

DOI: 10.20103/j.stxb.202503060485

韩煜娜, 左德鹏, 王国庆, 刘吉峰, 徐宗学, 蔡思扬, 陈果. 黄河水源涵养区不同生态水文分区植被对气候变化的响应研究. 生态学报, 2025, 45(22): - .

Han Y N, Zuo D P, Wang G Q, Liu J F, Xu Z X, Cai S Y, Chen G. Response of vegetation growth to climate change based on the ecohydrological regionalization in the water conservation area of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

黄河水源涵养区不同生态水文分区植被对气候变化的响应研究

韩煜娜¹, 左德鹏^{1,*}, 王国庆^{2,3}, 刘吉峰⁴, 徐宗学¹, 蔡思扬¹, 陈果¹

1 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875

2 南京水利科学研究院, 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098

3 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029

4 水利部黄河水利委员会水文局, 郑州 450003

摘要: 生态水文分区可为流域水资源管理和生态环境保护提供基础依据, 探究流域生态水文过程演变规律对水安全、生态安全等具有重要意义。以黄河水源涵养区为研究对象, 基于 1980—2019 年多要素、多尺度、多源数据, 构建生态水文综合指标体系, 划定了多级生态水文分区, 识别了不同分区气候、生态和水文关键要素时空演变规律, 探究了要素间的互馈效应和协同作用机制。结果表明: (1) 统筹考虑指标特征和地域特性, 黄河水源涵养区可划分为 5 个一级和 10 个二级生态水文分区。(2) 1980—2019 年黄河水源涵养区气温和叶面积指数持续增加, 降水和积雪深度在 1980—1999 年以减少趋势为主, 2000 年以后逐渐增加。(3) 气温升高, 降水增加会促进黄河水源涵养区植被生长, 上游分区交界处叶面积指数对气温响应存在 1 个月的滞后, 河源区叶面积指数与降水的相关系数在滞后 1 个月时达最大值。研究结果可为黄河流域水安全和生态安全保障提供参考依据。

关键词: 变化环境; 生态水文分区; 生态水文过程; 黄河水源涵养区

Response of vegetation growth to climate change based on the ecohydrological regionalization in the water conservation area of the Yellow River

HAN Yuna¹, ZUO Depeng^{1,*}, WANG Guoqing^{2,3}, LIU Jifeng⁴, XU Zongxue¹, CAI Siyang¹, CHEN Guo¹

1 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory of Urban Water Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China

2 The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China

3 Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China

4 Hydrological Bureau of Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China

Abstract: Ecohydrological regionalization formed the basis for water resources management and ecological protection, and exploring the evolution of ecohydrological processes under environment changes held great significance for water security and ecological security. Based on long-term multi-element, multi-scale, and multi-source datasets from the water conservation area of the Yellow River (1980—2019), this study constructed a comprehensive ecohydrological index system and divided primary and secondary ecohydrological regions. The analysis identified spatiotemporal evolution patterns and mutual feedback effects among critical climate, ecological, and hydrological elements across different ecohydrological regions. The results showed that (1) the study area was divided into five primary and ten secondary ecohydrological regions based on the comprehensive ecohydrological index system while accounting for complex regional characteristics. (2) Temperature and leaf

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC3201104); 国家自然科学基金(52479001)

收稿日期: 2025-03-06; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

area index exhibited continuous increase during 1980—2019, while precipitation and snow depth showed overall declines during 1980—1999 but demonstrated increasing trends after 2000. (3) Rising temperature and precipitation promoted vegetation growth. A one-month lag effect of temperature on leaf area index was observed in areas with large elevation fluctuations, while in the source region of the Yellow River, the leaf area index-precipitation correlation peaked at a one-month lag. This study provided scientific references for ensuring water and ecological security in the Yellow River Basin.

Key Words: changing environment; ecohydrological regionalization; ecohydrological processes; the water conservation area of the Yellow River

变化环境下水循环与水资源时空演变规律研究是国际社会普遍关注的全球性问题,对国家水安全^[1-2]、生态安全^[3-4]和粮食安全^[5-6]等具有十分重要的理论意义和实践价值。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次综合评估报告^[7]和中国气象局气候变化中心编制的《中国气候变化蓝皮书(2024)》^[8]均指出,现阶段全球气温仍呈快速上升趋势,降水变化表现出较强的空间异质性,导致极端气候事件频发、海平面明显上升和海冰面积显著减少等问题^[9-10],我国生态环境^[11]和水资源安全^[12]面临严峻挑战。植被作为陆地生态系统的主体,在陆表能量循环、物质交换和气候调节等方面发挥重要作用。在全球气候变化加剧背景下,植被对气候变化的动态响应研究愈发受到关注^[13]。随着科学技术进步,从最初水文过程的生态效应^[14],到后来下垫面变化状态下的水文过程^[15-16],再到基于 3S 技术的生态水文过程耦合研究^[17-18]。生态水文分区是在对流域生态水文系统客观认识的基础上,考虑区域的相似性和差异性规律,借助地理信息系统的空间分析功能,实现生态水文空间单元的分割与合并^[19],是进行生态水文系统科学调控的基础,能够综合反映区域生态水文特征,为资源开发、生态保护和 water 环境管理提供重要参考依据。现有研究多借鉴生态分区、水文分区、水资源分区和水功能区划等分区理论^[20-21],在一级流域及全国尺度上进行数据统计与聚类划定^[22-24],初步量化生态水文分区格局,但大多缺少对水循环与生态演变作用机理的考虑,因此,构建全要素生态水文综合指标体系进行评估分区,能够为小尺度流域生态水文分区划定提供借鉴思路。综合考虑区域特性,研究生态水文过程时空演变规律,识别二者之间的相互作用关系,成为水文、气象、生态等多个领域共同关注的问题。

黄河是中华民族的母亲河,自西向东流经黄土高原和华北平原,是我国重要的生态廊道。近几十年,黄河流域生态质量总体有所提升,植被覆盖整体呈上升趋势,1999 年起,退耕还林还草工程实施后植被改善趋势更为明显^[25]。受水热条件变化和人类活动影响,不同地区植被动态存在显著时空异质性,局部地区受极端气候影响呈严重退化状态^[13]。黄河流域实测径流量在近年来大幅下降,水资源开发利用率和消耗率均超过 80%,水资源短缺成为黄河流域生态保护和高质量发展面临的最大挑战^[26]。水源涵养是生态系统水量调节服务功能的核心,现有研究多将水源涵养功能视为特定时间和条件下,生态系统对降水的拦截、蓄积过程,通过贮存水分表现出调节径流、拦蓄洪水、净化水质等能力^[27-30],明确将三江源、秦岭、祁连山、六盘山、若尔盖等重点生态功能区视为黄河流域生态保护空间布局的重要水源涵养区^[26]。结合流域水文气候特征,黄河水源涵养区被界定为兰州以上、渭河华县以上(不包括泾河和北洛河)和伊洛河流域^[31],面积仅占黄河流域的 37%,但径流量占到黄河流域的 84%^[26],区域水资源管理和生态环境质量将直接影响黄河流域的水安全和生态安全。因此,本研究基于黄河水源涵养区的地形地貌、生态因子、气象要素、水文指标和人类活动等多要素多尺度信息,构建流域生态水文综合指标体系,完成了黄河水源涵养区一级和二级生态水文分区,识别了 1980—2019 年不同分区气候、生态和水文关键要素的时空演变格局,解析了植被生长对气候变化响应的时滞效应,探究了要素间的互馈效应和协同作用机制。研究结果有助于深入理解流域水循环与水资源演变机制,能够为黄河流域水安全与生态安全保障提供参考依据。

1 研究区概况

黄河水源涵养区(95°52′—113°38′E, 32°09′—38°21′N)总面积 30.44 万 km², 横跨青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省和河南省共计 6 省区, 包含兰州水文站以上(22.25 万 km²)、渭河华县以上(6.33 万 km²)和伊洛河流域(1.86 万 km²)^[26, 31—32]。地势西高东低, 海拔落差大, 山地分布广泛, 上游河源区位于青藏高原范围内, 海拔最高处位于玛卿岗日, 约 6216 m(图 1)。水源涵养区年平均降水量范围为 339.70—1001.08 mm, 年平均气温区间为 -9.60—15.51 °C, 西部河源区气温低降水少。水源涵养区多年平均径流量为 421.3 亿 m³, 占黄河流域总径流量的 84%, 是主要的产流区。区域生态环境脆弱, 下垫面特征复杂, 以草原、灌丛、常绿针叶林和落叶阔叶林为主要植被类型, 其中兰州以上区域草地占比达 65% 以上, 渭河华县以上地区林地分布较为广泛。

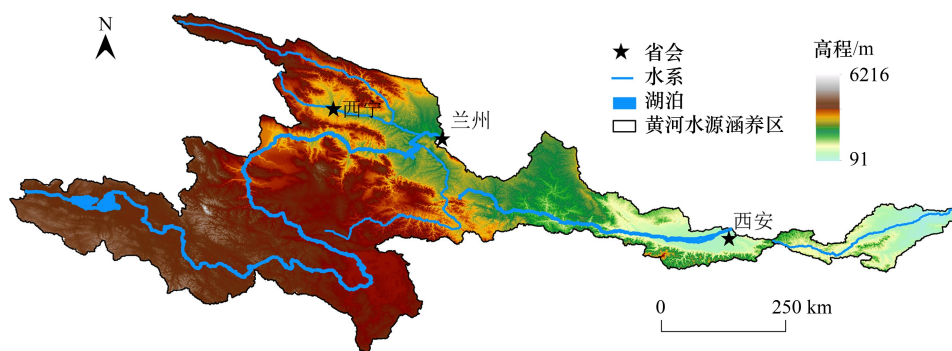


图 1 黄河水源涵养区概况

Fig.1 Overview of the water conservation area of the Yellow River

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文使用的多要素、多尺度、多源数据产品具体信息见表 1。选择 1980—2019 年为研究时段, 采用气温、降水、蒸散发、雪深等长序列数据的多年平均值代表各要素特征, 高程、冻土分布等其他数据则以 2000 年左右的代表年特征值予以表征, 通过 ArcGIS 和 Matlab 软件对数据进行批处理。基于黄河水源涵养区的地形地貌、生态环境、气象要素、水文指标和社会经济特征, 以 0.25° 网格为计算单元, 统一各数据集空间尺度, 计算生态水文空间单元属性信息, 对所提取指标特征值进行主成分和聚类分析, 以此开展生态水文分区划定。根据主成分分析结果, 识别黄河水源涵养区气象、生态、水文关键要素时空演变规律, 并探究不同分区各要素间的相互作用关系。本文所选数据集覆盖时间长, 数据准确性高, 已被广泛应用于流域/区域气候变化^[33]、植被覆盖监测^[34—35]和陆表过程研究^[36—37], 相关研究^[18, 28, 35]印证了数据集在黄河水源涵养区的适用性。

2.2 研究方法

2.2.1 生态水文多级分区方法

指标确定的合理性决定了后续分区工作的准确性, 本文以生态水文学理论为指导思想, 综合考虑生态背景值、自然环境背景值、土地利用状况、水土保持状况和社会经济特征等方面, 结合定量和定性筛选方法, 从地形地貌、生态环境、气象要素、水文指标和社会经济五方面筛选指标构建生态水文综合指标体系(表 2), 并以空间分辨率 0.25° 网格为基本单元, 进行生态水文空间单元要素信息计算。主成分分析法是一种常用的降维处理方法, 能够从原本具有一定相关关系的变量中提取少数几个互不相关, 但能表征大部分原始变量信息的主成分, 在把握主要矛盾的基础上优化计算流程^[38]。聚类分析法能够通过判别生态水文空间单元之间的相

似性和差异性,实现单元间的合并与划分,得到基于原始变量信息的不同类型区^[39]。本文对水源涵养区 572 个网格进行指标计算,采用主成分分析法得到表征黄河水源涵养区生态水文特征的四个关键成分,再根据空间单元主成分得分值,利用聚类分析法实现单元合并,初步确定分区方案,最后综合考虑子流域分布、行政区划和气候带分布等信息,通过网格叠置分析,划分一级和二级生态水文分区。

表 1 数据资料基本信息统计表
Table 1 Statistical table of the basic information about datasets

数据类别 Data category	数据集名称 Dataset name	时间序列 Time series	时间 分辨率 Temporal resolution	空间 分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source	网址 Website
气象数据 Meteorological data	中国地面气候资料日值数据集	1980—2019 年	天	—	中国气象数据网	https://data.cma.cn/
	Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) v3.6 数据集	1980—2019 年	年	0.25°	布里斯托大学	https://www.gleam.eu/
水文数据 Hydrological data	中国雪深长时间序列数据集	1979—2019 年	天	0.25°	国家青藏高原科学 数据中心	http://data.tpdc.ac.cn
	中国冻土分布情况	2000 年左右	—	—		
	第二次冰川编目数据	2006—2011 年	—	—		
下垫面数据 Underlying surface data	高程 SRTM 数据	2000 年	—	90 m	中国科学院资源环 境与数据中心	https://www.resdc.cn/
	中国土地利用/覆被数据	1980 年、2000 年、 2020 年	—	1 km		
	GIMMS NDVI	1981—2015 年	半月	0.083°	美国航空航天局	https://ecocast.arc.nasa.gov/
	GLASS LAI	1981—2018 年	8 天	0.05°	马里兰大学	http://www.glass.umd.edu/
社会经济数据 Socioeconomic data	中国人口密度空间分布数据	2000 年	—	1 km	中国科学院资源环 境与数据中心	https://www.resdc.cn/
	中国 GDP 空间分布数据	2000 年	—	1 km		

表 2 生态水文综合指标体系
Table 2 Integrated indices system about ecohydrology

目标 Objective	指标集 Index set	应用指标 Indices	统计数据 Statistical data
黄河水源涵养区生态 水文分区 Ecohydrological regionalization in the water conservation area of the Yellow River	地形地貌	高程	2000 年 SRTM 数据
		坡度	通过高程数据计算
		地形起伏度	通过高程数据计算
	生态环境	土地覆被类型在分区单元中的占比	1998 年马里兰大学植被数据
		归一化植被指数	1981—2015 年 GIMMS NDVI 数据
		叶面积指数	1981—2018 年 GLASS LAI 数据
	气象要素	年平均气温	1980—2019 年气象站点插值数据平均值
		年降水量	1980—2019 年气象站点插值数据平均值
		潜在蒸散发量	1980—2019 年 GLEAM 蒸散发数据平均值
	水文指标	积雪深度	1980—2019 年中国雪深数据平均值
冻土类型		2000 年左右冻土分布数据	
冰川分布		2006—2011 年第二次冰川编目数据	
社会经济	人口密度	2000 年中国人口密度空间分布数据	
	GDP	2000 年中国 GDP 空间分布数据	

2.2.2 时间序列趋势分析方法

Sen's slope 通过计算数据之间的斜率中位数来分析数据序列变化趋势,通过中位数差排除异常值影响,

对测量误差和离群数据不敏感,是一种稳健的非参数统计方法^[40]。Mann-Kendall 方法允许数据序列存在缺失值,不要求数据服从特定分布,是一种非参数时间序列趋势检验方法^[41—42],常用以检验 Sen's slope 计算所得数据序列趋势的显著性,二者结合使用已被广泛应用于各项研究中^[43—44]。本文采用 Sen's slope 和 Mann-Kendall 非参数趋势检验法分析 1980—2019 年黄河水源涵养区气温、降水、叶面积指数和积雪深度要素长时间序列变化趋势,以识别不同分区气象、生态、水文关键要素特征的相似性和差异性。

2.2.3 相关性和滞后性识别方法

Pearson 相关性分析是分析变量间线性相关的方法,能够通过计算要素间的相关系数反映不同要素之间相关程度和方向,表征要素之间相关关系^[45]。数据序列之间的时间错位相关性分析及计算,能够得到要素间相关系数最大值对应的时间序列,反映要素间相互作用的滞后性关系^[46]。本文采用 Pearson 相关性分析法,探究了 1980—2019 年黄河水源涵养区气温、降水和叶面积指数月尺度数据的相关性和滞后性,并采用 t 检验方法对数据序列间关系的显著性进行了检验,以期识别不同生态水文分区气象、生态和水文关键要素间的互馈效应和协同作用机制。

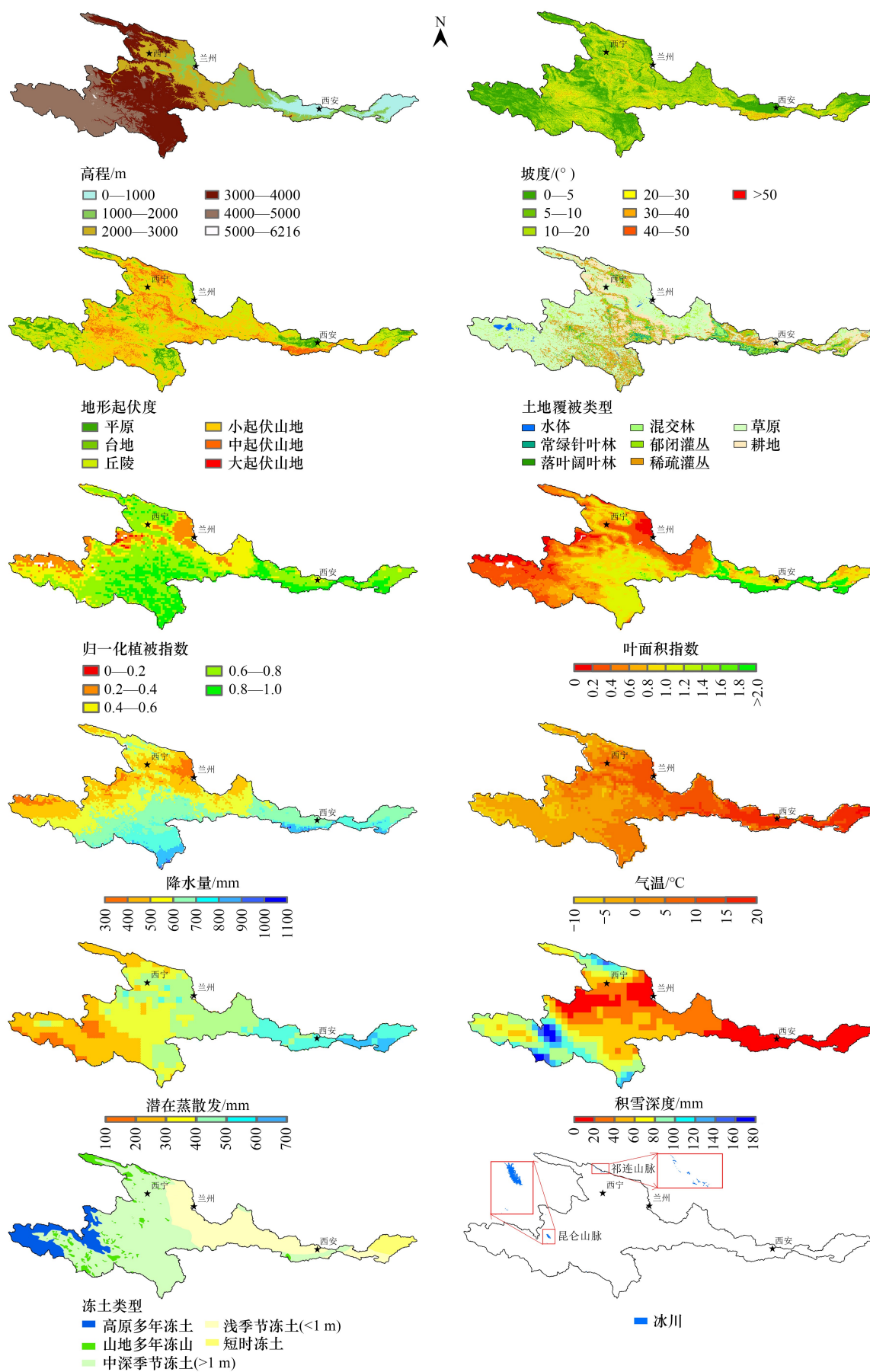
3 结果与分析

3.1 生态水文综合指标体系构建及特征分析

综合考虑黄河水源涵养区地形地貌特征、生态环境格局、气象要素规律、水文指标变化和社会经济表征,构建“水文-土壤-气候-生态”综合评价指标体系(图 2)。基于高程数据计算得到坡度和地形起伏度,黄河水源涵养区地势西高东低,海拔落差大,山地分布广泛。研究采用美国马里兰大学的土地覆被数据,绝大部分地区以草原为主要覆被类型,灌丛多分布在东南部及南部季风气候区,中部渭河华县以上地区林地分布广泛。黄河水源涵养区绝大部分区域 NDVI 在 0.6 以上,叶面积指数空间分布与 NDVI 基本一致,整体上西低东高,西部鄂陵湖—扎陵湖周边河源区和兰州市周边草原覆被区植被指数值较小。黄河水源涵养区降水自西北至东南递增,季风气候区年降水量多在 600 mm 以上,气温和潜在蒸散发量自西向东递增,河源区年平均气温在 0℃ 以下,潜在蒸散发量小于 300 mm,渭河华县以上地区和伊洛河流域气温在 10℃ 以上,相应的潜在蒸散发量较高。黄河水源涵养区积雪集中分布在西部高程 4000 m 以上的高海拔地区和北部山区,部分地区多年平均积雪深度在 100 mm 以上。另外,西部河源区和北部山区也分布有高原多年冻土和山地多年冻土,其他地区为季节冻土和短时冻土,冰川集中分布在昆仑山脉东段的阿尼玛卿地区,包括维格勒当雄冰川、哈龙冰川、耶和龙冰川等典型冰川,北部祁连山区也有少量冰川分布。人类活动主要发生在中东部的人口密集区,包括上游的西宁市、兰州市周边和中下游的西安市、洛阳市等地,省会城市部分地区人口密度达到 5000 人/km² 以上,相应的 GDP 超过 5000 万元/km²。

3.2 黄河水源涵养区生态水文多级分区划定

对图 2 中生态水文指标分区单元统计指标进行标准化处理,采用主成分分析法计算各指标特征值、特征向量和累计贡献率等信息,黄河水源涵养区前 4 个主成分特征值大于 1,累计贡献率大于 80%(表 3),以前 4 个主成分信息代替原始变量,进行聚类分析。将样本之间距离计算方式设定为相关性(correlation),连接方式设定为加权平均法(weighted),得到基于不同聚类分区数的初步聚类结果(图 3)。为尽可能保证分区内单元之间的连续性和完整性,兼顾分区间差异性,基于聚类分析结果将黄河水源涵养区划分为 5 个一级生态水文分区。基于主成分分析和聚类分析结果,综合考虑自然地理和行政区划等实际情况,应用栅格叠置分析工具,最终将黄河水源涵养区划分为 5 个一级和 10 个二级生态水文分区(图 4)。其中 I 区位于西部河源区,高程大于 4000 m,气温低,降水少,植被以草地为主,几乎无人类活动影响,根据水文过程划分为以冻土水文过程为主的 I—1 区和以融雪径流为关键过程的 I—2 区。II 区在黄河门堂—唐乃亥段,高程在 3000—4000 m,降水较为丰富,植被以草地和灌丛为主,零散分布少量林地,有一定人类活动影响,根据气候系统划分为受季风气候影响为主的 II—1 区和主要受西风系统影响的 II—2 区。III 区在黄河唐乃亥—兰州段,高程在 1000—



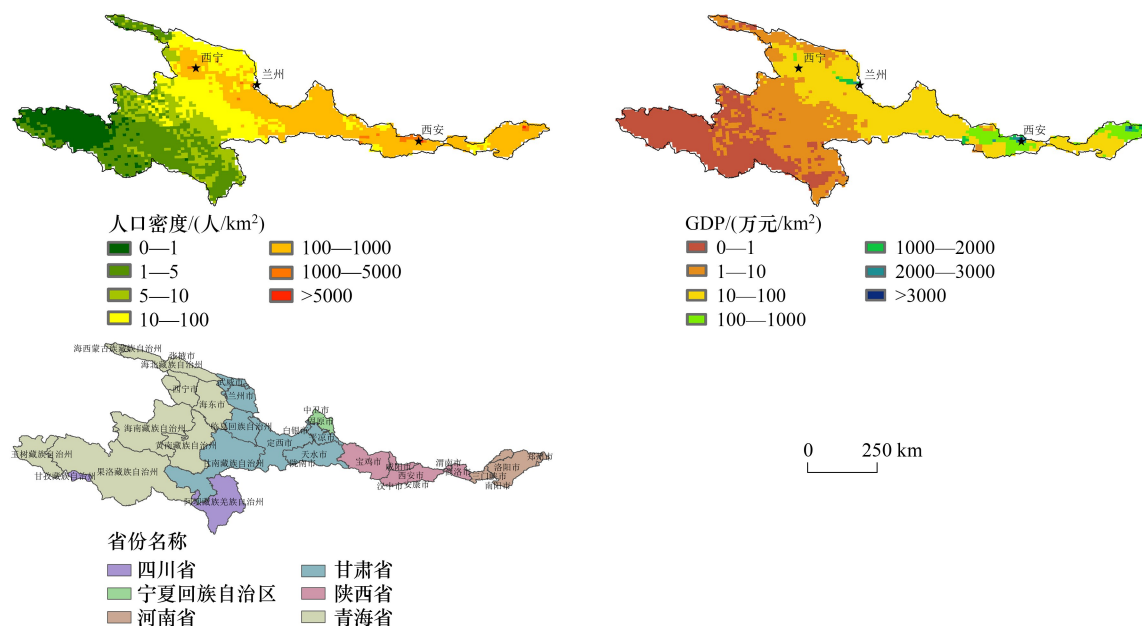


图2 黄河水源涵养区生态水文指标空间分布图

Fig.2 Spatial distributions of ecohydrological indices in the water conservation area of the Yellow River

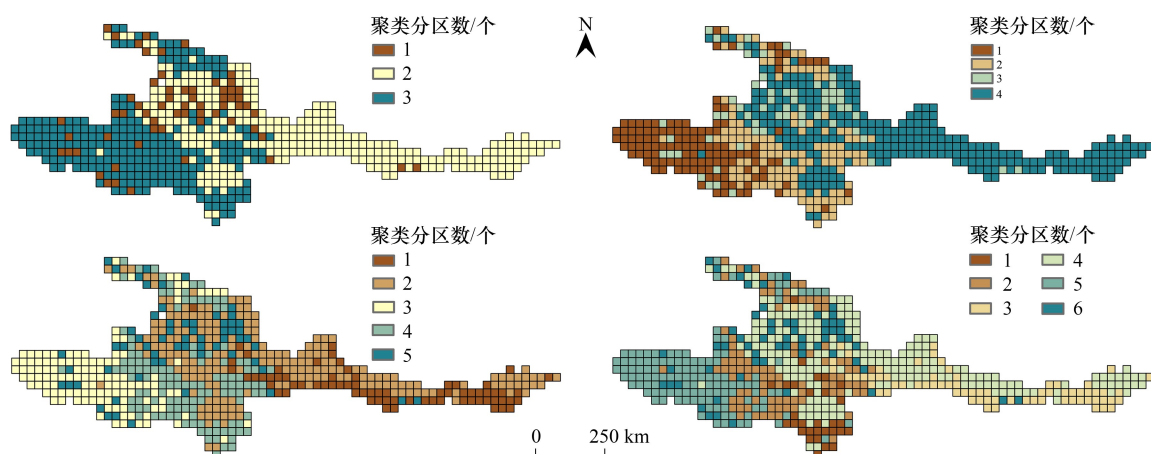


图3 黄河水源涵养区生态水文指标栅格尺度聚类结果

Fig.3 Clustering of ecohydrological indices at the grid scale in the water conservation area of the Yellow River

4000 m, 气温较高, 降水适中, 植被类型丰富, 耕地分布广泛, 人类活动影响较大, 根据气候带划分为 III—1 区、III—2 区和 III—3 区。IV 区为渭河华县以上地区, 高程在 0—2000 m, 气温高, 降水较为丰富, 植被以草地和林地为主, 人类活动影响大, 根据气候和下垫面自然条件差异, 进一步将其划分为 IV—1 区和 IV—2 区。V 区为伊洛河流域, 高程普遍小于 1000 m, 气温高, 降水丰富, 植被类型广泛, 人类活动影响大。生态水文分区结果充分表征了黄河水源涵养区的气候和下垫面特征, 反映了水文指标的变化规律, 体现了社会经济及其对水资源和生态环境的影响, 综合反映了生态水文系统的相似性和差异性规律, 能够为水源涵养区乃至整个黄河流域的资源开发、灾害预防和生态调控等提供参考依据。

3.3 不同分区生态水文关键要素时空演变格局

考虑黄河水源涵养区生态水文指标主成分分析结果, 选取最具代表性的气温、降水、叶面积指数和积雪深

表 3 黄河水源涵养区生态水文指标主成分特征值及贡献率统计表

Table 3 Statistical table of principal component characteristic value and contribution rate of ecohydrological indices in the water conservation area of the Yellow River

主成分序号 Sequence number	特征值 Proper value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	主成分序号 Sequence number	特征值 Proper value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	4.55	28.34	28.34	9	0.30	1.11	95.80
2	2.93	21.44	49.78	10	0.20	0.96	96.76
3	2.74	19.33	69.11	11	0.17	0.94	97.70
4	1.52	11.35	80.46	12	0.12	0.80	98.50
5	1.06	6.35	86.81	13	0.11	0.72	99.22
6	0.90	4.00	90.81	14	0.08	0.56	99.78
7	0.76	2.39	93.20	15	0.04	0.21	99.99
8	0.50	1.49	94.69	16	0.01	0.01	100.00

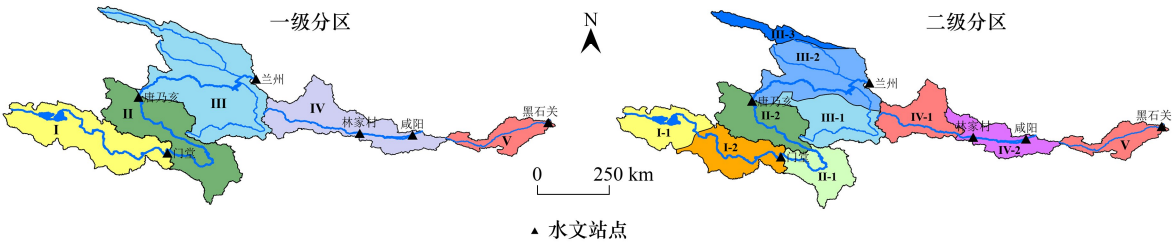


图 4 黄河水源涵养区生态水文分区

Fig.4 Ecohydrological regions in the water conservation area of the Yellow River

度四个指标来识别不同生态水文分区长时间序列要素演变格局(图5和表4)。1980—2019年,黄河水源涵养区气温自西向东递增,分布范围在-9.60—15.51℃,IV区渭华县以上和V区伊洛河流域气温在10℃以上,明显高于兰州以上的高原山地气候区。水源涵养区绝大部分区域气温逐年上升,黄河源区气温增速较大且在近四十年间持续升高,2000年以前II—2区玛沁站周边、III—1区河南站周边和IV区气温增速较大,2000年以后,西部河源区I—1区气温增加趋势明显,受退耕还林还草工程实施的影响,局部地区植被覆盖显著增加,植被通过调节地表能量收支等过程影响气候^[47],使得III区、IV—2区和V区部分区域气温呈下降趋势。黄河水源涵养区降水自西北至东南递增,年降水量在339.70—1001.08mm区间内,II—1区、IV—2区和V区受季风气候影响,降水量明显高于其他地区,且在1980—2019年间呈减少趋势。1980—1999年,黄河水源涵养区降水主要呈不同程度减少趋势,IV—2区和V区减少幅度较大,达23.20mm/a,2000年以后,除V区伊洛河流域下游地区外,其他地区降水明显增加,与赵慧霞等^[48]的研究结果一致。采用GLASS LAI数据分析长时间序列黄河水源涵养区叶面积指数时空变化,发现近四十年间,叶面积指数大致呈自西北至东南递增的空间分布,IV—2区和V区气温高,降水多,叶面积指数值也明显高于其他地区。黄河水源涵养区叶面积指数呈波动增加趋势,2000年以后,IV—1区植被改善,叶面积指数明显增加。高寒的气候条件使西部河源区和北部山区具有积雪资源,季节性积雪通过积累和消融过程对流域水循环产生影响。黄河水源涵养区的积雪集中分布在I—2区的昆仑山脉和III—3区的祁连山脉附近,积雪深度最大值为189.75mm,整体呈先减少后增加趋势,同降水变化趋势接近。

3.4 叶面积指数与气象要素的相关性和滞后性

气温和降水通过改变区域水热条件影响植被生长状态,进而使得区域生态环境发生变化,但二者对植被的影响之间存在相互作用,研究分别计算黄河水源涵养区叶面积指数与气温、降水的偏相关系数,以确保在研

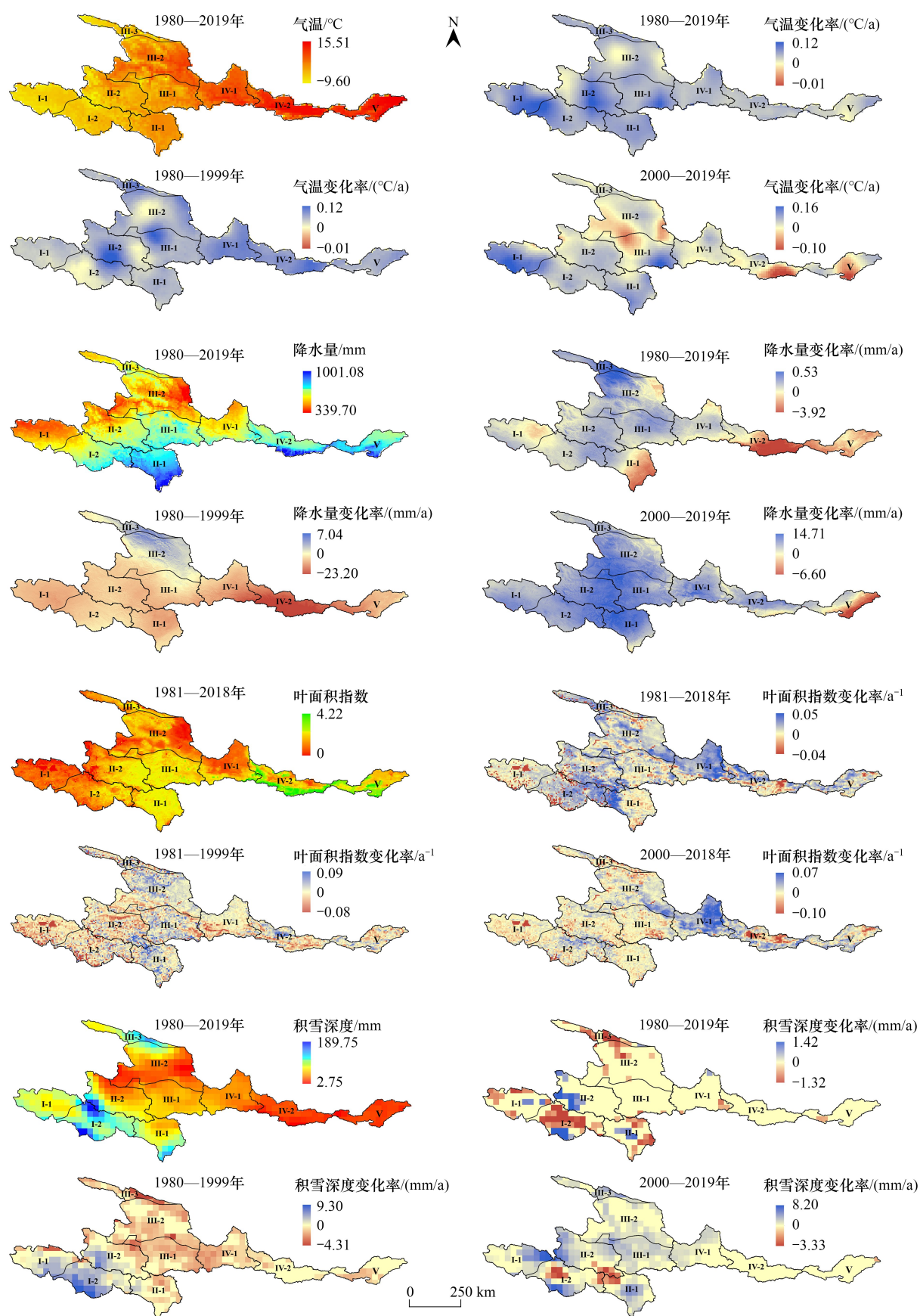


图5 黄河水源涵养区生态水文关键要素空间分布及变化趋势

Fig.5 Spatial distribution and changes of critical ecohydrological elements in the water conservation area of the Yellow River

表 4 黄河水源涵养区生态水文关键要素变化趋势分区统计

Table 4 Statistical table of critical ecohydrological elements variations in the water conservation area of the Yellow River

分区 Regions	气温变化率/(℃/10a) Slope of temperature			降水量变化率/(mm/10a) Slope of precipitation			叶面积指数变化率/10a Slope of leaf area index			积雪深度变化率/(mm/10a) Slope of snow depth		
	1980—2019	1980—1999	2000—2019	1980—2019	1980—1999	2000—2019	1981—2018	1981—1999	2000—2018	1980—2019	1980—1999	2000—2019
I—1	0.40	0.33	0.33	10.81	-20.74	31.23	0.04	-0.05	0.00	-2.07	3.53	15.92
I—2	0.40	0.25	0.43	12.69	-25.34	54.69	0.12	0.03	0.08	-4.92	24.32	5.84
II—1	0.45	0.30	0.51	22.05	-44.51	133.13	0.09	0.09	0.03	-1.64	-5.41	11.21
II—2	0.36	0.30	0.26	16.75	-18.33	60.89	0.13	0.01	0.03	1.55	1.23	11.93
III—1	0.42	0.42	0.29	16.30	-14.22	55.53	0.09	0.06	0.02	0.84	-13.38	13.17
III—2	0.28	0.30	-0.10	11.79	11.83	24.88	0.10	0.07	0.10	-1.78	-13.40	9.22
III—3	0.32	0.43	-0.07	3.30	-1.62	3.61	0.13	0.07	0.01	-5.00	-23.76	19.18
IV—1	0.49	0.72	0.26	3.75	-34.86	26.52	0.18	-0.03	0.35	-1.52	-14.71	6.02
IV—2	0.43	0.69	0.00	-15.86	-121.07	21.53	0.08	-0.03	0.06	-0.85	-9.11	-0.49
V	0.50	0.50	0.02	-9.01	-64.16	-15.31	0.10	0.00	0.08	-2.32	-11.69	-4.99

究其中一个气象要素对植被的影响时尽可能剔除另一个要素的影响。黄河水源涵养区月尺度叶面积指数与气温、降水的偏相关关系见图 6。整体来看,黄河水源涵养区绝大部分地区叶面积指数与气温和降水均呈明显的正相关关系,除 I 区西部河源区外,其余地区相关系数大多在 0.6 以上,分别占到水源涵养区总面积的 80.27%(气温)和 72.66%(降水),尤其在中东部的 II—1 区、III—1 区、IV 区和 V 区受季风气候影响较大,降水量相对较高的地区,叶面积指数与气温的相关系数高于其与降水的相关系数,说明在水分相对充足的条件下,气温对黄河水源涵养区植被叶面积生长的正向影响可能略高于降水的影响。

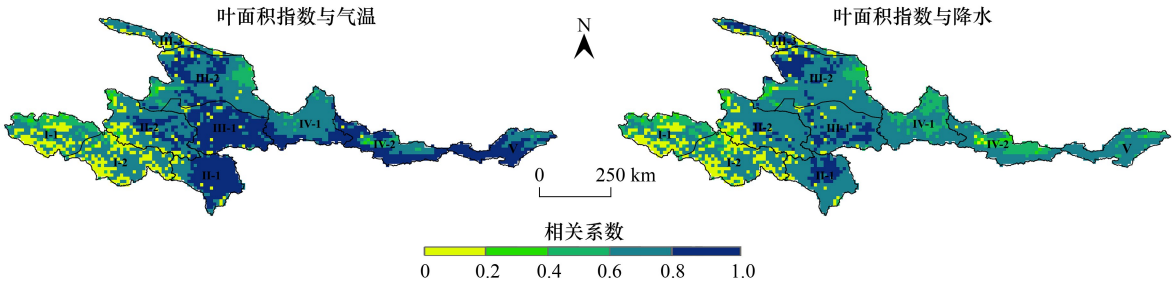


图 6 黄河水源涵养区叶面积指数和气象要素的相关性

Fig.6 Correlation between leaf area index and meteorological elements in the water conservation area of the Yellow River

为识别黄河水源涵养区气象要素对叶面积指数影响的滞后效应,分别计算当月、前 1 个月、前 2 个月的气温、降水与当月叶面积指数的相关系数,统计相关系数最大值出现的月份得到图 7。黄河水源涵养区绝大部分地区气温和降水对植被叶面积生长的影响不存在滞后效应,主要表现为当月气象要素的变化直接影响当月植被的生长动态。兰州以上地区地势复杂,高程起伏变化大,对气温的变化影响大,在一级生态水文分区交界处,高程迅速升高或降低使得气温随之变化,导致黄河水源涵养区 11.76%的面积气温对叶面积指数的影响在滞后 1 个月时相关系数达到最大值。在西部河源区的 I—1 区、I—2 区和 II—2 区,气温低,降水少,植被长势较为缓慢,降水对叶面积指数的影响在滞后 1 个月时相关系数为最大值,占到水源涵养区总面积的 17.4%,区域土地覆被类型以草原为主,分布有少量灌丛。

4 讨论

4.1 生态水文要素时空演变格局

近年来,黄河流域植被覆盖呈增长趋势,黄河水源涵养区叶面积指数增加趋势显著,这与前人研究结论一

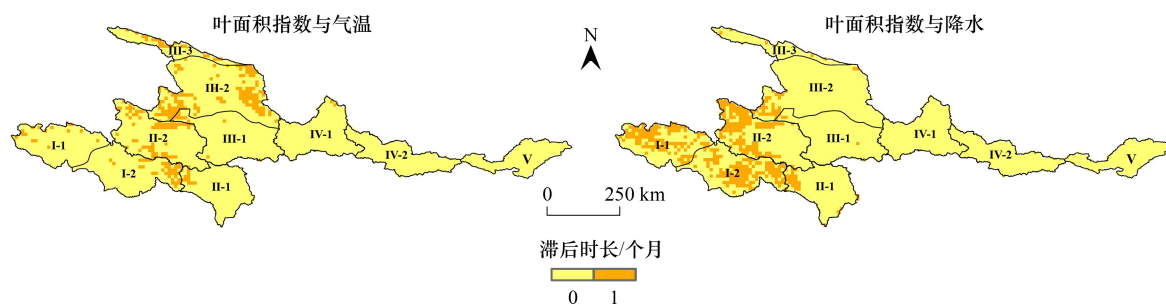


图7 黄河水源涵养区气象要素对叶面积指数影响的滞后效应

Fig.7 Time lag effect of meteorological elements on leaf area index in the water conservation area of the Yellow River

致^[50—51],且气候暖湿化对区域植被绿化发挥重要作用^[52]。李晴晴等^[50]研究显示,黄河流域南部地区植被叶面积指数总体呈增加趋势且均值较高(1.94—5.15 之间),但各区域变化趋势不尽相同,与本文在黄河水源涵养区的研究结果基本相同。2000 年黄河流域发生严重旱情,但区域叶面积指数仍呈增加趋势,这与退耕还林还草等生态恢复工程的实施密切相关。程泳铭等^[52]研究发现,黄河流域干湿特征于 2006 年发生突变,由趋于变干转变为趋于变湿,与本文中水源涵养区降水在 2000 年以前呈减少趋势,2000 年以后逐渐增加的特征基本一致,结果差异主要来源于研究数据源和时间序列的不同。本文在前人研究基础上还考虑了水源涵养区积雪深度时空演变特征,发现其与降水变化趋势基本一致,主要对河源区植被叶面积指数变化产生影响。

4.2 植被生长对气候变化的响应

黄河水源涵养区叶面积指数与气温、降水均呈显著正相关关系,植被生长受气温影响更显著,这与已有研究结果基本一致^[13, 50, 53],可能是由于水源涵养区整体气候较为寒冷干燥且降水量相对较低,而对于受季风气候影响且降水量较为丰沛的 II—1 区、IV—2 区和 V 区,植被生长受水分条件限制小,气温变化显著影响植物光合作用和生长发育时间,进而表现为气温较降水对水源涵养区叶面积指数的影响更为显著。在西南部气温较低且降水较少的河源区,植被生长表现出对气温和降水响应的时滞效应。解晗等^[54]对黄河流域植被指数及其对气候因子响应研究发现,植被指数变化对气温滞后时间为 1 个月,降水滞后时间为 3 个月,与草地最为相关。缪丽娟等^[55]研究则认为草地植被指数对当月平均气温和降水量响应最为强烈。本文中黄河水源涵养区最主要覆被类型为草地,绝大部分区域植被指数主要受当月气温和降水影响,而西南部河源区表现出 1 个月时滞效应。这些研究结果的差异可能与研究时空尺度、研究区自然环境等多种因素有关。

5 结论

本文以黄河水源涵养区为研究对象,构建了生态水文综合指标体系并以此为依据划定了多级生态水文分区,分析了近四十年黄河水源涵养区气候、生态和水文关键要素时空演变规律及其分区特征,并探究了各要素间的相互作用关系。主要结论如下:

(1) 依据生态水文指标体系分析结果,综合考虑子流域分布和行政区划等具体信息,将黄河水源涵养区划分为 5 个一级生态水文分区和 10 个二级生态水文分区,分别根据水文过程、气候系统和气候带的差异性进一步划分了二级生态水文分区。

(2) 黄河水源涵养区 1980—2019 年间气温和叶面积指数呈持续增加趋势,空间上自西向东递增。降水和积雪深度在 2000 年以前呈减少趋势,2000 年以后逐渐增加,空间上降水自西北向东南递增,积雪主要分布在 I—2 区昆仑山脉和 III—3 区的祁连山脉附近。

(3) 黄河水源涵养区月尺度叶面积指数与气温和降水均呈显著正相关关系,在上游一级生态水文分区交界处,高程起伏变化大,植被对气温的响应存在 1 个月的滞后效应,I 区和 II—2 区气温较低,植被生长缓慢,叶面积指数与降水的相关系数在滞后 1 个月时达到最大值。

参考文献 (References):

- [1] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301.
- [2] 张建云. 气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略. 中国水利, 2022, (15): 3-5, 14.
- [3] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 梁尔源, 汪诗平, 朱军涛, 牛犇. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [4] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [5] Zhu P, Burney J, Chang J F, Jin Z N, Mueller N D, Xin Q C, Xu J L, Yu L, Makowski D, Ciais P. Warming reduces global agricultural production by decreasing cropping frequency and yields. *Nature Climate Change*, 2022, 12(11): 1016-1023.
- [6] 康绍忠. 水安全与粮食安全. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885.
- [7] IPCC. Climate change 2021-The physical science basis; working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2023.
- [8] 中国气象局气候变化中心. 《中国气候变化蓝皮书(2024)》. 北京: 科学出版社, 2024.
- [9] Rounce D R, Hock R, Maussion F, Hugonnet R, Kochtitzky W, Huss M, Berthier E, Brinkerhoff D, Compagno L, Copland L, Farinotti D, Menounos B, McNabb R W. Global glacier change in the 21st century: every increase in temperature matters. *Science*, 2023, 379(6627): 78-83.
- [10] Meinshausen M, Lewis J, McGlade C, Gütschow J, Nicholls Z, Burdon R, Cozzi L, Hackmann B. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C. *Nature*, 2022, 604(7905): 304-309.
- [11] 杨志峰, 尹民, 崔保山. 城市生态环境需水量研究——理论与方法. 生态学报, 2005, 25(3): 389-396.
- [12] 张建云, 王国庆, 金君良, 贺瑞敏, 刘翠善. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161.
- [13] 杨铭鑫, 李俊, 同小娟, 于裴洋, 王雅婷, 史倩, 王音. 2001—2020 年中国森林植被 EVI 对气候因子的响应. 生态学报, 2024, 44(23): 10850-10863.
- [14] Wu S Y, Zhou W, Yan K, Zhang X X. Response of the water conservation function to vegetation dynamics in the Qinghai - Tibetan Plateau based on MODIS products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 1675-1686.
- [15] Nyamekye C, Schönbrodt-Stitt S, Amekudzi L K, Zoungrana B J B, Thiel M. Usage of MODIS NDVI to evaluate the effect of soil and water conservation measures on vegetation in Burkina Faso. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(1): 7-19.
- [16] 苏同宣. 黑河上游植被动态对径流变化和生态的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [17] Lian X, Jeong S, Park C E, Xu H, Li L Z X, Wang T, Gentile P, Peñuelas J, Piao S L. Biophysical impacts of northern vegetation changes on seasonal warming patterns. *Nature Communications*, 2022, 13: 3925.
- [18] 杨大文, 杨雨亭, 高光耀, 黄建平, 江恩慧. 黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应. 中国科学基金, 2021, 35(4): 544-551.
- [19] 刘延国, 邹强, 逯亚峰, 李景吉, 肖鹏飞. 青藏高原东缘地形急变流域生态水文分区研究. 水利学报, 2022, 53(2): 243-252.
- [20] 孙然好, 李卓, 陈利顶. 中国生态区划研究进展: 从格局、功能到服务. 生态学报, 2018, 38(15): 5271-5278.
- [21] 孙周亮, 王婕, 刘艳丽, 陈鑫, 刘翠善, 王国庆. 中国水文区划及水文分区方法综述. 水利水运工程学报, 2024(1): 77-86.
- [22] 尹民, 杨志峰, 崔保山. 中国河流生态水文分区初探. 环境科学学报, 2005, 25(4): 423-428.
- [23] 杨爱民, 唐克旺, 王浩, 程金花. 中国生态水文分区. 水利学报, 2008, 39(3): 332-338.
- [24] 蔡燕, 鱼京善, 王会肖, 郭云慧. 黄河流域生态水文分区及优先保护级别. 生态学报, 2010, 30(15): 4213-4220.
- [25] 杨鹏辉, 田佳, 张楠, 高雨珊, 冯雪娟, 杨灿灿, 彭道黎. 1990—2022 年黄河流域植被时空变化特征及未来趋势预测. 生态学报, 2024, 44(19): 8542-8553.
- [26] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8.
- [27] Li M Y, Liang D, Xia J, Song J X, Cheng D D, Wu J T, Cao Y L, Sun H T, Li Q. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112212.
- [28] Chen G, Zuo D P, Xu Z X, Wang G Q, Han Y N, Peng D Z, Pang B, Abbaspour K C, Yang H. Changes in water conservation and possible causes in the Yellow River Basin of China during the recent four decades. *Journal of Hydrology*, 2024, 637: 131314.
- [29] 王东东, 贾仰文, 牛存稳, 岁姚炳, 燕翔. 基于分布式水文模型的水源涵养不同功能评估方法——以渭河涵养区为例. 生态学报, 2024, 44(10): 4342-4352.
- [30] 吕明轩, 张红, 贺桂珍, 张霄羽, 刘勇. 黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素. 生态学报, 2024, 44(7): 2761-2771.
- [31] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定. 水文, 2022, 42(2): 65.
- [32] 鞠琴, 刘小妮, 刘娣, 申同庆, 谷黄河, 王国庆, 余钟波. 基于遥感和通量观测的实际蒸散发时空变化特征——以黄河流域水源涵养区

为例. 水科学进展, 2024, 35(2): 338-347.

- [33] Yang K, He J, Tang W J, Qin J, Cheng C C K. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [34] Jia K, Yang L Q, Liang S L, Xiao Z Q, Zhao X, Yao Y J, Zhang X T, Jiang B, Liu D Y. Long-term global land surface satellite (GLASS) fractional vegetation cover product derived from MODIS and AVHRR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(2): 508-518.
- [35] Liu B, Zhang Z M, Pan L B, Sun Y B, Ji S N, Guan X, Li J S, Xu M Z. Comparison of various annual land cover datasets in the Yellow River Basin. *Remote Sensing*, 2023, 15(10): 2539.
- [36] Dai L Y, Che T, Ding Y J. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSM/I-S data to improve the consistency of snow-depth products in China. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [37] Xue B L, Wang L, Yang K, Tian L D, Qin J, Chen Y Y, Zhao L, Ma Y M, Koike T, Hu Z Y, Li X P. Modeling the land surface water and energy cycles of a mesoscale watershed in the central Tibetan Plateau during summer with a distributed hydrological model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(16): 8857-8868.
- [38] 王乐, 朱求安, 张江, 刘佳, 朱超凡, 瞿莉莎. 黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响. *生态学报*, 2023, 43(8): 3103-3115.
- [39] 苏时光. 谱主成分分析及其在多指标评价体系中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [40] 方开泰, 潘恩沛. 聚类分析. 北京: 地质出版社, 1982.
- [41] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [42] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245.
- [43] Kendall M. *Rank Correlation Methods*. London: Charles Griffin, 1990.
- [44] Van H A, Brunner M I. Trends and drivers of water temperature extremes in mountain rivers. *Water Resources Research*, 2024, 60(10): e37518.
- [45] Buda A R, Millar D J, Kennedy C D, Welsh M K, Wiegman A R H. Trends in extreme rainfall over the past 55 years suggest springtime subhourly rainfall extremes have intensified in Mahantango Creek, Pennsylvania. *Scientific Reports*, 2024, 14: 27837.
- [46] Karl P. Notes on the history of correlation. *Biometrika*, 1920, 13(1): 25.
- [47] 左德鹏, 韩煜娜, 徐宗学, 李佩君. 气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制. *水资源保护*, 2022, 38(6): 1-8.
- [48] 赵东升, 王珂, 崔耀平. 植被变化对气候的反馈机制及调节效应. *生态学报*, 2023, 43(19): 7830-7840.
- [49] 赵慧霞, 卓莹莹, 刘厚凤. 1961—2019年黄河流域降水量时空变化特征分析. *人民黄河*, 2022, 44(3): 26-31.
- [50] 李晴晴, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应. *生态学报*, 2022, 42(10): 4041-4054.
- [51] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [52] 程泳铭, 刘浏, 程湫雅, 徐宗学, 安强, 王宣宣. 黄河上中游植被动态及其对干湿转换的响应. *生态学报*, 2025, 45(4): 1788-1798.
- [53] Moreira A, Fontana D C, Kuplich T M. Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 147: 335-344.
- [54] 解晗, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣, 于裴洋. 2000—2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4536-4549.
- [55] 缪丽娟, 张宇阳, 揣小伟, 包刚, 何昱, 朱敬雯. 亚洲旱区草地 NDVI 对气候变化的响应及滞后效应. *植物生态学报*, 2023, 47(10): 1375-1385.