

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.029

唐霜,朱崇京,高洁,等.复杂地形下西南地区水生态系统服务时空变化与影响因素分析[J].水土保持学报,2024,38(6):244-252.

TANG Shuang, ZHU Chongjing, GAO Jie, et al. Spatial-temporal variations and influencing factors of water-related ecosystem services in Southwest China under complex terrain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 244-252.

复杂地形下西南地区水生态系统服务时空变化与影响因素分析

唐霜,朱崇京,高洁,卞鸿雁

(西南大学地理科学学院,重庆 400715)

摘要: [目的] 西南地区水生态系统服务时空变化及其在不同地貌和地形下的影响因素研究能为该区域生态管理和可持续发展提供依据。[方法] 采用 InVEST 模型和通用土壤流失方程评估 1992—2020 年逐年产水量和土壤侵蚀量,探讨产水量和土壤侵蚀量的多维变化特征(时间、空间、高程),通过相对重要性分析方法量化分析气候变化和土地利用变化对水生态系统服务相对贡献率。[结果] (1) 1992—2020 年,西南地区产水量呈下降趋势,2002 年为产水量变化的突变年,土壤侵蚀量呈上升趋势,1997 年为土壤侵蚀量变化的突变年。(2) 产水量随海拔的上升而下降,土壤侵蚀量随海拔的上升而上升。(3) 在喀斯特地区,降水对产水量和土壤侵蚀量的相对贡献率大于非喀斯特地区。[结论] 气候变化对产水量和土壤侵蚀量的影响比较明显,土地利用变化对其影响较小。研究结果可为复杂地形地区(不同海拔,不同地貌)制定生态保护方案和措施提供参考,也为喀斯特地区土地管理和生态恢复措施提供科学依据。

关键词: 水生态系统服务; 气候变化; 土地利用变化; 相对重要性分析; 西南地区

中图分类号: Q147

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0244-09

Spatial-Temporal Variations and Influencing Factors of Water-related Ecosystem Services in Southwest China Under Complex Terrain

TANG Shuang, ZHU Chongjing, GAO Jie, BIAN Hongyan

(School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The study of spatial-temporal variations and influencing factors of water-related ecosystem services under complex terrain in Southwest China can serve as a foundation for the ecological management and sustainable development in this region. [Methods] The annual water yield and soil erosion in Southwest China from 1992 to 2020 were evaluated to explore the multi-dimensional (including time, space and elevation) variation characteristics by the InVEST model and universal soil loss equation. In addition, the relative weight analysis method was used to quantify the relative contribution rate of climate and land use change to water-related ecosystem services. [Results] (1) From 1992 to 2020, water yield in Southwest China showed a downward trend, with a notable mutation occurring in 2002; soil erosion showed an increasing trend, with a mutation observed in 1997. (2) The water yield decreased and soil erosion increased with rising altitude. (3) The relative contribution rate of precipitation to both water yield and soil erosion in karst areas was found to be greater than that in non-karst areas. [Conclusion] Climate change has a more significant impact on water yield and soil erosion, while land use change has a less obvious impact. This study will contribute to the ecological protection in complex terrain (with different elevations and different landforms) and provide a scientific basis for land management and ecological restoration measures in karst areas.

Keywords: water-related ecosystem service; climate change; land use change; relative weight analysis; Southwest China

Received: 2024-07-05

Revised: 2024-08-30

Accepted: 2024-09-06

Online(www.cnki.net): 2024-12-11

收稿日期: 2024-07-05

修回日期: 2024-08-30

录用日期: 2024-09-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(42101296, 41701611); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX00410)

第一作者: 唐霜(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事水生态系统服务研究。E-mail: ts54321@email.swu.edu.cn

通信作者: 高洁(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事水生态系统服务研究。E-mail: gaojieswu@swu.edu.cn

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

水生态系统服务(water-related ecosystem services)是指与维持水循环和水文过程直接相关的服务,包括产水服务、土壤保持、洪水调节、水质净化等^[1-3],对人类生存和福祉具有重要意义。气候变化和人类活动影响水生态系统服务,导致水资源短缺和污染,阻碍区域的生态和经济可持续发展^[4]。因此,随着当前极端气候事件频繁发生和城市化进程的加快,如何维持和改善水生态系统服务十分重要,尤其对地形地貌复杂的生态脆弱区,研究在不同地形、地貌条件下水生态服务变化及其影响因素对区域生态保护和可持续发展意义深远。

水生态系统供给及其相互关系是进行水生态系统服务研究的基础。供给量的评估主要采用模型方法,目前被广泛用于水生态系统服务评估的生物物理模型是InVEST模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)^[4],分布式流域水文模型(soil and water assessment tool,SWAT)也常被用作评价水生态系统服务供给量^[5]。在研究范围上,由于水生态系统服务与水文过程密切相关,服务的产生、传递都有着典型的流域特征,因此,选择流域为边界较多,例如,黄河流域^[2]、重庆龙溪河流域^[3]等。水生态系统服务被人类所消耗,与区域的社会经济密切相关,在研究过程中也选择以区域为边界进行研究,如广东省^[6]、宜兴市^[7]等行政区域,以及东北地区等地理单元^[8]。水生态系统服务的供给对生态脆弱区尤其重要,生态脆弱区也是目前研究的热点区,如黄土高原^[9]、青藏高原地区^[10]、西南喀斯特地区^[11]、西北沙漠绿洲^[12]等。

水生态系统服务对气候和人类活动敏感,在全球气候变化及强烈的人类活动背景下,围绕水生态系统服务影响因素的研究是目前研究的热点。人类活动导致的土地景观格局变化影响生态系统中水循环的一些重要环节,如蒸发、下渗和截留等过程,因此直接影响水生态系统服务的供给,例如,造林等生态工程的实施可提升土壤保持服务^[13],农田弃耕后水质净化服务得到改善^[14],城市化使得洪水调节服务降低^[15]。气候变化是影响水生态系统服务的另一个重要因素^[11],气候条件影响生态系统的组成、结构和过程,近年来,主要采用降水和温度等来代表气候因素^[16],研究气候对水生态系统服务的影响,例如,对贵州省的研究^[11]表明土壤侵蚀主要受气候变化影响。

对生态脆弱区进行水生态系统服务评估及其影响因素的研究是对该区域进行生态保护和管理的的基础,现有关于水生态系统服务的评价及其影响因素研究主要选择特定的年份开展,长时间连续序列的研究较少,容易丢失重要年份的数据和趋势。同时关于影

响因素的研究主要通过相关性分析、地理探测器、地理加权回归等传统方法定量识别区域产水和土壤保持服务的主导因子^[17],具体贡献量的研究较少。在地形地貌复杂地区,对水生态系统服务的研究较少区分在不同地形地貌下的时空变化及影响因素。本文以西南地区为研究对象,该区是我国重要的生态屏障区和水源涵养区,同时西南地区地形复杂,是最典型的喀斯特地貌分布区之一,人类活动与自然环境冲突尖锐,不仅水土流失面积大,侵蚀程度也非常深,是我国生态环境敏感和脆弱的区域^[18]。探讨该区域水生态系统服务时空变化特征及其在复杂地形、地貌条件下的影响因素,能够为该区域生态管理和制定生态保护政策提供依据。基于此,本研究评估西南地区1992—2020年逐年水生态系统服务(产水服务、土壤保持)并探讨其时空变化特征,并在不同地貌及不同海拔梯度下分析影响水生态系统服务的主导因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择西南地区(21°08′24″—35°18′36″N, 97°20′24″—110°11′24″E)的四川省、云南省、贵州省和重庆市,面积约113.87万km²,约占中国国土面积14.3%。该地区横跨我国一二级阶梯,海拔跨度大,地势西高东低,海拔为46~6448m(图1a)。地形地貌类型多样,主要由山地和丘陵构成,喀斯特地貌面积为34万km²,约占4省总面积的29.9%(图1b)。西南地区是全球最大范围的喀斯特连续出露地区,也是我国的四大生态环境脆弱区之一。西南地区以亚热带季风气候为主,夏季高温多雨,冬季干旱少雨,降水主要集中在5—10月。

1.2 数据来源及处理

本研究所采用的数据主要包括土地利用数据、气象观测数据、DEM(digital elevation model)数据和土壤数据等,研究时段为1992—2020年。运行InVEST模型计算产水量和使用通用土壤流失方程(universal soil loss equation,USLE)方程计算土壤侵蚀量,主要数据来源见表1。

1.3 水生态系统服务评估

1.3.1 产水服务 本研究使用InVEST 3.9.0版本中的“Water Yield”子模块计算产水量,计算公式^[17]为:

$$Y_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为土地利用变化 j 上栅格单元 x 的年平均产水量(mm); AET_{xj} 为土地利用变化 j 上栅格单元 x 的年平均实际蒸散量(mm); P_x 为栅格单元 x 的年降水量(mm)。

1.3.2 土壤保持服务 本研究使用USLE方程对西

南地区土壤侵蚀量进行估算,通过土壤侵蚀量表征西南地区的土壤保持服务,一般来说,土壤侵蚀量越小,土壤保持功能越好。

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

式中: A 为单位时间单位面积上平均土壤流失量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)$]; LS 为地形因子; C 为作物覆盖与管理因子; P 为土壤保持措施因子。 LS 因子、 C 因子、 P 因子为无量纲因子。 C 因子和 P 因子都属于土壤侵蚀的抑制因子,参考相关研究^[19]成果,将不同土地利用与覆被类型赋予相应的 C 、 P 值。

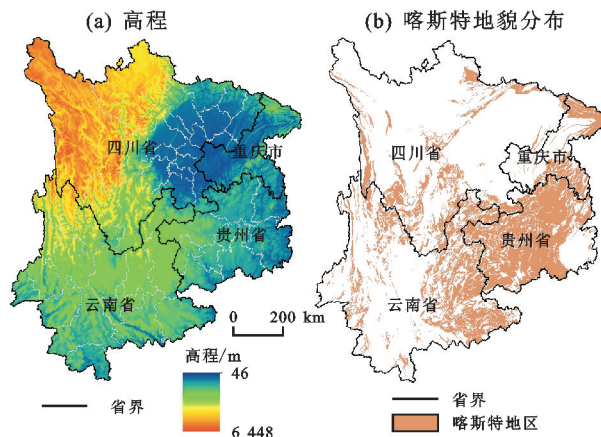


图 1 西南地区概况

Fig.1 An overview map of Southwest China

表 1 主要数据来源

Table 1 Primary data sources

所需数据	数据来源	网址	分辨率/m
气象数据	中国气象数据网	http://data.cma.cn	站点数据
土壤数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	https://www.resdc.cn/	300
土地利用	欧洲航天局	https://www.esa-landcover-cci.org	300
DEM 数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	https://www.resdc.cn/	90

1.4 趋势与突变点检验

1.4.1 M-K 趋势检验 Mann-Kendall(M-K)趋势检验法是一种非参数统计检验方法,与参数统计检验法相比,该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,而且计算也比较简单,是目前比较常用的趋势诊断方法。M-K 检验用于检验水生态系统服务在时间序列是否存在趋势,计算 M-K 检验的正态统计变量 Z ,将 Z 值在 0.1 置信水平上划分为显著变化($Z > 1.64$ 或 $Z < -1.64$)和不显著变化($-1.64 \leq Z \leq 1.64$), Z 值的正负说明时间序列的上升和下降趋势。统计量计算公式见文献[20]。

1.4.2 突变点检验 突变检验结果采用 Pettitt 和 M-K 突变检验 2 个方法结合得出。Pettitt 检验的优点不需要时间序列服从特定的分布,不易受异常值的影响,该检验将一系列随机变量分为 2 组样本,计算统计量 U_t, T, U_τ, T 为最可能突变点 τ 处的 Pettitt 检验统计量, τ 为突变时间点。M-K 突变检验是一种非参数检验方法,通过将时间序列构造造成不同样本,计算统计量 UF_k 和 UB_k, UF_k 和 UB_k 曲线出现在临界线之间的交点便是时间序列突变点。统计量计算公式见文献[20]。

1.5 影响因素确定与评估

气候和土地利用是影响水生态系统服务的主导因素,基于前人^[11-16]研究结果,本文选择气温、降水、蒸发代表气候因素。耕地、林地、草地、水体、建设用、裸地和归一化植被指数代表土地利用因素。本文

首先通过斯皮尔曼相关性分析和逐步回归分析排除共线性的自变量,筛选出对产水量和土壤侵蚀量解释力较强的自变量。其次使用相对重要性分析(relative weight analysis, RWA)方法计算区域产水量和土壤侵蚀量各影响因子的相对贡献率,能区分气候和土地因素对水生态系统服务的影响程度, RWA 方法是多元回归分析的一种替代方法,解决了影响因子多重共线性的问题,同时可以计算出各预测变量对结果变量的相对贡献率^[21]。RWA 方法将回归模型中预测的总方差分解为各预测变量对结果变量的相对影响权重,通过将原自变量矩阵转化为不相关的正交矩阵,得到最优拟合的正交变量集,建立新的正交变量集对结果变量的回归方程。每个新变量回归的平方系数代表各正交变量对总方差的贡献,用线性矩阵运算将正交变量的贡献变换为原始预测变量对结果变量的相对贡献。

2 结果与分析

2.1 西南地区水生态系统服务变化

2.1.1 产水量时空变化 西南地区多年平均产水量为 4 741.18 亿 m^3 , 2016 年产水量最大值, 2011 年最小。1992—2020 年西南地区产水量供给波动明显,整体呈下降趋势(图 2)。通过 Pettitt 和 M-K 突变点交叉检验分析发现,2002 年为产水量变化的突变年,变化趋势有明显差异。西南地区的产水量服务时空差异性较大。1992 年产水量较低的地区主要分布在云南省中部和四川省西部,高值主要分布在四川省东

部和贵州省西部。2020 年低值主要分布在云南省中部、四川省南部及重庆市东北部,高值主要分布在四川省东部和云南省西南部。M-K 趋势检验结果表明,西南地区产水量整体呈下降趋势,下降区域占总面积的 61.80%,显著下降区域占 14.25%,主要位于云南省西北部 and 东南部及贵州省中部;西南地区北部呈上升趋势,上升区域占 38.20%,显著上升区域占 2.95%,主要位于四川省西北部(图 3)。

2.1.2 土壤保持时空变化 根据 1992—2020 年西南地区水生态系统服务结果(图 2),西南地区多年平均土壤侵蚀量为 7.89 亿 t,1998 年土壤侵蚀量最大,2011 年最小。1992—2020 年西南地区土壤侵蚀量呈上升趋势(图 2),土壤保持服务功能有所下降。Pettitt 和 M-K 突变点交叉检验结果表明,1997 年为土壤侵蚀量变化的突变年,1997 年以前的土壤侵蚀量呈上升趋势,1997 年以后呈下降趋势。西南地区土壤保持服务空间差异明显(图 4),高值区分布较为分散,低值区主要分布在四川省和云南省东部。M-K

趋势检验结果表明,西南地区土壤侵蚀量下降区域面积多于上升区域面积,南部呈下降趋势,下降区域占总面积的 53.90%,显著下降区域占 8.42%,主要位于云南省西北部、贵州省北部;北部呈上升趋势,上升区域占 46.10%,显著上升区域占 6.18%,主要位于四川省北部。

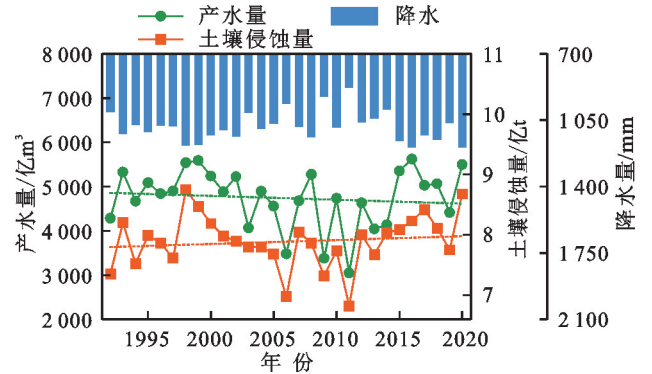


图 2 1992—2020 年西南地区水生态系统服务变化
Fig.2 Changes in water-related ecosystem services in Southwest China from 1992 to 2020

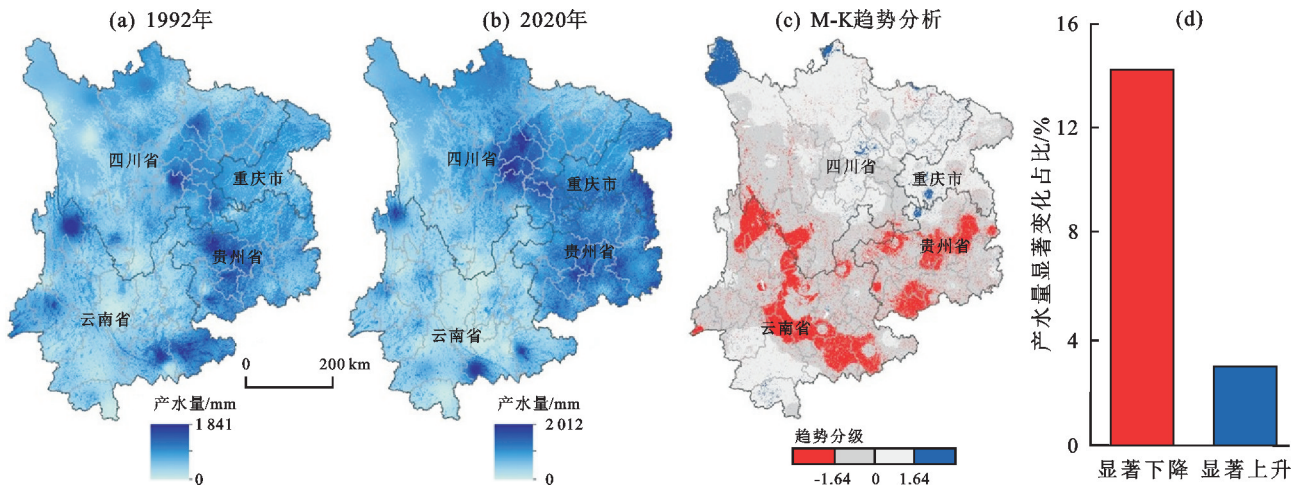


图 3 西南地区产水量空间变化

Fig.3 Spatial changes of water yield in Southwest China

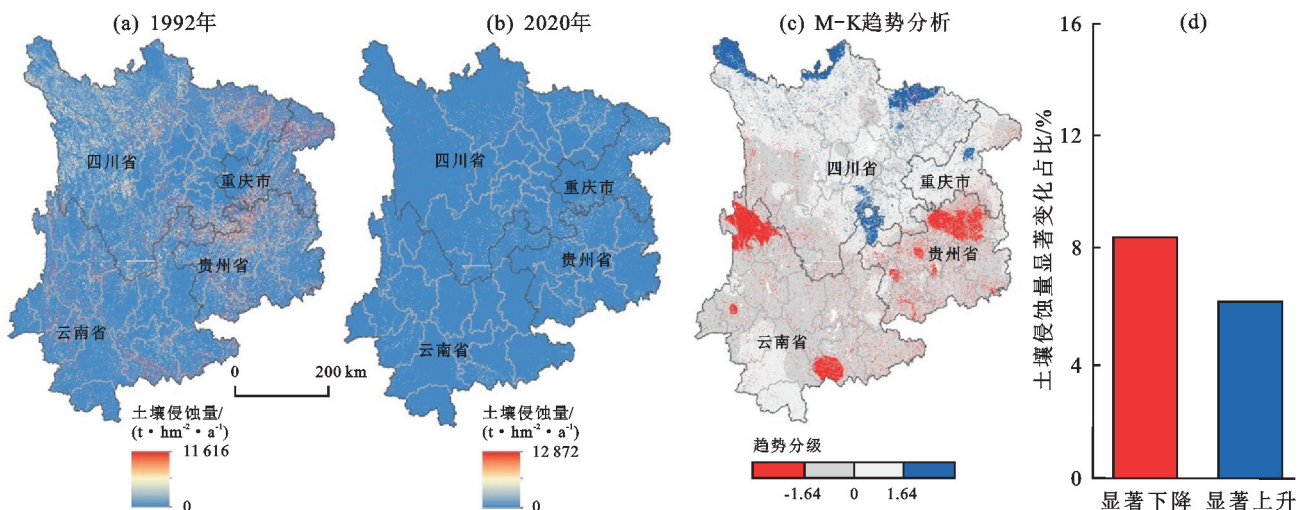


图 4 西南地区土壤侵蚀量空间变化

Fig.4 Spatial changes of soil erosion in Southwest China

2.1.3 不同海拔地区水生态系统服务变化 通过对不同海拔地区水生态系统服务进行统计(图 5),结果表明,在 0~1 000 m 海拔地区,平均产水量最大且呈上升趋势,1 000~2 000 m 海拔地区产水量变小并呈下降趋势,2 000 m 以上的海拔地区产水量最小并呈

下降趋势,即产水量随海拔的升高而减小,海拔越高的地区,产水量越小;在 0~1 000 m 海拔地区和 1 000~2 000 m 海拔地区的平均土壤侵蚀量在整体上均小于 2 000 m 以上海拔地区的土壤侵蚀量,即海拔越高的地区,土壤侵蚀量越大,土壤保持功能越差。

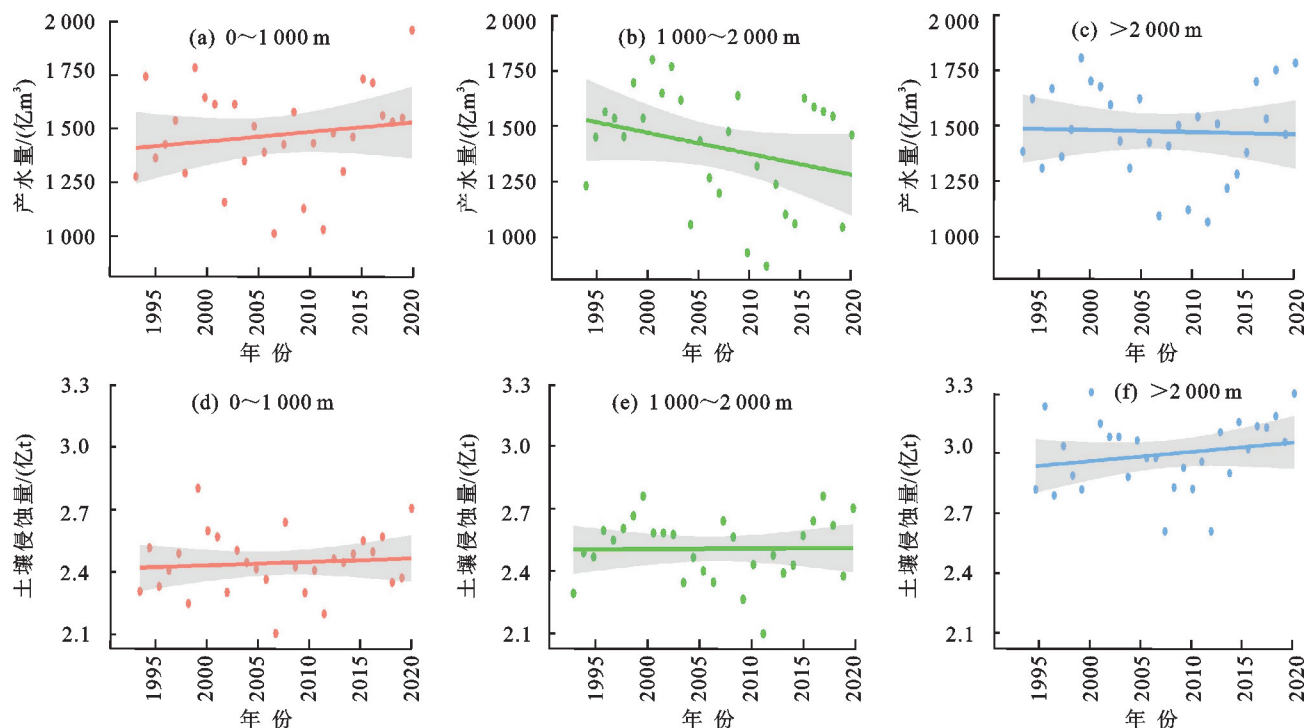


图 5 不同海拔地区水生态系统服务变化

Fig.5 Changes in water-related ecosystem services at different altitudes

2.2 水生态系统服务影响因素分析

考虑到西南地区复杂的地形地貌特征,从地貌上对整个西南地区、西南喀斯特地区和西南非喀斯特地区的水生态系统服务分别进行影响因素分析,从海拔梯度上将西南地区的各地级市通过其平均海拔划分为海拔 0~1 000,1 000~2 000,>2 000 m 地区,并进行水生态系统服务影响因素分析。

2.2.1 不同地貌地区水生态系统服务影响因素 总体上,气候变化是影响西南地区水生态系统服务波动的主要因素,土地利用变化影响较小(表 2)。在整个西南地区,产水服务的各影响因素的相对贡献率表现为降水>耕地>草地>蒸发>林地,降水占 91.61%,其他因素的贡献率较小,土壤保持服务的各影响因素的相对贡献率表现为降水>裸地>气温>蒸发>建设用地,降水占 84.92%。

在西南喀斯特地区,产水服务的各影响因素的相对贡献率表现为降水>草地>蒸发>林地>水体,降水占 92.28%,土壤保持服务的各影响因素的相对贡献率表现为降水>建设用地>草地>林地>水体,降水占 92.51%;在非喀斯特地区,产水服务各影响因素

的相对贡献率为降水>水体>林地>蒸发>建设用地,降水占 85.57%,土壤保持服务的各影响因素的相对贡献率表现为降水>建设用地>草地>林地>水体,降水占 90.72%。

综上,气候变化对西南地区、喀斯特和非喀斯特地区的产水和土壤保持的相对贡献率较大,其中降水为主要因素,降水对喀斯特地区各服务的相对贡献率大于非喀斯特地区,土地利用变化的相对贡献率较小,在不同地貌地区,不同土地类型的贡献率不同。

2.2.2 不同海拔地区影响因素分析 在不同海拔地区,气候变化均是影响西南地区水生态系统服务的主要因素,土地利用变化影响较小(表 3)。在海拔 0~1 000,1 000~2 000,>2 000 m 时,降水对产水服务的相对贡献率均为最大,分别为 88.28%,88.68%,91.64%,降水的相对贡献率随海拔的增加而增加;降水对土壤保持服务的相对贡献率也为最大,分别为 84.26%,79.09%,81.18%,在海拔 0~1 000 m 处达到最大。蒸发为次一级影响因素,对产水的相对贡献率在 0~1 000 m 处达到最大,对土壤保持的贡献率随海拔的增加而减少,从 4.58%减少到 3.45%。土地

利用变化对产水服务的影响因素中,在各海拔地区影响最大的因素为耕地,其次为草地,林地的影响较小,而对土壤保持服务的影响因素中,仅有耕地和建设用地有所影响,且耕地的相对贡献率大于建设用地。

表2 不同地貌水生态系统服务影响因素相对贡献率

Table 2 Relative contribution rates of various influencing factors of water-related ecosystem services in different landforms

服务	地貌	气候相对贡献率/%			土地利用相对贡献率/%					
		降水	气温	蒸发	耕地	林地	草地	建设用地	水体	裸地
产水	西南地区	91.61		1.68	3.13	1.48	2.10			
	喀斯特地区	92.28		1.72		0.65	4.96		0.39	
	非喀斯特地区	85.57		1.86		1.70		0.25	10.62	
土壤保持	西南地区	84.92	3.68	2.05				2.01		7.34
	喀斯特地区	92.51				1.95	2.46	2.65	0.43	
	非喀斯特地区	90.72	3.74	2.91			0.93	1.70		

表3 不同海拔梯度水生态系统服务相对贡献率

Table 3 Relative contribution rates of water-related ecosystem services at different altitudes

服务	海拔/m	气候相对贡献率/%			土地利用相对贡献率/%			
		降水	气温	蒸发	耕地	林地	草地	建设用地
产水	>2 000	91.64		2.66	2.26	1.71	1.73	
	1 000~2 000	88.68		4.24	2.44	2.28	2.36	
	0~1 000	88.28		5.19	2.36	1.55	2.62	
土壤保持	>2 000	81.18	4.56	3.45	5.40			5.41
	1 000~2 000	79.09	2.57	4.01	7.96			6.37
	0~1 000	84.26	2.59	4.58	3.92			4.65

3 讨论

3.1 产水服务时空变化影响因素

产水服务受气候变化影响较大,特别是降水的影响,2009—2012年,西南地区遭遇严重的持续干旱事件,不仅干季出现极为严重的旱情,而且雨季期间的降水量也持续偏少,远低于气候平均水平,使2011年成为1992—2020年产水量最小的年份(图2)。2014—2016年赤道中东太平洋发生1次超强厄尔尼诺事件,2015年秋、冬季,我国长江以南大部分地区降水偏多,西南部分地区出现洪涝灾害。2016年西南地区整体降水偏多,年降水量为1 189 mm,是产水量最大的年份。

影响因素方面,在整个西南地区,气候变化对产水量的相对贡献更为显著,主要通过降水和蒸发等影响产水量(表2),与现有研究^[22]相似。在西南地区,是否为喀斯特地区 and 不同海拔地区对产水量的影响因素有所不同。喀斯特地区的产水量大于非喀斯特地区,且在喀斯特地区,降水的相对贡献大于非喀斯特地区,蒸发的相对贡献小于非喀斯特地区。中国西南喀斯特地区为典型的石漠化严重区域,岩石裸露率高,对水的截留能力弱,降雨过程中大量雨水直接通过孔隙裂隙流入地下,使该地区产水量较大。

土地利用变化对不同海拔地区的产水量具有一定影响。土地利用变化主要通过影响水循环中蒸发、

下渗和持水过程影响区域产水量^[23],各土地利用类型中,耕地和草地对产水服务变化的相对贡献较大(表3),主要是由于耕地和草地面积占比和变化较大,且根系较浅,持水能力较弱,因此对产水量的相对贡献率较大。本研究发现,林地也影响产水量的供给,段琪彩等^[24]在对2009—2012年云南持续干旱进行研究时发现,滇中城市群区域的水源涵养能力随林地面积的增大而增强。

本研究中产水服务以水量平衡为基础,由降水和实际水分蒸散量计算获得,因此受土地利用、气候变化等因素影响较大。本研究区一系列生态恢复措施的实施使得土地利用发生明显变化,20世纪末21世纪初,天然林保护工程和退耕还林(草)政策使西南地区林地面积迅速扩大。植树造林增大蒸散发,根系能截留降水,地表径流在经过林地时被大量拦截,因此造林地区产水量减少。本论文中产水服务并未区分地表和地下产水,研究区总体产水量减少,主要表现为地表径流量减少。总体上,西南地区产水量呈下降趋势,产水量显著下降地区主要位于云南省西北部和东南部及贵州省中部(图3),这些林地扩张区域产水量有所下降,揭示我国造林等生态恢复措施对水生态系统服务具有一定的影响。

3.2 土壤保持服务时空变化影响因素

土壤侵蚀受气候变化影响也较大,1998年的长

江流域特大洪水使该年成为西南地区土壤流失最严重的年份(图 2)。2011 年,西南地区发生极端干旱事件,降水较气候平均持续异常偏少,使 2011 年成为西南地区土壤侵蚀量最小的年份。土壤侵蚀量显著下降地区主要位于云南省西北部、贵州省北部(图 4),表明退耕还林工程的实施致使土壤侵蚀量减少^[25]。林地是西南地区主要的土地利用类型之一,林地通过根系和叶冠的截留作用,减少表土流失,土壤侵蚀量往往较小,在改善和调节生态质量上的作用显著。

本研究发现,土壤侵蚀量的平均值随海拔的升高而增大(图 5),年际变化较大,在海拔 $>2\ 000\text{ m}$ 时,不同地市土壤侵蚀量的差值最大。西南地区多山地丘陵,喀斯特地区岩溶发育成熟,海拔较高的地方地势陡峭,地形起伏度较大,雨水的冲刷导致土壤侵蚀量较大^[18]。海拔较低的地方地势较为平坦,土壤侵蚀量较小。

土壤侵蚀量受降水的影响大于土地利用的影响,在整个西南地区,降水的相对贡献率为 84.92%,而喀斯特地区降水的影响大于非喀斯特地区(表 2)。西南喀斯特地区具有独特的土石结构,土体直接在基岩上面,没有过渡结构,极易因为降水发生滑坡、崩塌等地质灾害,土壤流失问题严重^[18]。土壤侵蚀量主要受到降雨侵蚀力 R 因子的影响,而降雨侵蚀力又与降水强度有关。已有研究^[18]表明,降水是影响土壤侵蚀量的最主要因素,时间越集中,降水量越大,往往导致土壤侵蚀量越大,地表径流和地下径流产生的泥沙都随着降水强度的增大而增大。

在海拔 $0\sim 1\ 000, 1\ 000\sim 2\ 000\text{ m}$ 时,降水对土壤侵蚀量的相对贡献率变化较大(表 3)。海拔 $0\sim 1\ 000\text{ m}$ 的地市主要位于重庆、四川东部和贵州东部, $1\ 000\sim 2\ 000\text{ m}$ 的地市主要位于云南南部和贵州西部,该海拔地区的土壤侵蚀量相对较小。这是由于我国降水从东南向西北递减,降水量的减少使得土壤遭受侵蚀的程度减少。同时,云南省植被覆盖度较高,浓密的植被可以减少暴雨的势能,对暴雨的冲击形成缓冲,且森林中的枯枝落叶可以形成减少土壤侵蚀的天然屏障,具有良好的土壤保持能力^[18]。海拔上升到 $2\ 000\text{ m}$ 以上时,建设用地的相对贡献率变小,平均海拔 $2\ 000\text{ m}$ 以上的地市主要位于四川西部,四川西部地形主要为高原和山地,海拔高,人口以少数民族为主,经济较为滞后,建设用地面积占比相对较少,对土壤侵蚀量的贡献减小。

3.3 不足与展望

本研究在水生态系统服务中,只考虑产水服务和土壤保持服务 2 个与本区域密切相关的服务,实际上

水生态系统服务还包括洪水控制、水质净化等,因此未来的研究应充分考虑所有相关的服务,并分析其变化和相互关系,为区域水生态安全管理提供更详实的依据。本研究在对影响因素进行分析的时候,只分析水生态系统服务的波动情况,而水生态系统服务的趋势变化也尤为重要,未来应进一步加强。生态系统服务评估模型的局限性可能影响量化结果的准确性。例如,本研究产水服务没有划分地表和地下径流,而喀斯特地区径流通过岩溶裂隙流入地下,同时引起地下土壤的流失,评估过程中没有考虑,未来的研究应进一步细分水分和土壤的地表和地下流失过程,研究结果对该区域生态建设更具有针对性。本研究使用的 USLE 方程在国内外均有广泛使用,已用于国内黄土高原^[9]、喀斯特地区^[11]土壤保持服务评估,在研究过程中通过结合研究区的特殊地形特征进行参数本土化,从而适用于研究区域。然而,本研究在进行参数本土化从而适应西南地区的土壤侵蚀量计算时,未单独考虑到喀斯特地区包含大量的裸露基岩,出露的基岩具有抗蚀性,使得土壤侵蚀量结果具有不确定性。因此,在未来的研究中应引入基岩裸露率因子,通过基于基岩裸露率修正的土壤流失方程,对喀斯特区域的土壤侵蚀量进行更为准确的估算。

4 结论

(1)1992—2020 年产水量呈下降趋势,2016 年平均产水量最大,2011 年最小。产水服务低值的主要分布地区由四川省西部变为四川省南部,高值区由贵州省西部变为云南省西南部。西南地区南部产水量呈下降趋势,北部与之相反。

(2)1992—2020 年土壤侵蚀量呈上升趋势,土壤侵蚀量年际变化较大,1997 年为土壤侵蚀量先增后减的突变年,西南地区南部土壤侵蚀量呈下降趋势,北部与之相反。

(3)在西南地区,气候变化对产水量和土壤侵蚀量的相对贡献率较大,产水量相比于土壤侵蚀量而言,对气候变化更为敏感;土地利用变化的贡献较小。

(4)西南地区年平均产水量随海拔的上升而下降,土壤侵蚀量随海拔的上升而上升,均主要受降水的影响。不同海拔梯度下,对产水量和土壤侵蚀量相对贡献率最大的影响因素始终为降水,降水对产水量的相对贡献率始终在 88% 以上,对土壤侵蚀量的相对贡献率始终在 79% 以上。

(5)本文通过分析不同地貌和海拔地区水生态系统服务的变化及其影响因素,研究结果可为复杂地形

地区(不同海拔、不同地貌)制定精细化和针对性的生态保护方案和措施提供参考,同时本研究也为喀斯特地区土地管理和生态恢复措施提供科学依据。

(6)在未来的研究中,应进一步完善本区域水生态系统服务研究方法,明确在水生态系统评估中的不确定性,提高本区域水生态系统服务的科学研究价值,保障研究区水生态安全。

参考文献:

- [1] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等.水生态服务功能分析及其间接价值评价[J].生态学报,2004,24(10):2091-2099.
OUYANG Z Y, ZHAO T Q, WANG X K, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [2] 韩宇,刘焱序,王晨旭.基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区识别[J].生态学报,2024,44(18):8126-8137.
HAN Y, LIU Y X, WANG C X. Identification of priority areas for ecological restoration supported by investment based on water ecosystem services in the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8126-8137.
- [3] 张思颖,陈荣蓉,程先.重庆龙溪河流域水生态系统服务时空演变及对土地利用变化响应[J].水土保持学报,2023,37(4):173-183.
ZHANG S Y, CHEN R R, CHENG X. Spatiotemporal changes of water-related ecosystem services and the responses to land use changes of the Longxi River Basin, Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 173-183.
- [4] DENG G Y, JIANG H B, ZHU S Y, et al. Projecting the response of ecological risk to land use/land cover change in ecologically fragile regions [J]. The Science of the Total Environment, 2024, 914: e169908.
- [5] LAUTENBACH S, VOLK M, STRAUCH M, et al. Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment [J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 48: 98-112.
- [6] ZHANG Q, SUN X, MA J, et al. Scale effects on the relationships of water-related ecosystem services in Guangdong Province, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: e101278.
- [7] YANG L Y, ZHANG L B, LI Y, et al. Water-related ecosystem services provided by urban green space: A case study in Yixing City (China) [J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 136: 40-51.
- [8] WANG H B, WANG W J, LIU Z H, et al. Combined effects of multi-land use decisions and climate change on water-related ecosystem services in Northeast China [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 315: e115131.
- [9] WANG Y X, WANG H M, ZHANG J X, et al. Exploring interactions in water-related ecosystem services nexus in Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 336: e117550.
- [10] HAO R, YU D, HUANG T, et al. NPP plays a constraining role on water-related ecosystem services in an alpine ecosystem of Qinghai, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: e108846.
- [11] PENG J, TIAN L, ZHANG Z M, et al. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a Karst landscape in China [J]. Ecosystem Services, 2020, 46: e101199.
- [12] XUE J, LEI J Q, CHANG J J, et al. A causal structure-based multiple-criteria decision framework for evaluating the water-related ecosystem service tradeoffs in a desert oasis region [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: e101226.
- [13] ZHAO W Y, WU S Y, CHEN X, et al. How would ecological restoration affect multiple ecosystem service supplies and tradeoffs? A study of mine tailings restoration in China [J]. Ecological Indicators, 2023, 153(2): e110451.
- [14] XIA H J, KONG W J, ZHOU G, et al. Impacts of landscape patterns on water-related ecosystem services under natural restoration in Liaohe River Reserve, China [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 792(6): e148290.
- [15] MITCHELL M, DEVISSCHER T. Strong relationships between urbanization, landscape structure, and ecosystem service multifunctionality in urban forest fragments [J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 228(4): e104548.
- [16] LI R N, ZHENG H, O'CONNOR P, et al. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs [J]. Science Advances, 2021, 7(14): e8650.
- [17] 王懋源,齐实,郭衍瑞,等.藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制探讨[J].生态学报,2024,44(21):9520-9534.
WANG M Y, QI S, GUO Y R, et al. Driving mechanism of water yield in the ecological and water conservation zone of east Tibet and west Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9520-9534.
- [18] 杨长春.喀斯特地区土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持,2012(3):15-17.
YANG C C. Research progress of soil erosion in Karst area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(3): 15-17.
- [19] 李婷,刘康,胡胜,等.基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(9):1242-1250.

- LI T, LIU K, HU S, et al. Soil erosion and ecological benefits evaluation of Qinling Mountains based on the InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [20] 王毅, 张晓美, 周宁芳, 等. 1990—2019 年全球气象水文灾害演变特征[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 496-506.
- WANG Y, ZHANG X M, ZHOU N F, et al. Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(4): 496-506.
- [21] JOHNSON J W. A heuristic method for estimating the relative weight of predictor variables in multiple regression[J]. Multivariate Behavioral Research, 2000, 35(1): 1-19.
- [22] LIANG J, LI S, LI X D, et al. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, Southern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 279(12): e123851.
- [23] 窦攀峰, 左舒翟, 任引, 等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2398-2409.
- DOU P F, ZUO S Z, REN Y, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2398-2409.
- [24] 段琪彩, 吴灏, 王杰, 等. 滇中城市水源地水源涵养能力研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 312-315.
- DUAN Q C, WU H, WANG J, et al. Study on the water conservation capacity of urban catchment areas in central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 312-315.
- [25] FU B J, WANG S, SU C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(1): 4-10.
- (上接第 243 页)
- [20] DWIGHT D, SMITH W H W. Factors affecting sheet and rill erosion[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(6): 889-896.
- [21] WILLIAMS J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. [J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990, 4(4): 206-207.
- [22] 李嘉麟, 陈家慧, 华丽, 等. 基于 CSLE 的湖北省土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 43-52.
- LI J L, CHEN J H, HUA L, et al. Spatial and temporal characteristics of soil erosion in Hubei Province based on CSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 43-52.
- [23] 杨建和, 严冬春, 文安邦. 金沙江流域近十年地表变化与土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 13-20.
- YANG J H, YAN D C, WEN A B. Spatiotemporal variation characteristics of surface change and soil erosion in Jinsha River Basin in the past decade[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 13-20.
- [24] 管礼松, 郭伟玲, 李鑫, 等. 2000—2018 年皖南山区土壤侵蚀时空变化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 114-121.
- GUAN L S, GUO W L, LI X, et al. Spatio-temporal changes of soil erosion in mountainous area of southern Anhui Province from 2000 to 2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 114-121.
- [25] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [27] TAN Z L, LEUNG L R, LI H Y, et al. Representing global soil erosion and sediment flux in earth system models[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2022, 14(1): e2021MS002756.
- [28] THANGAVEL P, ANJUM N A, MUTHUKUMAR T, et al. Arbuscular mycorrhizae: Natural modulators of plant-nutrient relation and growth in stressful environments[J]. Archives of Microbiology, 2022, 204(5): e264.
- [29] YUAN X F, HAN J C, SHAO Y J, et al. Geodetection analysis of the driving forces and mechanisms of erosion in the hilly-gully region of northern Shaanxi Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(5): 779-790.
- [30] 史书汇, 王晓云, 李发文. 淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构关联性分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 117-126.
- SHI S H, WANG X Y, LI F W. Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 117-126.