the past 30 years[J]. Journal of China Agricultural University, 2018,23(11):1-14.
- [29] 郭全.面向多目标的妫水河流域土地配置优化研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- GUO T. Study on optimization of land allocation in the Guishui river basin for multi-objectives [D]. Beijing: Beijing Forestry University,2019.
- [30] 张晓光,张险峰,杨丹丹.面向生态文明发展要求的国土空间规划探索:以延庆分区规划(国土空间规划)为例[J].城市发展研究,2021,28(7):27-33.
- ZHANG X G, ZHANG X F, YANG D D. The exploration of national land space planning catering to the development requirement of ecological civilization: A case study of Yanqing zoning plan (national land space planning) [J]. Urban Development Studies, 2021, 28 (7):27-33.
- [31] 施卫良,杨浚.北京分区规划之实践与探索[J].北京规划建设,2019(4):4-9.
- SHI W L, YANG J. Practice and exploration of Beijing zoning planning[J].Beijing Planning Review,2019(4):4-9.
- [32] 金凤梅.黄土高原土壤侵蚀时空变异与归因[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- JIN F M. Spitaltemporal variability and attribution of soil erosion on the Loess Plateau [D]. Shaanxi Yangling: Northwest A&F University,2021.
- [33] 律可心,王子晔,姜群鸥,等.妫水河流域植被覆盖变化对土壤侵蚀控制效率的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):69-77.
- LÜ K X, WANG Z Y, JIANG Q O, et al. Effect of vegetation coverage change on soil erosion control efficiency in Guishui River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(4):69-77.
- (上接第 69 页)
- [29] LEJON D P H, CHAUSSOD R, RANGER J, et al. Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest soil (morvan, France)[J].Microbial Ecology,2005,50(4):614-625.
- [30] TAKOUTSING B, WEBER J C, TCHOUNDJEU Z, et al. Soil chemical properties dynamics as affected by land use change in the humid forest zone of Cameroon [J].Agroforestry Systems,2016,90(6):1089-1102.
- [31] 聂跃平.碳酸盐岩性因素控制下喀斯特发育特征:以黔中南为例[J].中国岩溶,1994,13(1):31-36.
- NIE Y P. Karst development characteristics under the lithologic control of carbonate rocks: A case study in south-central Guizhou[J].Carsologica Sinica, 1994, 13 (1):31-36.
- [32] HUANG J, WU P T, ZHAO X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments [J]. Catena,2013,104:93-102.
- [33] DAI Q H, PENG X D, WANG P J, et al. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in Karst regions of southwest China[J].Land Degradation and Development, 2018,29(8):2438-2448.
- [34] 李凤英,何小武,周春火.坡度影响土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2008,15(6):229-231.
- LI F Y, HE X W, ZHOU C H. Advances in researches on slope gradient factor in soil erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(6):229-231.
- [35] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
- WANG D D, WANG Z L, ZHANG Q W, et al. Experiment on influence of cover degree, slope and rainfall intensity on sediment concentration of slope runoff in rangeland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (15): 119-125.
- [36] 赵传普,徐学选,陈天林,等.关川河流域土地利用变化对径流的影响[J].水土保持研究,2015,22(3):83-87.
- ZHAO C P, XU X X, CHEN T L, et al. Impact of land use changes on the streamflow in guanchuanhe watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22 (3):83-87.