

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.006

影响滦河流域降水空间分布的多元 环境因子作用机制

董甲平^{1,2,3}, 冶运涛^{1,4,5}, 顾晶晶^{4,5}, 曹 引^{4,5}, 赵红莉^{1,4,5}, 蒋云钟^{1,4,5}

- (1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070;
4. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 5. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为定量评估环境因子对降水空间分布的影响, 实现统计降尺度环境因子的科学选取, 针对现有方法存在无法避免线性假设、无法保证多自变量共线性免疫和无法有效探索因子间交互作用对降水分布影响的问题, 采用地理探测器的定量分析方法, 以滦河流域为研究对象, 从因子探测、交互探测和生态探测 3 个方面探究了环境因子及其交互作用对降水空间分布的影响。结果表明: 因子探测中, 在年、季、月和旬时间尺度上, 经度、纬度、坡度、坡向、NDVI、高程的影响力均超过 1%, 能够直接影响降水的分布, 其中纬度、经度和高程对降水分布的影响最为显著; 交互探测中, 除 2 月高程-坡度及 7 月上旬 NDVI-经度外, 其余交互作用均达到增强的效果, 且所有因子交互结果的影响力均超过 10%, 相较于单因子有较大幅度的提升; 生态探测中, 不同环境因子对降水分布的影响差异显著。

关键词: 地理探测器; 统计降尺度; 因子探测; 交互探测; 生态探测; 滦河流域

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)03-0038-10

Influencing mechanism of multi-source environmental factors on the spatial distribution of precipitation in the Luanhe River Basin

DONG Jiaping^{1,2,3}, YE Yuntao^{1,4,5}, GU Jingjing^{4,5}, CAO Yin^{4,5}, ZHAO Hongli^{1,4,5}, JIANG Yunzhong^{1,4,5}

- (1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for
National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;
3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National State Monitoring, Lanzhou 730070, China;
4. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
5. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: The purpose of this study is to quantitatively assess the influence of environmental factors on the spatial distribution of precipitation, to scientifically select the environmental factors for the statistical downscaling, and to address the problems of existing methods that cannot avoid the linearity assumption, ensure the immunity of multiple independent variables covariance and effectively explore the influence of factor interactions on the distribution of precipitation. By taking the Luanhe River basin as the research object, a quantitative analysis method based on GeoDetector is proposed and this study investigates the influence of environmental factors and their interactions on the spatial distribution of precipitation from three aspects: factor detection, interaction detection and ecological detection. Firstly, the factor detection results show that the influence of latitude, longitude, slope, slope direction, NDVI and elevation all exceed 1% in the annual, seasonal, monthly and tenday scales, and all these factors can directly affect the distribution of precipitation, among which latitude, longitude and elevation have the most significant influence on the distribution of precipitation. Secondly, the interaction detection results show that except for elevation-slope in February and NDVI-longitude in July, the other interactions are enhanced and the influences of all factors exceed 10%, which are more significant than that of single factor. Thirdly,

基金项目: 国家自然科学基金(52279031); 中国水利水电科学研究院基本科研业务专项(01882106); 北京市自然科学基金(JQ21029); 兰州交通大学优秀平台支持(201806)

作者简介: 董甲平(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水资源遥感研究。E-mail: dongjiaping8@gmail.com

通信作者: 冶运涛(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水资源学与水信息学研究。E-mail: yeyuntao@iwhr.com

引用本文: 董甲平, 冶运涛, 顾晶晶, 等. 影响滦河流域降水空间分布的多元环境因子作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 38-47.

DONG Jiaping, YE Yuntao, GU Jingjing, et al. Influencing mechanism of multi-source environmental factors on the spatial distribution of precipitation in the Luanhe River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 38-47.

the ecological detection results show that the influences of different environmental factors on the precipitation distribution are significantly different.

Key words: geodetector; statistical downscaling; factor detection; interaction detection; ecological detection; Luanhe River Basin

高质量的降水数据对于水资源开发利用和管理有着重要的价值^[1],而且能够为防洪、抗旱等自然灾害的应急决策提供科学的数据支撑^[2]。目前获取降水数据的手段主要有气象站点、雷达观测和卫星遥感^[3-4]等。受获取手段的限制,卫星遥感降水数据分辨率过于粗糙,无法满足精细水文水资源研究的需要,卫星遥感降水降尺度成为解决该问题的重要手段^[5]。卫星遥感降水降尺度主要分为统计降尺度和动力降尺度两种。随着近几年机器学习和深度学习的发展,通过构建环境因子与降水数据关系的统计降尺度方法成为研究热点^[6]。

统计降尺度算法依托降水与其他环境因子的关系^[7]获取高空间分辨率的降水数据。因此环境因子的选取成为决定降尺度结果优劣的前提条件。国内外不少学者使用不同环境因子对统计降水降尺度开展了研究。如 Jia 等^[8]基于多元线性回归模型,使用 DEM 和 NDVI 因子在柴达木盆地进行了降水降尺度研究;Chen 等^[9]在扬子江流域使用地理加权回归,对比了将 NDVI、DEM 和 EVI、DEM 等环境因子分别作为参数的降尺度模型的表现;Xie 等^[10]在内蒙古地区使用 NDVI、高程、坡度、坡向、经度和纬度等环境因子,就指数回归、多元线性回归、广义线性回归和地理加权回归算法展开研究;宁珊等^[11]结合相对湿度、经度、纬度、高程、坡向、坡度和植被因子,构建了新疆地区的 TRMM 降水量偏最小二乘法降尺度模型;范田亿等^[12]使用 NDVI、DEM、坡度、坡向、经度和纬度等环境因子建立了湘江流域地理加权回归降尺度模型。从已有研究来看,大部分研究基于简单的相关系数分析法选取环境因子^[13],或直接使用前人的研究成果。但是不同的时间尺度及不同的流域范围,影响因子均有可能发生变化,所以对降水降尺度环境因子的影响进行定量分析十分必要。

地理探测器自 2010 年提出之后,已经在土地利用、公共健康、区域规划^[14]、地质、气象、生态和遥感等众多领域得到了广泛的应用^[15]。地理探测器能够探测空间分异性,并揭示其背后的驱动力,成为探究全局驱动因子、局域驱动因子及不同时间尺度、空间尺度驱动因子变化的强力工具。与其他分析方法相比,地理探测器具有以下优势^[15]:①既可以探测数值型数据,也可以探测定性数据;②可以判断两个自变量是否存在交互作用,以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性;③地理探测器 Q 值具有明确的物理含义,能够客观地表明自变量解释了 $Q \times 100\%$ 的因变量。虽然地理探测器具有强大的因子探测能力,但是尚未有学者将地理探测器用于统计降水降尺度环境因子分析。

本文以滦河流域为研究对象,使用 DEM 数据和 2018 年卫星遥感产品提取经度、纬度、高程、NDVI、坡度和坡向 6 项环境因子,利用地理探测器定量分析了 IMERG 卫星降水空间分布的影响因子、多因子的交互作用及多因子的差异性。

1 研究区概况与数据选取

1.1 研究区概况

滦河流域(115°30'E~118°45'E,39°10'N~42°40'N)位于辽宁省、河北省和内蒙古自治区的交界地带,流域面积 44 750 km²,地形差异较大,地形总趋势由西北向东南倾斜。滦河上游为坝上高原,海拔高度为 1 300~1 400 m;中部为燕山山地,地形复杂,海拔高度 1 000~1 800 m;东南部主要为平原,海拔在 1 000 m 以下(图 1)。滦河流域位于半湿润半干旱过渡带,气候复杂多变,年平均气温为 1~11℃,多年平均降水量 400~800 mm。滦河流域是我国北方重要的生态屏障区,其降水的时空分布差异非常明显^[16],具有典型性和代表性。作为引滦入津工程的重要水源地^[17],对其进行水资源管理和保护具有重要的意义。

图 2 为 2018 年滦河流域的年降水量分布情况,滦河流域降水由东南向西北递减^[18],呈现明显的条带状空间分布特征。降水主要集中在东南部的平原地带,年降水量超过 650 mm,向西北坝上高原方向降水量逐渐减少,坝上高原区降水量小于 450 mm。

1.2 研究数据

1.2.1 环境因子

根据 Jia 等^[8-12]研究结果,选择 NDVI、高程、坡度、坡向、经度和纬度^[19]作为本文的环境因子进行因子探测、交互探测和生态探测。

1.2.2 数据来源

使用的数据包括空间分辨率为 0.1°的 IMERG(integrated multi-satellite retrievals for global precipitation

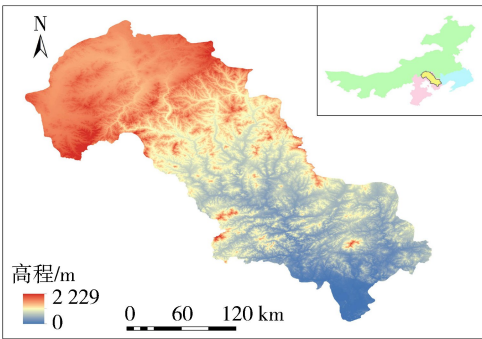


图 1 滦河流域范围及高程

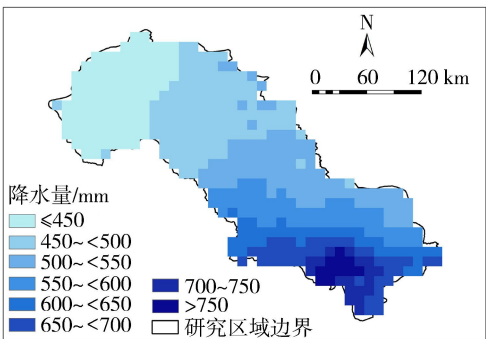


图 2 降水空间分布

Fig. 1 Scope and elevation of the Luanhe River Basin **Fig. 2 Spatial distribution of precipitation**

measurement) 卫星降水产品以及统一分辨率为 0.1° 的 NDVI、高程、坡度、坡向、经度和纬度等环境因子。其中 IMERG、NDVI 为下载的卫星产品;在 90 m 分辨率的 DEM 下通过 ArcGIS 提取坡度、坡向和高程数据,并将坡度、坡向和高程数据重采样至 0.1° 分辨率与其他数据相匹配;提取 0.1° 高程数据的中心经纬度作为经纬度信息。卫星产品来源见表 1。

表 1 数据来源及信息
Table 1 Data sources and information

数据	来源		信息		
	机构	网址	时间	分辨率	数据格式
IMERG	美国国家航天航空局	https://search.earch.earth-data.nasa.gov/	2018 年逐日数据	0.1°	NetCDF
NDVI	陆地过程分布式主动档案中心	https://lpdaac.usgs.gov/	2018 年逐月数据	1 km	HDF
	比利时弗莱芒技术研究所	https://www.vito-eodata.be/	2018 年逐旬数据	1 km	HDF
DEM	地理空间数据云	https://www.gscloud.cn	2018 年 DEM 数据	90 m	TIF

2 研究方法

2.1 地理探测器原理

利用地理探测器定量分析影响降水空间分布的环境因子,其核心思想是^[15]:若 NDVI、高程、坡度、坡向、经度、纬度中某个环境因子对降水空间分布有重要的影响,则其与降水空间分布应该具有相似性。地理探测器主要包括因子探测、交互探测、生态探测 3 种类型。

2.1.1 因子探测

用于分析环境因子对降水空间分布的解释力,表达式为

$$Q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

(1)

式中: h 为因变量或自变量的分类; N_h 、 N 分别为 h 类和全区的单元数; σ_h^2 、 σ^2 分别为 h 类和全区的因变量方差。 Q 值计算的是单个环境因子所有类别对应的降水数据方差之和与降水数据总体方差的比值,可以看出 Q 值的本质是比较环境因子与降水空间分布的相似性^[15]。而单个环境因子的 Q 值并不会受其他环境因子的影响,所以环境因子之间是否存在共线性问题并不影响 Q 值的结果,能实现真正的多自变量共线性免疫。环境因子是类型量,其值只用来划分类型,并不直接参与 Q 值的计算。由式(1)可以明显看出, Q 值的计算属于方差分析范畴,物理含义明确,所以能够有效地做到对变量无线性假设,并保障多自变量共线性免疫。

结合其他降水降尺度环境因子的选择及地理探测器在其他领域设置的阈值^[20],最终选择影响力大于 10% 作为主要影响因子,能够显著影响降水的空间分布;影响力大于 1% 且小于 10% 作为次要影响因子,能够与其他因子交互对降水空间分布产生显著的影响;影响力小于 1% 的环境因子对降水空间分布无直接影响,且与其他因子的交互不会起太大的作用。

2.1.2 交互探测

用于分析环境因子的交互作用对降水空间分布的影响。通过比较自变量 X_1 和 X_2 的 $Q(X_1)$ 和 $Q(X_2)$ 及

其叠加变量 $X_1 \cap X_2$ 的 $Q(X_1 \cap X_2)$, 分析其交互作用。交互类型包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种类型^[15]。

2.1.3 生态探测

用以比较不同环境因子对降水空间分布的影响是否有显著的差异。用 F 统计量来衡量, 正则假设 H_0 为: X_1 和 X_2 的层内方差之和相等, 如果在 $\alpha=0.05$ ^[15] 的显著性水平上拒绝 H_0 , 则表明 2 个自变量对因变量空间分布的影响存在显著差异。

2.2 环境因子的分级方法

利用地理探测器分析环境因子对降水空间分布影响的重要环节是讨论可塑性面积单元问题(modifiable areal unit problem, MAUP)。MAUP 包括尺度效应和分区效应两方面^[21], 前者讨论空间统计格网大小对地理探测器模型的影响, 后者讨论自变量离散方法及分类数量对地理探测器模型的影响。

为保证卫星降水数据的分辨率, 空间统计格网的大小应与 IMERG 产品的分辨率保持一致, 以避免尺度效应的影响。针对分区效应, 选择等距分类(equal)、自然断点分类(natural)、分位数分类(quantile)、几何分类(geometrical)和标准差分类(sd)5 种离散方法, 并将自变量分为 3~9 类分别计算 Q 值^[22], 选择 Q 值最大的组合作为离散方法和分类数量的最佳组合。

图 3 以年尺度为例展示了离散方法与分类数量组合选取过程。图 4 为使用最佳组合得到的自变量分区, 其中红色竖直线为不同分区的分隔线。表 2 为年尺度最佳组合的结果。

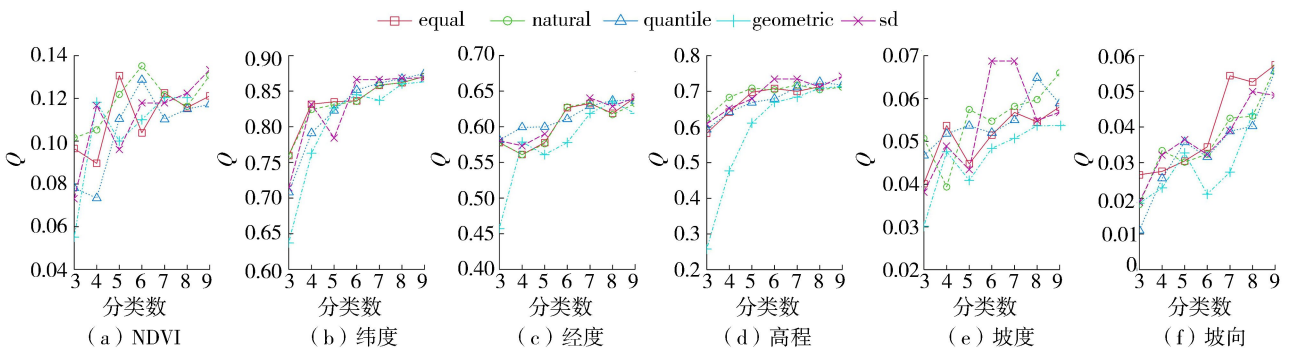


图 3 离散方法与分类数组合

Fig. 3 Discrete methods and categorical number combinations

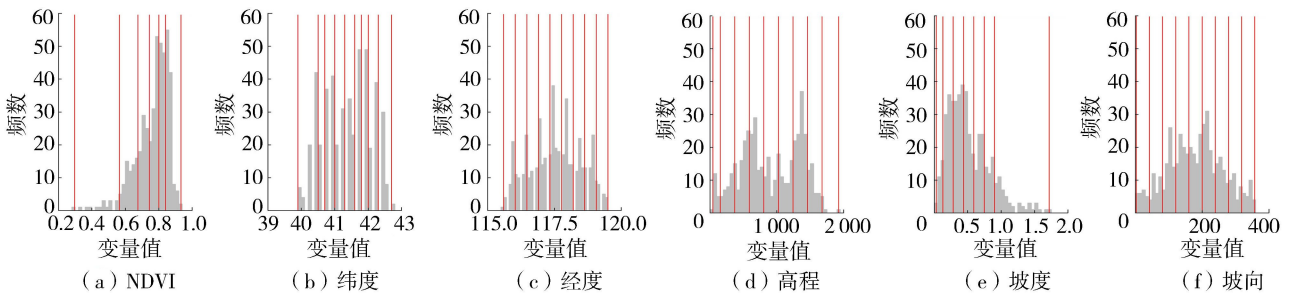


图 4 最终分类结果

Fig. 4 Final classification results

3 结果与分析

3.1 因子探测

表 3 统计了年、季尺度各环境因子对降水空间分布影响力大小。年尺度下, 纬度、高程、经度和 NDVI 的影响力超过 10%, 为主要因素, 其中纬度影响最大。坡度、坡向的影响力超过 1% 但小于 10%, 为次要因素。环境因子的影响力均超过 1%, 说明该 6 项因子均对降水空间分布有直接影响。季尺度下, 春季降水主要受纬

表 2 分区效应最优组合

Table 2 Optimal combination of zoning effects

环境因子	离散方法	分类数量
NDVI	标准差分类	9
纬度	分位数分类	9
经度	等距分类	9
高程	标准差分类	9
坡度	标准差分类	6
坡向	等距分类	9

度、经度、高程和 NDVI 的影响;夏季降水主要受纬度、高程、经度和 NDVI 的影响;秋季降水主要受经度、纬度、高程、NDVI 和坡向的影响;冬季降水主要受经度、纬度和高程的影响。对比 4 个季度的环境因子 Q 值, Q 值前三的环境因子均为纬度、经度和高程;不同季节环境因子的 Q 值有所差别,春季、夏季、冬季降水受纬度的影响最大, Q 值均超过 0.8,其中春冬两季第二影响因子为经度,夏季第二影响因子为高程,秋季最大影响因子为经度且 Q 值超过 0.53。

表 4 为月尺度下各环境因子对降水空间分布的影响力大小。不同月各环境因子的 Q 值虽有所变化,但除 6 月外前 3 个贡献因子仍然是纬度、经度、高程。12 个月中,1 月、3 月、8 月、11 月和 12 月纬度、经度和 DEM 的影响力均超过 25%,为主要因素,NDVI、坡度和坡向影响力超过 1%但低于 10%,为次要因素;其他月主要因素为经度、纬度、DEM 和 NDVI,次要因素为坡度和坡向。12 月中,有 7 月纬度为第一贡献因子,分别是 1 月、2 月、4 月、7 月、8 月、10 月、12 月;其余 5 个月第一贡献因子为经度;只有 1 月、2 月第一贡献因子 Q 值小于 0.5,其余月第一贡献因子的 Q 值均超过 0.63,其中 Q 值超过 0.8 的有 6 个月,4 月和 10 月的 Q 值均达 0.92。

表 4 月尺度自变量因子探测

Table 4 Independent variable factor detection on monthly scale

月份	第一贡献因子		第二贡献因子		第三贡献因子		第四贡献因子		第五贡献因子		第六贡献因子	
	因子	Q 值	因子	Q 值	因子	Q 值	因子	Q 值	因子	Q 值	因子	Q 值
1	纬度	0.44	经度	0.26	高程	0.25	NDVI	0.06	坡度	0.04	坡向	0.04
2	纬度	0.46	高程	0.39	经度	0.28	NDVI	0.27	坡度	0.07	坡向	0.03
3	经度	0.68	纬度	0.52	高程	0.39	NDVI	0.08	坡向	0.07	坡度	0.05
4	纬度	0.92	经度	0.80	高程	0.78	NDVI	0.25	坡度	0.07	坡向	0.04
5	经度	0.85	纬度	0.80	高程	0.77	NDVI	0.26	坡度	0.09	坡向	0.06
6	经度	0.63	NDVI	0.47	高程	0.32	纬度	0.21	坡度	0.18	坡向	0.13
7	纬度	0.81	高程	0.68	经度	0.61	NDVI	0.23	坡度	0.11	坡向	0.04
8	纬度	0.85	高程	0.62	经度	0.43	坡向	0.07	NDVI	0.03	坡度	0.03
9	经度	0.67	纬度	0.51	高程	0.40	NDVI	0.16	坡向	0.09	坡度	0.07
10	纬度	0.92	高程	0.77	经度	0.56	NDVI	0.21	坡度	0.03	坡向	0.02
11	经度	0.67	纬度	0.42	高程	0.35	NDVI	0.09	坡度	0.06	坡向	0.04
12	纬度	0.82	经度	0.70	高程	0.66	坡向	0.06	NDVI	0.05	坡度	0.02

表 5 为旬尺度下各环境因子对降水空间分布的影响力大小。除 1 月中下旬、2 月中旬和 11 月中旬,其他 32 旬前 3 个贡献因子均为经度、纬度和高程。1 月中下旬、2 月中旬和 11 月中旬的因子影响力偏低,均低于 30%。分析其主要原因,秋冬季北方降水更易受冷空气的影响,高程对降水空间分布的影响减弱,降水与 NDVI 的关系增强。1 月中旬环境因子对降水空间分布的影响力最低,所有因子的影响力均低于 10%,为次要因子,其次是 9 月上旬和 11 月下旬,只有一个主要因子,分别为经度和纬度,其余皆为次要因子。

整体来看,在年、季、月和旬尺度上,经度、纬度和高程都起到了主导降水空间分布的作用,结合图 2 可知,滦河流域降水空间分布呈现由东南向西北递减的趋势,这使得经度、纬度和降水空间分布出现较高的相似性,使得 Q 值相较于其他因子更高。由图 1 可知,滦河流域由东南部平原到中部山地再到西北部坝上高原,高程逐渐增加,降水逐渐减少,造成高程的离散化结果与降水的空间分布具有明显的相似性,也使高程的 Q 值较高。随着春夏季节植被的增加,蒸腾作用的增强,NDVI 对降水的影响力也随之增大。坡度和坡向的影响力均小于 10%,单因子对降水的影响并不明显。

3.2 交互探测

降水空间分布受环境因子的综合影响。环境因子的交互可能会提升或减弱单个因子的影响力。图 5 为年、季尺度环境因子的交互结果。由图 5(a)可以发现年尺度下环境因子两两交互均起到了增强作用。其中经度和纬度交互的 Q 值达到了 0.97。图 5(b)~(e)为季尺度环境因子的交互结果,季尺度下所有环境因子的交互作用均为增强,相较于单个环境因子,交互作用的 Q 值均有较大幅度的提升。 Q 最大值均为经度-纬

表 3 年、季尺度自变量因子探测

Table 3 Annual and seasonal scale independent variable factor detection

环境因子	Q 值				
	年度	春季	夏季	秋季	冬季
NDVI	0.13	0.16	0.14	0.15	0.05
纬度	0.88	0.87	0.83	0.29	0.80
经度	0.64	0.76	0.67	0.53	0.65
高程	0.74	0.69	0.72	0.22	0.62
坡度	0.07	0.04	0.08	0.07	0.02
坡向	0.04	0.04	0.07	0.11	0.05

表 5 旬尺度自变量因子探测

Table 5 Independent variable factor detection on tenday scale

旬	第一因子		第二因子		第三因子		第四因子		第五因子		第六因子	
	因子	<i>Q</i> 值	因子	<i>Q</i> 值	因子	<i>Q</i> 值	因子	<i>Q</i> 值	因子	<i>Q</i> 值	因子	<i>Q</i> 值
1 月上旬	纬度	0.43	经度	0.38	高程	0.34	坡向	0.04	NDVI	0.02	坡度	0.02
1 月中旬	坡度	0.06	纬度	0.03	NDVI	0.03	高程	0.03	坡向	0.02	经度	0.02
1 月下旬	经度	0.20	纬度	0.18	NDVI	0.09	高程	0.09	坡度	0.03	坡向	0.02
2 月上旬	高程	0.23	纬度	0.18	经度	0.05	坡向	0.05	NDVI	0.05	坡度	0.02
2 月中旬	纬度	0.29	高程	0.20	NDVI	0.19	经度	0.18	坡度	0.08	坡向	0.04
2 月下旬	纬度	0.32	经度	0.27	高程	0.26	NDVI	0.13	坡度	0.06	坡向	0.04
3 月上旬	纬度	0.56	高程	0.48	经度	0.38	NDVI	0.05	坡向	0.05	坡度	0.04
3 月中旬	纬度	0.73	经度	0.50	高程	0.39	NDVI	0.06	坡向	0.05	坡度	0.04
3 月下旬	经度	0.38	纬度	0.38	高程	0.35	NDVI	0.19	坡度	0.15	坡向	0.06
4 月上旬	纬度	0.32	经度	0.24	高程	0.17	坡向	0.07	NDVI	0.07	坡度	0.03
4 月中旬	经度	0.68	纬度	0.41	高程	0.36	NDVI	0.08	坡度	0.05	坡向	0.02
4 月下旬	纬度	0.66	高程	0.52	经度	0.48	NDVI	0.27	坡度	0.09	坡向	0.05
5 月上旬	纬度	0.78	高程	0.58	经度	0.54	NDVI	0.14	坡向	0.09	坡度	0.04
5 月中旬	经度	0.80	纬度	0.67	高程	0.65	NDVI	0.16	坡度	0.09	坡向	0.04
5 月下旬	纬度	0.58	高程	0.37	经度	0.19	NDVI	0.12	坡度	0.11	坡向	0.06
6 月上旬	纬度	0.59	高程	0.46	经度	0.43	坡度	0.06	坡向	0.02	NDVI	0.02
6 月中旬	纬度	0.41	经度	0.40	高程	0.34	NDVI	0.26	坡向	0.06	坡度	0.06
6 月下旬	纬度	0.47	高程	0.24	经度	0.19	NDVI	0.09	坡度	0.07	坡向	0.04
7 月上旬	经度	0.21	纬度	0.11	高程	0.06	坡向	0.05	NDVI	0.04	坡度	0.03
7 月中旬	纬度	0.54	高程	0.45	经度	0.40	NDVI	0.07	坡度	0.03	坡向	0.02
7 月下旬	纬度	0.82	高程	0.75	经度	0.73	NDVI	0.19	坡度	0.11	坡向	0.07
8 月上旬	纬度	0.64	高程	0.47	经度	0.28	NDVI	0.07	坡向	0.05	坡度	0.04
8 月中旬	纬度	0.82	经度	0.72	高程	0.69	坡向	0.06	NDVI	0.05	坡度	0.02
8 月下旬	纬度	0.90	高程	0.66	经度	0.49	NDVI	0.18	坡度	0.10	坡向	0.04
9 月上旬	经度	0.25	纬度	0.09	高程	0.05	NDVI	0.04	坡度	0.03	坡向	0.03
9 月中旬	纬度	0.53	高程	0.21	经度	0.17	NDVI	0.12	坡度	0.05	坡向	0.04
9 月下旬	经度	0.33	纬度	0.29	高程	0.17	NDVI	0.12	坡度	0.08	坡向	0.05
10 月上旬	纬度	0.44	高程	0.40	经度	0.36	NDVI	0.19	坡度	0.09	坡向	0.07
10 月中旬	纬度	0.81	高程	0.69	经度	0.34	NDVI	0.06	坡度	0.04	坡向	0.03
10 月下旬	纬度	0.47	经度	0.42	高程	0.28	NDVI	0.09	坡度	0.05	坡向	0.03
11 月上旬	经度	0.66	纬度	0.42	高程	0.35	NDVI	0.08	坡度	0.06	坡向	0.04
11 月中旬	经度	0.12	纬度	0.10	NDVI	0.07	坡向	0.04	高程	0.03	坡度	0.02
11 月下旬	纬度	0.16	经度	0.06	高程	0.04	坡向	0.03	NDVI	0.03	坡度	0.03
12 月上旬	经度	0.71	纬度	0.46	高程	0.35	NDVI	0.04	坡向	0.04	坡度	0.01
12 月中旬	纬度	0.64	高程	0.55	经度	0.30	坡度	0.08	NDVI	0.06	坡向	0.04
12 月下旬	纬度	0.62	高程	0.49	经度	0.22	坡向	0.06	坡度	0.05	NDVI	0.03

度的交互,其中春季、夏季、秋季、冬季的*Q* 最大值分别为 0.97、0.97、0.87 和 0.93。4 个季度对比发现,秋季受限于单个环境因子的影响力,交互作用下*Q* 值偏低。

表 6 为 12 个月环境因子交互结果,只有 2 月坡度与 DEM 的交互结果为单因子非线性减弱,其他月以及其他因子的交互结果均为增强。与其他时间尺度相同,交互结果的最大*Q* 值均为经度和纬度的交互结果。其中 4、5、7、8、10、12 月的*Q* 最大值超过了 0.95。其他月的*Q* 最大值也均超过了 0.6,说明因子之间的交互结果能够更好地影响降水的分布特征。

表 7 为 2018 年 36 旬环境因子交互作用的结果,其中 ND 表示 NDVI,LA 代表纬度,LO 代表经度,DE 代表高程,SL 代表坡度,AS 代表坡向。只有 7 月上旬 NDVI 与经度的交互结果为单因子非线性减弱,其余环境因子的交互结果均为增强。其中,1 月上旬和 2 月上旬最大交互结果为纬度与坡向的交互,其他旬最大交互结果为纬度与经度的交互。且最大交互结果的影响力均超过 20%,说明在旬尺度下,交互作用能够更好地反映降水的空间分布。

由图 5、表 6、表 7 可知,年、季、月和旬尺度环境因子最优交互结果几乎全为经度-纬度,并且交互作用均为增强。主要因为降水量由东南向西北递减,经度-纬度的交互作用更能体现降水的这种分布情况。同样其

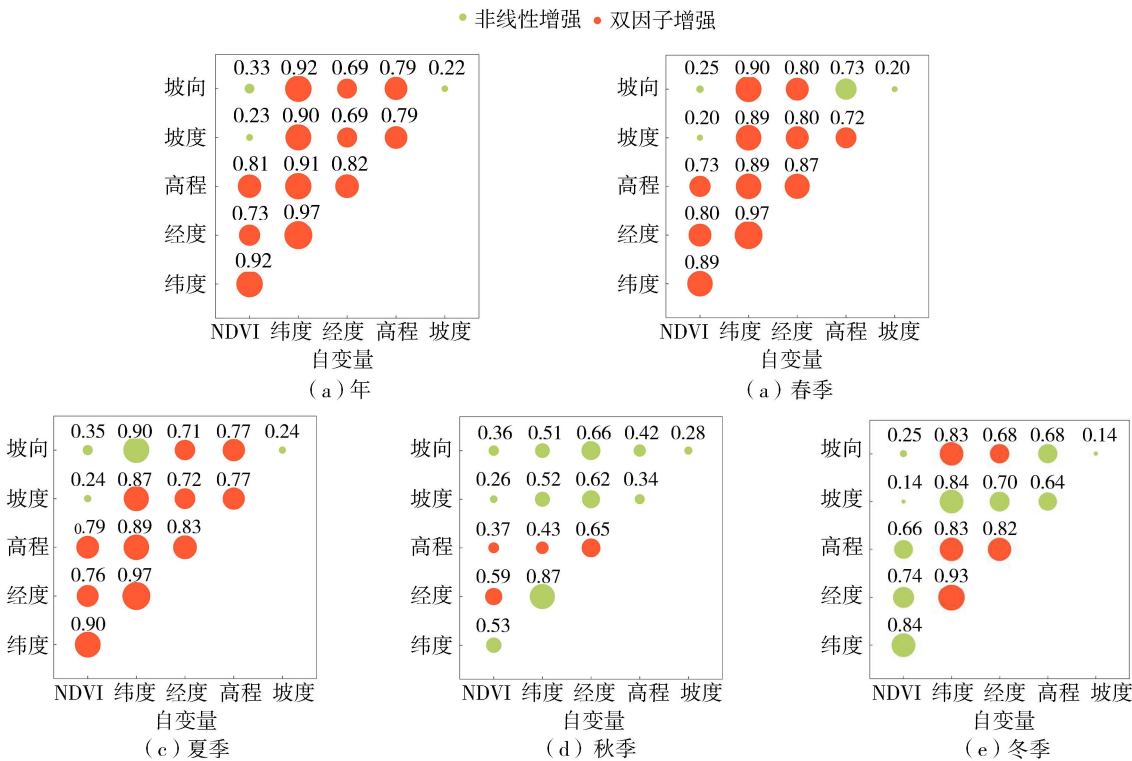


图 5 年、季尺度自变量交互探测

Fig. 5 Interaction detection of independent variables on annual and seasonal scales

表 6 月尺度自变量交互作用探测

Table 6 Interaction detection of independent variables on monthly scale

交互因子	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
NDVI-纬度	0.54	0.57	0.60	0.94	0.83	0.58	0.85	0.90	0.66	0.95	0.56	0.86
NDVI-经度	0.33	0.56	0.77	0.85	0.87	0.74	0.68	0.62	0.71	0.69	0.72	0.78
NDVI-高程	0.33	0.46	0.45	0.83	0.84	0.64	0.78	0.65	0.48	0.86	0.46	0.69
NDVI-坡度	0.14	0.34	0.19	0.35	0.28	0.53	0.31	0.13	0.23	0.29	0.23	0.17
NDVI-坡向	0.20	0.35	0.27	0.38	0.33	0.54	0.32	0.27	0.37	0.34	0.31	0.27
纬度-经度	0.61	0.70	0.86	0.98	0.97	0.86	0.95	0.95	0.89	0.97	0.78	0.96
纬度-高程	0.54	0.53	0.56	0.94	0.87	0.54	0.84	0.89	0.58	0.94	0.46	0.86
纬度-坡度	0.51	0.55	0.65	0.94	0.83	0.45	0.84	0.89	0.62	0.93	0.51	0.88
纬度-坡向	0.57	0.58	0.64	0.95	0.87	0.56	0.85	0.90	0.66	0.95	0.54	0.86
经度-高程	0.37	0.56	0.80	0.90	0.92	0.73	0.78	0.77	0.70	0.81	0.72	0.84
经度-坡度	0.33	0.41	0.76	0.82	0.87	0.71	0.66	0.56	0.70	0.62	0.73	0.75
经度-坡向	0.38	0.39	0.75	0.83	0.87	0.71	0.67	0.51	0.75	0.62	0.73	0.72
高程-坡度	0.38	0.39	0.49	0.82	0.82	0.55	0.74	0.64	0.45	0.79	0.44	0.70
高程-坡向	0.39	0.42	0.49	0.81	0.82	0.51	0.73	0.70	0.51	0.80	0.44	0.72
坡度-坡向	0.19	0.24	0.23	0.22	0.20	0.36	0.23	0.16	0.19	0.154	0.24	0.20

注: ■非线性增强; ■双因子增强; ■单因子非线性减弱

他因子与高程的交互起到了增强的效果,且因子探测中表现不佳的单因子与其他因子的交互作用也起到了不凡的增强效果。

3.3 生态探测

生态探测用于探测年尺度、季尺度、月尺度和旬尺度下,不同组合的两个环境因子对降水分布的影响是否存在显著性差异。

在年尺度下,所有环境因子对降水分布的影响均存在显著性差异。在季尺度下,春季经度-高程、坡度-坡向,夏季经度-高程,冬季 NDVI-坡向、经度-高程不存在显著性差异。而秋季所有因子均存在显著性差异。

月尺度下,由 12 月与 6 个因子两两组合所形成的 180 个结果中存在 10 个差异不显著的结果,占全部结果的 6%。12 月中 1 月、4 月、5 月、7 月和 12 月经度-高程对降水分布的影响无显著性差异。另外 1 月坡度-坡向、2 月 NDVI-经度、5 月纬度-经度和纬度-高程、12 月 NDVI-坡向对降水分布的影响无显著性差异。其余

表 7 旬尺度自变量交互作用探测

Table 7 Interaction detection of independent variables on tenday scale

旬 _o	ND-LA _o	ND-LO _o	ND-DE _o	ND-SL _o	ND-AS _o	LA-LO _o	LA-DE _o	LA-SL _o	LA-AS _o	LO-DE _o	LO-SL _o	LO-AS _o	DE-SL _o	DE-AS _o	SL-AS _o
1 月上旬	0.52	0.48	0.37	0.09	0.22	0.58	0.50	0.55	0.59	0.53	0.46	0.53	0.39	0.44	0.15
1 月中旬	0.16	0.11	0.11	0.19	0.19	0.21	0.09	0.18	0.13	0.12	0.18	0.14	0.16	0.19	0.20
1 月下旬	0.31	0.30	0.18	0.24	0.18	0.58	0.33	0.29	0.30	0.28	0.26	0.29	0.22	0.25	0.17
2 月上旬	0.37	0.15	0.29	0.14	0.16	0.41	0.40	0.29	0.46	0.33	0.24	0.24	0.32	0.44	0.20
2 月中旬	0.38	0.33	0.29	0.23	0.30	0.45	0.35	0.37	0.43	0.34	0.31	0.29	0.26	0.33	0.21
2 月下旬	0.39	0.48	0.29	0.22	0.28	0.58	0.35	0.40	0.49	0.46	0.45	0.41	0.33	0.40	0.24
3 月上旬	0.63	0.69	0.53	0.20	0.25	0.78	0.58	0.64	0.65	0.68	0.57	0.51	0.54	0.49	0.22
3 月中旬	0.78	0.62	0.46	0.16	0.24	0.90	0.76	0.78	0.81	0.67	0.62	0.54	0.48	0.49	0.18
3 月下旬	0.51	0.48	0.51	0.33	0.24	0.63	0.47	0.51	0.45	0.52	0.49	0.43	0.50	0.39	0.22
4 月上旬	0.57	0.43	0.34	0.17	0.21	0.78	0.45	0.50	0.59	0.57	0.41	0.44	0.29	0.39	0.26
4 月中旬	0.61	0.75	0.51	0.19	0.26	0.90	0.59	0.59	0.60	0.77	0.77	0.75	0.50	0.49	0.21
4 月下旬	0.77	0.58	0.63	0.35	0.37	0.87	0.78	0.71	0.75	0.66	0.57	0.63	0.62	0.59	0.23
5 月上旬	0.90	0.62	0.66	0.24	0.39	0.94	0.85	0.82	0.88	0.69	0.61	0.64	0.61	0.67	0.20
5 月中旬	0.76	0.85	0.75	0.25	0.29	0.93	0.73	0.72	0.77	0.88	0.83	0.83	0.73	0.71	0.18
5 月下旬	0.74	0.46	0.47	0.28	0.27	0.80	0.64	0.70	0.69	0.51	0.39	0.39	0.49	0.52	0.25
6 月上旬	0.67	0.53	0.53	0.16	0.18	0.77	0.65	0.68	0.69	0.57	0.51	0.52	0.55	0.52	0.13
6 月中旬	0.58	0.48	0.48	0.34	0.36	0.76	0.49	0.51	0.58	0.49	0.49	0.48	0.42	0.44	0.20
6 月下旬	0.64	0.31	0.37	0.18	0.20	0.85	0.60	0.59	0.66	0.46	0.30	0.34	0.35	0.37	0.19
7 月上旬	0.32	0.18	0.19	0.17	0.19	0.43	0.21	0.27	0.31	0.24	0.30	0.24	0.20	0.20	0.21
7 月中旬	0.65	0.49	0.49	0.17	0.15	0.79	0.61	0.60	0.64	0.62	0.47	0.48	0.53	0.52	0.14
7 月下旬	0.89	0.78	0.83	0.34	0.41	0.95	0.88	0.87	0.89	0.84	0.77	0.77	0.81	0.80	0.28
8 月上旬	0.72	0.47	0.51	0.22	0.30	0.79	0.69	0.70	0.72	0.53	0.37	0.36	0.53	0.53	0.16
8 月中旬	0.86	0.83	0.73	0.17	0.30	0.93	0.85	0.85	0.85	0.87	0.76	0.75	0.72	0.74	0.20
8 月下旬	0.92	0.66	0.73	0.30	0.29	0.95	0.93	0.92	0.92	0.77	0.63	0.66	0.69	0.75	0.22
9 月上旬	0.27	0.47	0.14	0.16	0.14	0.71	0.18	0.29	0.36	0.44	0.36	0.32	0.20	0.18	0.15
9 月中旬	0.62	0.35	0.33	0.18	0.22	0.68	0.61	0.58	0.61	0.35	0.30	0.31	0.29	0.33	0.17
9 月下旬	0.45	0.45	0.32	0.21	0.24	0.73	0.37	0.45	0.51	0.47	0.42	0.45	0.30	0.30	0.20
10 月上旬	0.60	0.50	0.52	0.29	0.37	0.68	0.58	0.49	0.57	0.51	0.47	0.49	0.48	0.50	0.19
10 月中旬	0.82	0.54	0.71	0.23	0.24	0.89	0.80	0.82	0.81	0.74	0.50	0.47	0.72	0.74	0.18
10 月下旬	0.58	0.54	0.40	0.22	0.18	0.80	0.53	0.59	0.60	0.59	0.54	0.52	0.41	0.38	0.24
11 月上旬	0.57	0.71	0.48	0.19	0.31	0.79	0.50	0.52	0.54	0.72	0.70	0.72	0.45	0.44	0.15
11 月中旬	0.22	0.31	0.21	0.17	0.26	0.36	0.24	0.22	0.23	0.25	0.22	0.23	0.20	0.22	0.15
11 月下旬	0.26	0.39	0.17	0.13	0.33	0.51	0.24	0.31	0.26	0.20	0.20	0.23	0.15	0.22	0.14
12 月上旬	0.58	0.77	0.44	0.10	0.22	0.83	0.48	0.54	0.64	0.75	0.73	0.73	0.43	0.42	0.13
12 月中旬	0.68	0.64	0.58	0.21	0.34	0.77	0.66	0.70	0.73	0.66	0.58	0.36	0.63	0.57	0.31
12 月下旬	0.70	0.34	0.57	0.17	0.25	0.85	0.70	0.65	0.73	0.65	0.40	0.40	0.62	0.62	0.17

注: 非线性增强; 双因子增强; 单因子非线性减弱

结果均造成了显著性差异。

旬尺度下,差异不显著结果有 36 个占总结果的 7%。包含了 NDVI-经度、NDVI-高程、NDVI-坡度、NDVI-坡向、纬度-经度、纬度-高程、经度-高程、经度-坡向、坡度-坡向。其中有 10 旬的经度-高程对降水分布的影响无显著性差异。在年、季、月和旬尺度,整体上不同因子对降水分布影响有显著的差异,因子之间差异不显著结果占比小于 7%。

4 结 论

a. 不同时间尺度下降水空间分布的主导因子有所差异,年尺度以及春季、夏季、冬季的主导因子为纬度,且影响力超过 80%,秋季的主导因子为经度,影响力为 53%。月尺度的 3 月、5 月、6 月、9 月和 11 月主导因子为经度,其余月为纬度,且影响力均超过 44%。旬尺度下,1 月中旬主导因子为坡度,2 月上旬主导因子为高程,其他旬主导因子均为经度和纬度,且平均影响力超过 51%。

b. 在不同时间尺度环境因子的交互探测中,只有 2 月高程-坡度及 7 月上旬 NDVI-经度的交互作用为单因子非线性减弱,其余交互作用均起到了增强的效果。交互结果的影响力均超过 10%,与单因子影响力相比有较大幅度的提升。

c. 在年、季和月尺度下,纬度-经度的交互作用影响力最大,超过 60%。旬尺度下,只有 1 月上旬和 2 月上旬最大 Q 值为纬度-坡向的交互作用,其余均为经度-纬度的交互作用。

d. 生态探测结果表明,整体上不同环境因子对降水空间分布的影响差异显著。其中有显著性差异的结果在所有结果中占比超过 90%。

e. 影响降水空间分布的环境因子在年、季、月尺度有较大变化。从整体上看,经度、纬度和高程对降水空间分布的影响显著,这也符合季风气候区降水量由东南向西北递减的客观规律。交互探测发现,原本影响力较小的 NDVI、坡度和坡向,在与其他因子交互之后起到了不俗的增强效果。生态探测发现,不同环境因子对降水空间分布影响差异与时间尺度有密切联系,这为统计降水降尺度研究提供了基础。6 个环境因子在年尺度和秋季的单因子影响力均超过 6%,且交互作用的影响力超过 22%,对降水空间分布的影响差异显著,可以都被选择进行降尺度模型构建。对春冬季来说,单因子影响力较弱且与其他因子差异不显著的环境因子可以适当删除,这样在不影响计算精度的情况下能够提升模型的计算效率。后续还应增加更多的潜在环境因子^[23-24],并增加监督分类方法使 MAUP 问题更加严密完整。

参考文献:

- [1] XU Guanghua, XU Xianli, LIU Meixian, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation product using a combined multifractal and regression approach: demonstration for South China[J]. Water, 2015, 7(6): 3083-3102.
- [2] 陈华, 盛晟, 夏润亮, 等. 基于矩阵分解的降水时空插值方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 35-41. (CHEN Hua, SHENG Sheng, XIA Runliang, et al. Spatiotemporal interpolation method of rainfall based on matrix decomposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 35-41. (in Chinese))
- [3] ALEXAKIS D D, TSANIS I K. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network models for downscaling TRMM precipitation products using MODIS data[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(14): 1-13.
- [4] 蒋云钟, 冶运涛, 王浩. 智慧流域及其应用前景[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1174-1181. (JIANG Yunzhong, YE Yuntao, WANG Hao. Smart basin and its prospects for application[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(6): 1174-1181. (in Chinese))
- [5] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI[J]. Journal Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [6] 熊立华, 刘成凯, 陈石磊, 等. 遥感降水资料后处理研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 627-637. (XIONG Lihua, LIU Chengkai, CHEN Shilei, et al. Review of post-processing for remote-sensing precipitation products[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 627-637. (in Chinese))
- [7] 徐宗学, 刘浏. 太湖流域气候变化检测与未来气候变化情景预估[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 1-7. (XU Zongxue, LIU Liu. Detection of climate change and projection of future climate change scenarios in Taihu Lack Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 1-7. (in Chinese))
- [8] JIA Shaofeng, ZHU Wenbin, LU Aifeng, et al. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3069-3079.
- [9] CHEN Shaodan, ZHANG Liping, SHE Dunxian, et al. Spatial downscaling of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) annual and monthly precipitation data over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China[J]. Water, 2019, 11(3): 568.
- [10] XIE Shengjin, LIU Yonghe, YAO Fengxin. Spatial downscaling of TRMM precipitation using an optimal regression model with NDVI in inner Mongolia, China[J]. Water Resources, 2020, 47(6): 1054-1064.
- [11] 宁珊, 张正勇, 刘琳, 等. TRMM 偏最小二乘降尺度降水模型在新疆不同地貌的适应性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 99-109. (NING Shan, ZHANG Zhengyong, LIU Lin, et al. Adaptability of precipitation method based on TRMM data combined with partial least squares downscaling in different landforms of Xinjiang, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of the CSAE), 2020, 36(12): 99-109. (in Chinese))
- [12] 范田亿, 张翔, 黄兵, 等. TRMM 卫星降水产品降尺度及其在湘江流域水文模拟中的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 179-188. (FAN Tianyi, ZHANG Xiang, HUANG Bing, et al. Downscaling of TRMM satellite precipitation products and its application in hydrological simulation of Xiangjiang River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of the CSAE), 2021, 37(15): 179-188. (in Chinese))

[13] 顾晶晶,冶运涛,董甲平,等. 滦河流域遥感反演降水产品高精度空间降尺度方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021,19(5):862-873. (GU Jingjing, YE Yuntao, DONG Jiaping, et al. A high-precision spatial downscaling method for remotely sensed precipitation data in the Luanhe River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(5):862-873. (in Chinese))

[14] 彭娜,周立志. 基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动因子分析[J]. 水资源保护,2021,37(6):168-176. (PENG Na,ZHOU Lizhi. Analysis of wetland landscape pattern variation and its factors of Caizi Lake group based on geodetector [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):168-176. (in Chinese))

[15] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector:principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116-134. (in Chinese))

[16] 张璇,许杨,郝芳华,等. 滦河流域气象干旱向水文干旱传播特征及风险分析[J]. 水利学报,2022,53(2):165-175. (ZHANG Xuan, XU Yang, HAO Fanghua, et al. Characteristics and risk analysis of drought propagation from meteorological drought to hydrological drought in Luanhe River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(2):165-175. (in Chinese))

[17] 赵勇,何凡,何国华,等. 对南水北调工程效益拓展至滦河流域的若干思考[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):62-69. (ZHAO Yong, HE Fan, HE Guohua, et al. Thoughts on extending strategic benefit of South-to-North Water Diversion Project to Luanhe River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):62-69. (in Chinese))

[18] 门宝辉,牛晓赞,刘灿均,等. 滦河承德段水环境容量计算及初始分配[J]. 水资源保护,2022,38(2):168-175. (MEN Baohui, NIU Xiaoyun, LIU Canjun, et al. Calculation and initial allocation of water environmental capacity in Chengde section of Luanhe River [J]. Water Resources Protection,2022,38(2):168-175. (in Chinese))

[19] SHI Yuli, SONG Lei, XIA Zhen, et al. Mapping annual precipitation across mainland China in the period 2001—2010 from TRMM3B43 product using spatial downscaling approach[J]. Remote Sensing,2015,7(5):5849-5878.

[20] 王炜,刘海新,高叶鹏,等. 基于地理探测器的太行山 NDVI 时空变化及其驱动力分析[J]. 江西农业学报,2021,33(6):98-104. (WANG Wei, LIU Haixin, GAO Yepeng, et al. Analysis of spatiotemporal changes and driving forces of NDVI in Taihang Mountain based on geographic detector[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2021,33(6):98-104. (in Chinese))

[21] 李海萍. 空间统计分析中的 MAUP 及其影响[J]. 统计与决策,2009(22):15-17. (LI Haiping. MAUP and its influence in spatial statistical analysis[J]. Statistics & Decision,2009(22):15-17. (in Chinese))

[22] SONG Yongze, WANG Jinfeng, GE Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis:cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing,2020,57(5):593-610.

[23] CHEN Cheng, ZHAO Shuhe, DUAN Zheng, et al. An improved spatial downscaling procedure for TRMM 3B43 precipitation product using geographically weighted regression[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2015,8(9):4592-4604.

[24] WU Dan, JIANG Zhihong, MA Tingting. Projection of summer precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin using multimodel statistical downscaling based on canonical correlation analysis[J]. Journal of Meteorological Research,2016,30(6):867-880.

(收稿日期:2022-05-04 编辑:胡新宇)