

DOI: 10.20103/j.stxb.202401020006

赵安周, 李子洋, 承达瑜. 海河流域饱和水汽压差时空演变及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(1): 385-394.

Zhao A Z, Li Z Y, Cheng D Y. Temporal and spatial variation and influencing factors of saturated water vapor pressure difference in the Hai River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 385-394.

海河流域饱和水汽压差时空演变及其影响因素

赵安周^{1,2,*}, 李子洋¹, 承达瑜¹

1 河北工程大学, 矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038

2 河北工程大学, 邯郸市自然资源空间信息重点实验室, 邯郸 056038

摘要: 基于海河流域 1980—2022 年 126 个观测站点数据计算的饱和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD), 评估了 CRU TS 4.07、ERA5-Land 和 MERRA2 3 套全球网格数据计算的 VPD 在海河流域的适用性, 并采用趋势分析和相关分析等方法分析了年和季节 VPD 时空演变特征和影响因素。结果表明: ①ERA5-Land 数据集计算的海河流域 VPD 相较于其他 2 套网格数据的偏差 (BIAS) 和均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 更小, 拟合优度更好 ($R^2 = 0.9851$), 表明 ERA5-Land 数据集更适用于海河流域 VPD 长期变化研究; ②1980—2022 年海河流域年 VPD 值呈显著增加趋势 ($Trend = 0.027 \text{ kPa}/10\text{a}$, $P < 0.01$), VPD 在春季的增加速率最快, 秋季和冬季的增速较慢; ③海河流域 86.28% 的区域年 VPD 呈显著增加的趋势 ($P < 0.05$), 春季、夏季、秋季和冬季 VPD 呈显著上升的面积占比分别为 87.59%、63.57%、30.76% 和 77.48%; ④海河流域年和季节 VPD 与饱和水汽压 (Saturation Vapor Pressure, SVP) 的相关性高于实际水汽压 (Actual Vapor Pressure, AVP), VPD 与相对湿度的相关系数绝对值高于气温, 表明相对湿度对海河流域 VPD 的贡献高于气温。

关键词: 饱和水汽压差; 精度评价; 时空演变; 影响因素; 海河流域

Temporal and spatial variation and influencing factors of saturated water vapor pressure difference in the Hai River Basin

ZHAO Anzhou^{1,2,*}, LI Ziyang¹, CHENG Dayu¹

1 School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2 Key Laboratory of Natural Resources and Spatial Information, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

Abstract: Vapor pressure deficit (VPD), which defined as the difference between the saturated vapor pressure (SVP) and the actual water vapor pressure (AVP) at a selected temperature, is a key variable for measuring atmospheric aridity. It also plays an important role in modulating vegetation photosynthesis, carbon, and water exchanges. The continuously increasing VPD will lead to forest mortality, crop failures and reduced plant biomass. Analyzing its spatiotemporal characteristics and influencing factors provides a deeper understanding of the response mechanisms of terrestrial ecosystems to climate change. This study uses 126 site observations to evaluate the performance of the monthly scale VPD calculated by the Climate Research Unit gridded Time Series (CRU TS) 4.07, the fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Atmospheric reanalysis version 5 (ERA5), and Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2 (MERRA2) at the Hai River Basin in the period of 1980—2022. Annual and seasonal VPD change trends and influencing factors were also evaluated using the Sen's slope estimator and correlation analysis in the Hai River Basin over this period. The results show that: (1) Monthly VPD estimated from the ERA5 dataset has smaller BIAS and root mean square errors (RMSE) compared to the other two grid datasets, with $R^2 = 0.9851$. Therefore, the ERA5 dataset is the most

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171212); 河北省自然科学基金项目 (D2022402030, D2021402007)

收稿日期: 2024-01-02; **网络出版日期:** 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoanzhou@hebeu.edu.cn

suitable dataset for studying long-term VPD changes in the Hai River Basin. (2) There was a significant increasing trend of annual VPD in the Hai River Basin from 1980 to 2022, with a rate of 0.027kPa/10a ($P<0.01$). VPD exhibited an upward trend across all four seasons, with the highest rates in spring (Trend=0.0433kPa/10a, $P<0.01$) and summer (Trend=0.0405kPa/10a, $P<0.01$) and the lowest in winter (Trend=0.010kPa/10a, $P<0.01$) and autumn (Trend=0.0146kPa/10a, $P=0.051$). (3) Significant increases in annual VPD were observed in 86.28% of the Hai River Basin ($P<0.05$), and the strong increase were mainly located in the southeast of the basin. Seasonal increases in VPD were significant in spring (87.59%), summer (63.57%), autumn (30.76%), and winter (77.48%). (4) The annual and seasonal VPD in the Hai River Basin showed significant positively correlations with SVP and significant negative correlations with AVP, with a stronger correlation between VPD and SVP than AVP. Additionally, the absolute values of the correlations between VPD and relative humidity were higher than those between VPD and temperature, indicating that relative humidity has a greater impact on VPD than temperature. Overall, our findings emphasize the importance of using high-quality climate datasets to assess the spatiotemporal characteristics and influencing factors of VPD.

Key Words: vapor pressure deficit; accuracy evaluation; spatio-temporal pattern; influence factors; Hai River Basin

饱和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD) 是指特定温度下饱和水汽压 (Saturation Vapor Pressure, SVP) 与空气中实际水汽压 (Actual Vapor Pressure, AVP) 之间的差值, 是衡量植物大气需水量和干燥程度的重要指标和关键驱动要素^[1-3]。VPD 的变化不仅会影响光合作用等植被生理功能, 而且与植被死亡和森林火灾等极端事件密切相关, 进而影响陆地生态系统碳循环的过程^[4-6]。目前的研究表明全球大部分地区的 VPD 均呈现显著增加的趋势^[1,7], 一方面过高的 VPD 会导致植物气孔导度降低以及水分损失, 使得植物光合和生长速率减弱^[8], 另一方面, VPD 的增加会加快植物的蒸腾速率以及下垫面土壤水分流失, 进而限制植物碳吸收及水分利用效率, 引起植物死亡^[9-10]。因此, VPD 的时空变化特征受到决策者和科学家的广泛关注。

目前, 关于 VPD 时空演变及其影响因素的研究众多。在全球尺度, 程梦琦等^[11]基于英国东英吉利大学气候研究中心生产的 CRU TS (Climate Research Unit gridded Time Series) 月尺度的气温和实际水汽压数据计算了 1901—2020 年全球陆地的 VPD, 认为全球大气干旱在近 30 年进一步加剧, 温度和水分限制是导致低纬地区和中国大部分地区 VPD 持续突变增长的重要因素; Fang 等^[12]基于 CRU、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 第 5 代再分析数据集 ERA5 (ECMWF Reanalysis, Version 5) 以及 MERRA2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) 3 套网格数据计算了 1981—2020 年全球 VPD 时空演变, 认为全球 VPD 呈现显著上升趋势。在区域尺度上, Noguera 等^[13]和袁瑞瑞^[14]等基于站点观测的气温和相对湿度数据分别对西班牙及中国区域的 VPD 年和季节变化特征进行了分析, 认为 1980 年以来这两个国家的 VPD 均呈显著上升的趋势, 主要受到气温和相对湿度变化的影响。由此可知, 当前研究普遍认为气温升高和相对湿度降低是导致 VPD 变化的主要因素, 但是在不同地区 VPD 对二者的响应存在较大的空间异质性^[11]。同时, 目前对 VPD 的估算多采用单一网格数据, 且研究尺度多聚焦在全球及国家等大尺度上, 对多套网格数据估算的 VPD 在流域和区域等中小尺度一致性、时空演变及影响因素研究尚有不足^[8,12]。

海河流域地处半湿润半干旱地区, 是中国重要的粮食产地^[15]。近些年来随着全球气候的变暖, 该流域平均气温和极端气温显著升高, 进而对流域的生态系统造成严重影响^[16]。目前对该流域的研究多关注植被蒸腾^[17]以及生态水分利用效率^[15]等方面, 对影响生态系统生产力重要驱动因子 VPD 的关注较少^[18]。利用海河流域 126 个气象站点数据计算的 VPD 评估 ERA5-Land、MERRA2 以及 CRU 3 套全球网格数据在海河流域的适用性, 探讨海河流域 VPD 年和季节的变化趋势, 分析 SVP、AVP 以及气温和相对湿度对 VPD 的影响, 研究结果不仅可为全球网格产品的改良及优化提出区域性建议, 同时也可海河流域应对未来气候变化提供科学指导。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

海河流域地处华北平原(35°—43°N, 112°—120°E), 总面积约 $3.19 \times 10^5 \text{ km}^2$, 是中国重要的工农业生产基地^[15,19]。该流域地势由西北向东南倾斜, 平均海拔在 500m 以上(图 1)。受温带大陆性季风气候的影响, 该流域夏季高温多雨水, 冬季寒冷干燥, 多年平均降水约 539mm, 80% 以上的降水集中在 5—10 月, 年均气温 1.5—14℃ 之间^[16, 20—21]。植被类型以草地、林地和农田为主, 占整个流域面积的 80% 以上^[15]。依据中国农业自然区划, 将该流域划分为内蒙古东部区、华北山区以及华北平原区(图 1)。

1.2 数据来源

1980—2022 年海河流域 126 个气象站点月气温和相对湿度数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>), 该数据已经过极值以及时间一致性等严格的质量控制和检验, 具有较高的可信度和准确性, 对于个别站点缺失数据利用邻近站点插值方法进行插补处理^[22]。

3 套用于计算 VPD 的网格数据分别为: ①CRU TS 数据目前使用最广泛的气候数据集之一, 该数据集由英国东英吉利大学的气候研究中心生产, 采用角距离加权(Angular Distance Weighting, ADW)插值生成^[23]。目前最新版本为 CRU TS4.07(https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.07/cruts.2304141047.v4.07/), 其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间跨度为 1901 年 1 月—2022 年 12 月, 本文采用 1980—2022 年月尺度的平均气温和 AVP 来计算 VPD。②ERA5-Land 数据来自 ECMWF 第 5 代全球气候再分析资料数据库^[24]。该数据集利用数据同化技术将大量地基观测、大气探测数据和遥感数据相结合, 其空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 时间跨度为 1950 年 1 月—2022 年 12 月(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>)。本文利用 1980—2022 年月尺度的露点温度和气温来计算 VPD。③MERRA2 数据是由美国航天航空局戈达德航天中心开发(<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2>), 该数据集采用三维变分同化系统对高光谱辐射度以及微波观测等各设备观测数据集进行同化处理^[25—26], 其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, 时间跨度 1980 年 1 月—2022 年 12 月。使用 1980—2022 年月尺度气温和露点温度数据来计算 VPD。

中国农业自然区划边界以及海河流域边界数据均来源于资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 VPD 的计算

VPD 的计算方法如下^[1,11]:

$$\text{VPD} = \text{SVP} - \text{AVP} \quad (1)$$

$$\text{AVP} = \text{SVP} \times \frac{RH}{100} \quad (2)$$

式中, VPD、SVP 和 AVP 分别为饱和水汽压差、饱和水汽压和实际水汽压, 单位为 kPa, RH 为相对湿度, 单位为 %。

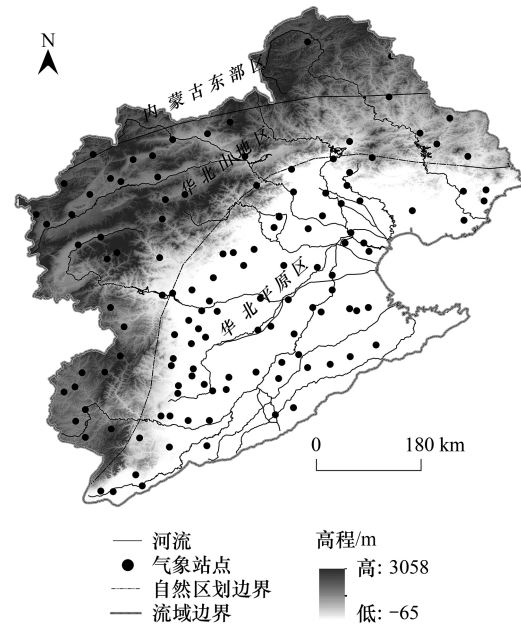


图 1 海河流域范围及其气象站点空间分布

Fig.1 Location of the Hai River Basin and spatial pattern of meteorological stations

SVP 和 AVP 的计算方法如下:

$$\text{SVP} = 6.112 \times f_w \times \exp\left(\frac{17.67T}{T+243.5}\right) \quad (3)$$

$$\text{AVP} = 6.112 \times f_w \times \exp\left(\frac{17.67T_d}{T_d+243.5}\right) \quad (4)$$

$$f_w = 1 + 7 \times 10^{-4} + 3.46 \times 10^{-6} P_{\text{mst}} \quad (5)$$

$$P_{\text{mst}} = P_{\text{msl}} \times \left(\frac{T + 273.16}{T + 273.16 + 0.0065Z} \right)^{5.625} \quad (6)$$

式中, T 、 T_d 、 Z 、 P_{mst} 和 P_{msl} 分别表征空气气温(℃)、露点温度(℃)、海拔高度(m)、气压(kPa)以及平均海平面气压(101.325kPa)。

1.3.2 精度评价

将位于同一网格内站点数据计算的 VPD 进行算术平均, 计算得到该网格单元的 VPD 观测值, 进而与基于网格数据计算的 VPD 数据进行比较^[27]。利用决定系数 R^2 、均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)以及偏差(BIAS)等统计指标分析评估其精度, 具体计算公式可参考文献[28—29]。

1.3.3 趋势分析和相关分析

采用 Theil-Sen median 方法计算 VPD 的年际和季节变化趋势。该方法为一种非参数统计趋势计算的方法, 不易受异常值影响且结果稳健, 目前已经广泛应用在时间序列趋势分析中^[30—31]。采用相关分析评估海河流域 SVP、AVP、气温和相对湿度对 VPD 的影响。

2 结果分析

2.1 网格数据估算的 VPD 评估

线性回归方程结果可以发现基于 CRU、ERA5-Land 和 MERRA2 数据集计算的 VPD 与站点计算值的拟合斜率分别为 1.0795、1.0108 和 1.3407, 表明 3 套数据集计算的 VPD 值在海河流域均存在一定的高估现象(图 2)。其中 ERA5-Land 计算的 VPD 与站点数据的拟合度最高($R^2 = 0.9851$), RMSE(0.0532)和 BIAS(0.0334)的值最低, 其次为 CRU 数据集, MERRA2 计算的 VPD 与站点数据的拟合度最低($R^2 = 0.9148$), RMSE(0.2097)和 BIAS(0.1127)的值最高(图 2)。从多年平均 VPD 的值来看, 基于 3 套数据集计算的 VPD 值分别为 0.6486kPa、0.6277kPa 和 0.7070kPa, 基于 ERA5-Land 计算的 VPD 值与站点数据更为接近(图 2)。

从相关系数的空间分布来看, 基于 CRU、ERA5-Land 和 MERRA2 数据集产品计算的 VPD 均与站点数据计算的 VPD 表现出了高度的一致性(图 3)。81.63%、95.92% 和 4.08% 站点计算的 VPD 与 3 套数据集计算的 VPD 相关系数在 0.96 以上, 表明基于 ERA5-Land 计算的 VPD 精度最高。综上, 后续分析选取 ERA5-Land 计算的 VPD 数据对海河流域 VPD 时空演变特征及影响因素进行分析。

2.2 VPD 变化趋势分析

1980—2022 年海河流域年 VPD 呈显著增加的趋势($\text{Trend} = 0.027\text{kPa}/10\text{a}$, $P < 0.01$), 最高值出现在 2019 年($\text{VPD} = 0.7697\text{kPa}$), 最低值出现在 1990 年($\text{VPD} = 0.4998\text{kPa}$)(图 4)。从不同季节来看, VPD 的值在春季和夏季的增加速率最快, 其值分别达到 $0.0433\text{kPa}/10\text{a}$ ($P < 0.01$) 和 $0.0405\text{kPa}/10\text{a}$ ($P < 0.01$), 秋季和冬季的增速较慢, 其值分别为 $0.0146\text{kPa}/10\text{a}$ ($P = 0.051$) 和 $0.0120\text{kPa}/10\text{a}$ ($P < 0.01$)(图 4), 表明海河流域 VPD 的增加主要发生在暖季。

从变化趋势的空间分布来看, 海河流域年 VPD 呈上升和下降的趋势面积占比分别为 97.67% 和 2.33%, 且高达 86.28% 的区域通过了 0.05 显著性水平检验, 上升速率较快的区域主要位于流域东南部的华北平原区(图 5)。具体来看, 除华北山地区中部少数区域外, 其他区域年 VPD 均呈现显著上升的趋势, 表明近 43 年来海河流域大气干旱程度日益严重(图 5)。

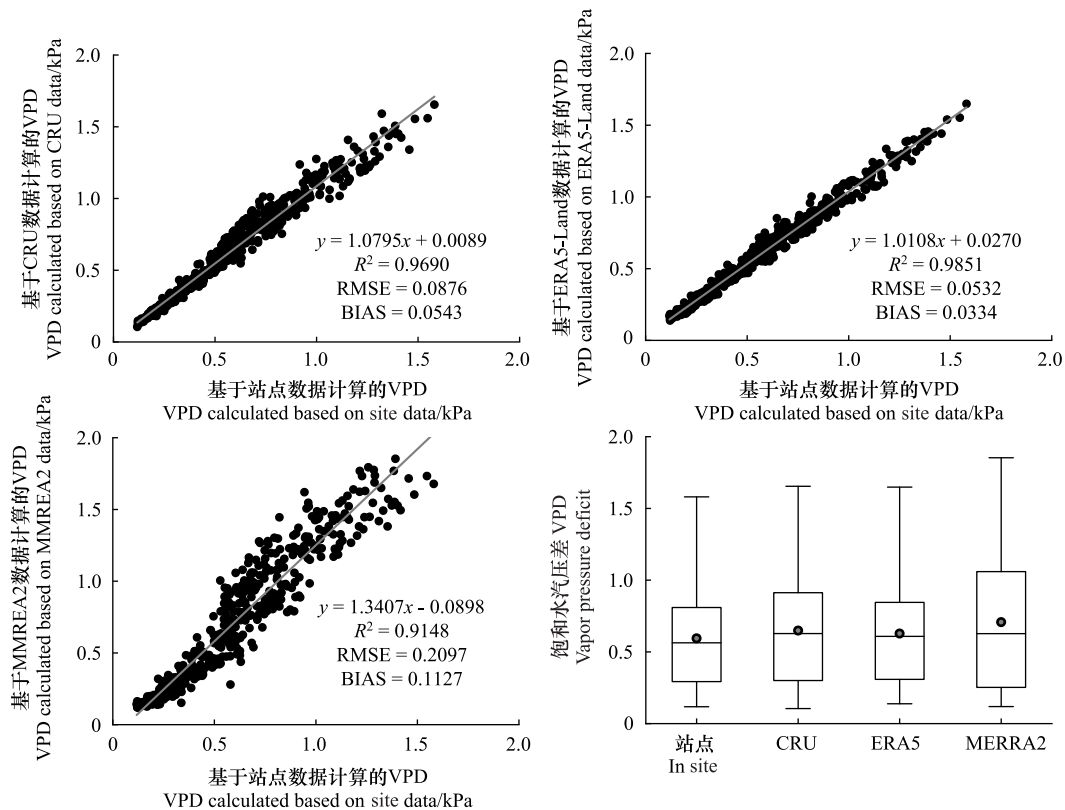


图2 基于气象站点数据计算的 VPD 与基于 CRU、ERA5-Land 和 MERRA2 网格数据计算的 VPD 相关系数和均值

Fig.2 Correlations and average values between VPD derived from three grid datasets (CRU, ERA5-Land, and MERRA2) and VPD derived from all in site stations

CRU: 气候研究中心 Climate research unit; VPD: 饱和水汽压差 Vapor pressure deficit; ERA5: 欧洲中期天气预报中心第 5 版全球气候再分析 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis, Version 5; MERRA2: 现代回顾分析的研究与应用第 2 版再分析数据 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2

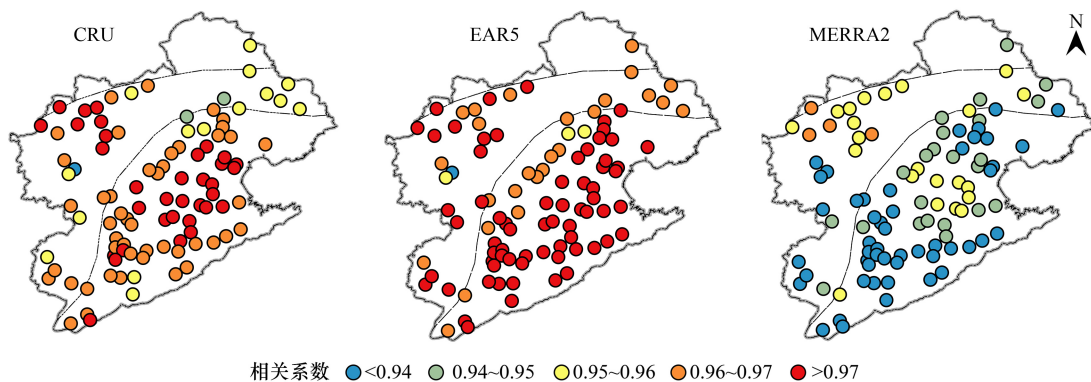


图3 站点数据与 3 套网格数据计算的 VPD 的相关系数空间分布

Fig.3 Spatial patterns of the correlation coefficient of monthly VPD between three grid datasets (CRU, ERA5-Land, and MERRA2) and site data

在季节尺度上(图 6),春季 VPD 变化趋势与年际变化趋势较为一致,87.59%的面积呈显著上升的趋势($P < 0.05$),上升趋势较大的区域主要位于流域东南部的华北平原区以及华北山地区的南部。在夏季,VPD 呈显著上升和显著下降的面积占比分别为 63.57%和 0.43%,显著上升的区域主要位于华北平原区、华北山地区

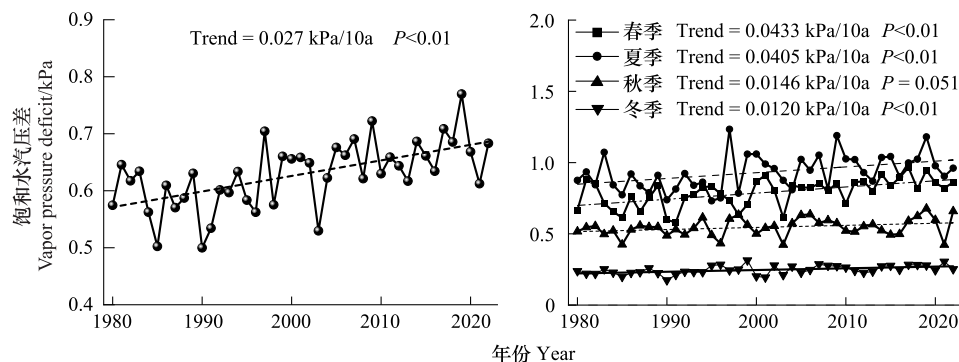


图4 1980—2022年海河流域年和季节 VPD 变化趋势

Fig.4 Time variation of annual and seasonal VPD in the Hai River Basin from 1980 to 2022

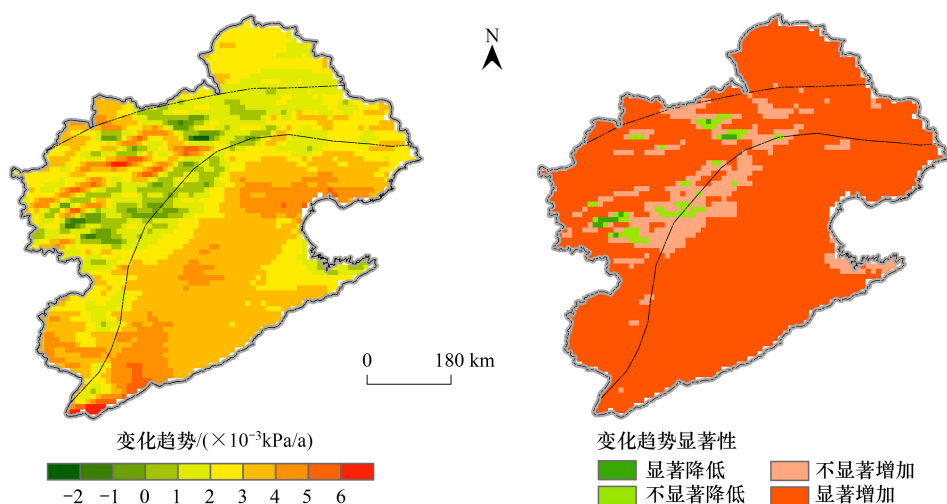


图5 1980—2022年海河流域年 VPD 变化趋势及显著性

Fig.5 Spatial pattern of annual VPD change trend in the Hai River Basin during 1980—2022

的西部和南部。在秋季,仅 30.76%的区域 VPD 呈显著上升的趋势,主要位于内蒙古东部区、华北山地区的中部以及华北平原区的东南部。在冬季,77.48%的区域呈显著上升的趋势,主要位于内蒙古东部区、华北山地区以及华北平原区的东南部等地。

2.3 VPD 变化的影响因素分析

2.3.1 SVP 和 AVP 变化对 VPD 的影响

本文进一步分析了海河流域 SVP 和 AVP 年和季节变化(表 1)。从表中可以看出,1980—2022 年海河流域 SVP 在年和季节尺度上均呈现显著上升的趋势,其值分别为 0.0295kPa/10a、0.0367kPa/10a、0.0457kPa/10a、0.0222kPa/10a 和 0.0128kPa/10a; AVP 在年和季节尺度上均呈现不显著的变化趋势,其值分别为 0.0001kPa/10a、-0.0085kPa/10a、0.0034kPa/10a、0.0056kPa/10a 和 0.0002kPa/10a。从相关系数来看(图 7),海河流域年和季节 VPD 与 SVP 均呈显著正相关($P < 0.05$),其相关系数分别为 0.8109、0.7729、0.7425、0.5748 和 0.6308,与 AVP 均呈显著负相关($P < 0.05$),其相关系数分别为 -0.4916、-0.6159、-0.4879、-0.3664 和 -0.3028,VPD 与 SVP 的相关性高于 AVP,表明海河流域近 43 年 VPD 的年际和季节变化主要受到 SVP 变化的影响。

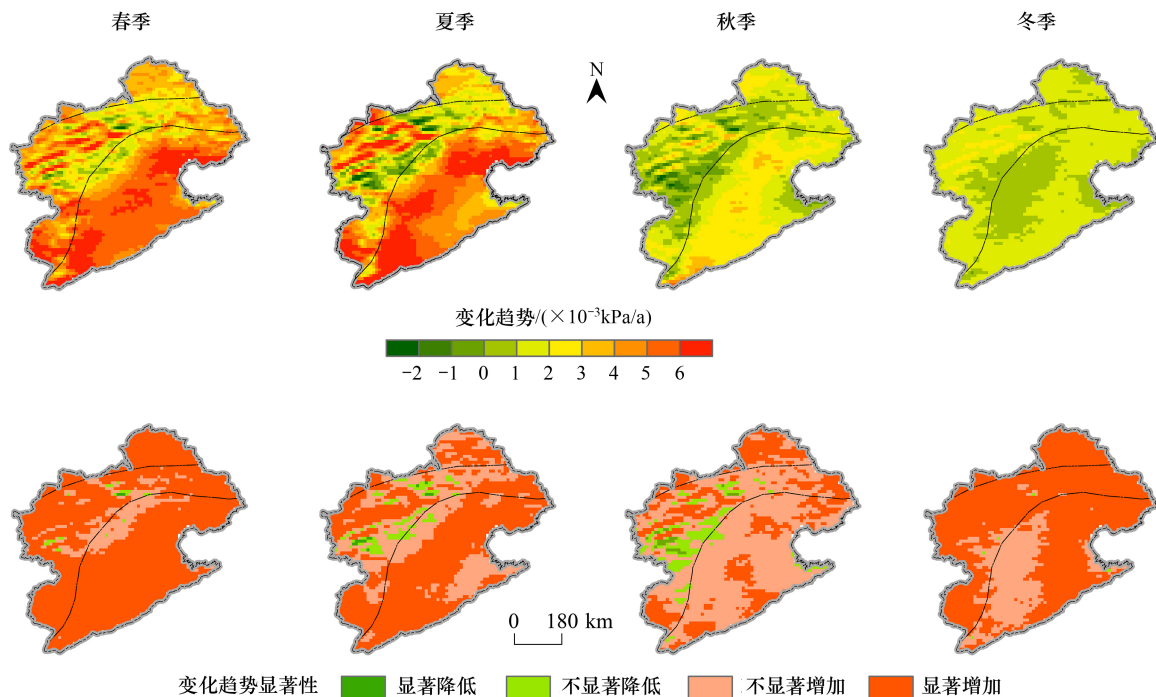


图6 1980—2022年海河流域季节VPD变化趋势及显著性

Fig.6 Spatial distribution of seasonal VPD change trends in the Hai River Basin during 1980—2022

表1 1980—2022年海河流域年和季节SVP、AVP、气温和相对湿度变化趋势

气象因子 Meteorological factors	年 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
饱和水汽压 SVP/(kPa/10a)	0.0295 **	0.0367 **	0.0457 **	0.0222 **	0.0128 **
实际水汽压 AVP/(kPa/10a)	0.0001	-0.0085	0.0034	0.0056	0.0002
气温 Temperature/(℃/10a)	0.3399 **	0.4651 **	0.2652 **	0.2360 *	0.3933 **
相对湿度 Relative humidity/(%/10a)	-1.1117 **	-1.7743 **	-0.9646 *	-0.5332	-1.2879 *

* 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 0.01 ; SVP: 饱和水汽压 Saturation vapor pressure; AVP: 实际水汽压 Actual vapor pressure

2.3.2 气温和相对湿度变化对 VPD 的影响

1980—2022年海河流域年和季节气温均呈现显著上升的趋势,上升趋势的最大值出现在春季($0.4651^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),最小值出现在秋季($0.2360^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)(表1);从相对湿度的变化来看,除秋季外,年和其他季节均呈现显著下降的趋势,下降趋势最大和最小的季节分别为在春季($-1.7743\%/10\text{a}$)和秋季($-0.5332\%/10\text{a}$),表明近43年来海河流域呈现显著暖干化的变化趋势(表1)。相关分析均表明1980—2022年海河流域年和季节VPD与气温呈显著正相关,与相对湿度呈显著负相关(图8)。与气温的相关系数最大值出现在春季(0.730);与相对湿度相关系数的绝对值最大值出现在夏季(-0.970)。总体来看,海河流域VPD与相对湿度的相关系数绝对值无论是在年还是季节尺度均高于气温,相对湿度对VPD的贡献高于气温。

3 讨论

本文的研究结果表明基于3套网格数据(CRU、ERA5-Land和MERRA2)计算的月VPD与海河流域站点数据计算的月VPD具有良好的一致性,其 R^2 均高于0.90,尤其是ERA5-Land数据集表现出最高的相关性($R^2 = 0.9851$)及最低的RMSE和BIAS(图2),主要是由于计算VPD的变量(气温、露点温度和相对湿度)具有

较高的精度。如 Luo 等^[32]的研究表明 MERRA2 中的相对湿度、气温与热带和亚热带大西洋地区的 553 个无线电探空仪数据具有良好的一致性。尹家波等^[33]发现 ERA5-Land 再分析数据在中国大多数区域的气温偏差在 0.5℃ 以内、相对湿度的偏差在 5% 以内,数据质量可信度高。与 ERA5-Land 相比, MERRA2 数据集与站点数据的 R^2 偏低,并且斜率偏大 ($R^2=0.9147$, slope = 1.3407), 主要是由于 2 套数据同化方法和再分析处理过程的差异造成的^[12,34]。3 套数据集计算的 VPD 与站点数据的线性回归方程中斜率均大于 1, 表明 3 套数据集得到的 VPD 高估了海河流域真实的 VPD(图 2)。

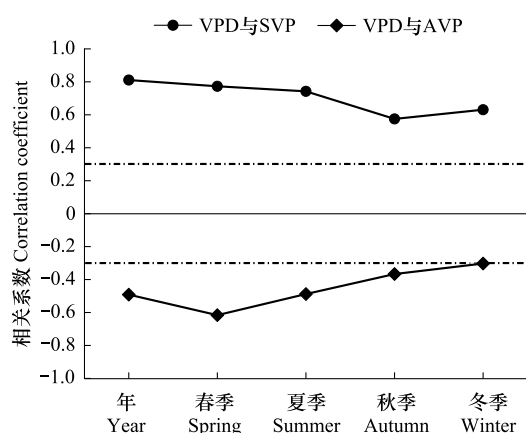


图 7 1980—2022 年海河流域年和季节 VPD 与 SVP 和 AVP 的相关系数

Fig.7 Correlations between annual and seasonal VPD, SVP and AVP in the Hai River Basin from 1980 to 2022

SVP, 饱和水汽压 Saturation vapor pressure; AVP, 实际水汽压 Actual vapor pressure

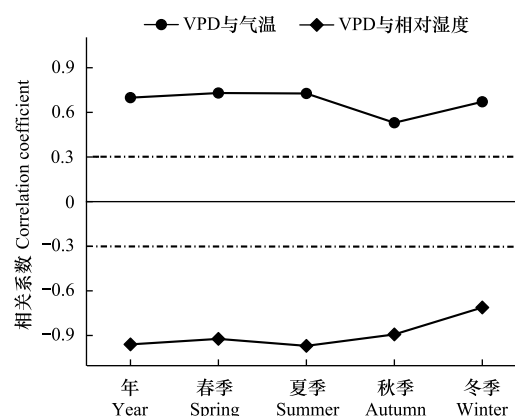


图 8 1980—2022 年海河流域年和季节 VPD 与气温和相对湿度的相关系数

Fig.8 Correlations coefficients between annual and seasonal VPD, temperature and relative humidity in the Hai River Basin from 1980 to 2022

过去 43 年期间,海河流域年和季节 VPD 在大部分地区呈显著升高的趋势(图 5 和图 6), Clausius-Clapeyron 方程表明,气温每升高 1℃,其 SVP 就会提高 7% 左右,VPD 的变化主要由 SVP 和相对湿度决定^[1,10,13]。海河流域 1980—2022 年和季节气温呈显著上升的趋势,相对湿度呈显著下降的趋势,二者的变化共同决定了海河流域 VPD 呈显著上升的趋势(表 1)。从不同季节来看,在春季和夏季,VPD 的上升趋势最为显著(图 6),这可能与这两个季节较高的气温和较低的相对湿度有关,导致 SVP 和 AVP 之间的差增大^[35]。秋季的 VPD 变化不显著,主要是由于相对湿度和气温的变化幅度较小导致的^[4]。袁瑞瑞等^[14]的研究结果表明 1980—2018 年海河流域年和季节 VPD 呈显著增加的趋势;Wu 等^[34]的研究也表明 2000—2020 年海河流域大部分地区的 VPD 呈增加的趋势,这与本文的研究结果一致。海河流域 VPD 的变化在空间上也存在显著差异,西北部主要为山区,这些地区植被覆盖度较好,植被蒸腾作用较强,能够部分抵消气温升高带来的 VPD 增加,因此 VPD 上升较为缓慢^[7-8,36];东南部为华北平原,受气温上升和相对湿度的下降,其 VPD 增加显著^[37,38]。从影响因素来看,VPD 与气温和相对湿度均存在显著的相关性,气温升高会导致 SVP 增加,从而增加 VPD(图 8)。已有研究表明,全球变暖背景下,气温的持续上升将导致未来 VPD 进一步增加^[39]。同时相对湿度的下降也会使得 VPD 升高^[4]。本文的研究结果同时发现海河流域 VPD 与相对湿度的相关系数绝对值大于气温,表明海河流域相对湿度对 VPD 的贡献大于气温,VPD 对相对湿度的变化更为敏感(图 8)。Li 等^[10]、Noguera 等^[13]在研究新疆和西班牙 VPD 变化的时候也得到了类似的结论。值得注意的是海河流域是我国重要的农业灌区,除气温和相对湿度外,农业灌溉导致的土壤湿度变化也会影响该流域局地 VPD 的变化^[40]。当土壤湿度增加时,农作物蒸腾作用增强,进而将更多的水分释放到大气中,提高近地层空气的湿度,使得 AVP 更加接近 SVP,短期内导致 VPD 减小,理解土壤湿度与 VPD 之间的关系有助于优化灌溉策略,从

而提高水分利用效率^[41]。此外,流域海拔和下垫面性质的差异也是导致 VPD 变化的重要原因^[14,42-44]。探究影响 VPD 的时空变化影响因素的时候,还需结合流域下垫面性质和气候背景条件等多方位多角度因素,以获得对流域 VPD 更加全面和深入的了解和认识。

4 结论

基于海河流域站点数据,本文评估了 3 套数据集(CRU、ERA5-Land 和 MERRA2)计算的 VPD 在海河流域的适用性,并进一步分析了其时空演变及影响因素。研究发现:

(1)ERA5-Land 数据集计算的 VPD 相较于其他 2 套网格数据 BIAS 和 RMSE 更小,拟合优度更好($R^2 = 0.9851$),因此认为该数据集更适用于海河流域长期 VPD 变化的研究。

(2)1980—2022 年海河流域年 VPD 值呈显著增加的趋势($Trend = 0.027\text{kPa}/10\text{a}$, $P < 0.01$)。VPD 在春季的增加速率最快,其值为 $0.0433\text{kPa}/10\text{a}$ ($P < 0.01$),秋季和冬季的增速较慢,其值分别为 $0.0146\text{kPa}/10\text{a}$ ($P = 0.051$) 和 $0.0120\text{kPa}/10\text{a}$ ($P < 0.01$)。

(3)海河流域 VPD 的空间特征具有空间异质性,86.28%的流域年 VPD 呈显著增加的趋势($P < 0.05$)。春季、夏季、秋季和冬季 VPD 呈显著上升的面积占比分别为 87.59%、63.57%、30.76%和 77.48%,显著下降的区域仅零星分布在华北山区中部地区。

(4)海河流域年和季节 VPD 与 SVP 的相关性高于 AVP;VPD 与相对湿度的相关系数绝对值高于气温,表明海河流域相对湿度对 VPD 的贡献高于气温。

参考文献 (References):

- [1] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y P, Ryu Y, Chen G X, Dong W J, Hu Z M, Jain A K, Jiang C Y, Kato E, Li S H, Lienert S, Liu S G, Nabel J E M S, Qin Z C, Quine T, Sitch S, Smith W K, Wang F, Wu C Y, Xiao Z Q, Yang S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaax1396.
- [2] 金佳鑫,蔡裕龙,郭熙,王龙浩,王颖,刘元波. 中国亚热带植被蒸腾驱动力解耦分析. *地理学报*, 2023, 78(7): 1779-1791.
- [3] Zhong Z Q, He B, Wang Y P, Chen H W, Chen D L, Fu Y H, Chen Y N, Guo L L, Deng Y, Huang L, Yuan W P, Hao X M, Tang R, Liu H M, Sun L Y, Xie X M, Zhang Y F. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity. *Science Advances*, 2023, 9(32): eadf3166.
- [4] Ficklin D L, Novick K A. Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(4): 2061-2079.
- [5] He B, Chen C, Lin S R, Yuan W P, Chen H W, Chen D L, Zhang Y F, Guo L L, Zhao X, Liu X B, Piao S L, Zhong Z Q, Wang R, Tang R. Worldwide impacts of atmospheric vapor pressure deficit on the interannual variability of terrestrial carbon sinks. *National Science Review*, 2022, 9(4): nwab150.
- [6] Williams A P, Seager R, Macalady A K, Berkelhammer M, Crimmins M A, Swetnam T W, Trugman A T, Buenning N, Noone D, McDowell N G, Hryniw N, Mora C I, Rahn T. Correlations between components of the water balance and burned area reveal new insights for predicting forest fire area in the southwest United States. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24(1): 14.
- [7] 王大为,赵成章,方锋,林婧婧,李丽丽,杨永明. 石羊河流域水分利用效率及其对饱和水汽压差的响应. *生态学报*, 2023, 43(8): 3090-3102.
- [8] 姜萍,胡列群,许婷婷. 近 60 a 新疆大气水分亏缺的时空变化特征. *干旱区地理*, 2023, 46(1): 1-10.
- [9] McDowell N G, Allen C D. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 669-672.
- [10] Li M Y, Yao J Q, Guan J Y, Zheng J H. Observed changes in vapor pressure deficit suggest a systematic drying of the atmosphere in Xinjiang of China. *Atmospheric Research*, 2021, 248: 105199.
- [11] 程梦琦,左志燕,蔺邹兴,游庆龙,王欢. 全球陆地饱和水汽压差的年代际突变. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(7): 1536-1549.
- [12] Fang Z X, Zhang W M, Brandt M, Abdi A M, Fensholt R. Globally increasing atmospheric aridity over the 21st century. *Earth's Future*, 2022, 10(10): e2022EF003019.
- [13] Noguera I, Vicente-Serrano S M, Peña-Angulo D, Domínguez-Castro F, Juez C, Tomás-Burguera M, Lorenzo-Lacruz J, Azorin-Molina C, Halifa-Marín A, Fernández-Duque B, El Kenawy A. Assessment of vapor pressure deficit variability and trends in Spain and possible connections with soil moisture. *Atmospheric Research*, 2023, 285: 106666.
- [14] 袁瑞瑞,黄萧霖,郝璐. 近 40 年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析. *气候与环境研究*, 2021, 26(4): 413-424.
- [15] 赵安周,张安兵,冯莉莉,王冬利,承达瑜. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析. *生态学报*, 2019, 39(4): 1452-1462.
- [16] Yao T T, Liu S X, Hu S, Mo X G. Response of vegetation ecosystems to flash drought with solar-induced chlorophyll fluorescence over the Hai

- River Basin, China during 2001-2019. *Journal of Environmental Management*, 2022, 313: 114947.
- [17] Chen Y, Lei T J, Xia J Z, Tu Y, Wang Y D, Wang Z L. Application of a multiple model integration framework for mapping evapotranspiration with high spatial - temporal resolution in the Haihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109661.
- [18] Cao B, Wang Y, Zhang X L, Shen Y J. Spatial heterogeneity and the increasing trend of vegetation and their driving mechanisms in the mountainous area of Haihe River Basin. *Remote Sensing*, 2024, 16(3): 587.
- [19] 王利娜, 朱厚华, 鲁帆, 何立新. 海河流域近 50 年降水量时空变化特征分析. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 242-246.
- [20] 成星露, 孙永华, 张王宽, 王一涵, 曹许悦, 王衍昭. 气候干湿冷暖化复合类型的识别与量化方法. *地球信息科学学报*, 2023, 25(11): 2204-2217.
- [21] 何丽烨, 程善俊, 马宁, 郭军. 海河流域夏季降水关键区季内演变及其环流配置的定量化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 41-52.
- [22] 赵安周, 张安兵, 王冬利, 刘新侠, 刘海新. 海河流域干旱时空变化及驱动因素分析. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(4): 859-872.
- [23] AghaKouchak A, Farahmand A, Melton F S, Teixeira J, Anderson M C, Wardlaw B D, Hain C R. Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 452-480.
- [24] Ambika A K, Mishra V. Substantial decline in atmospheric aridity due to irrigation in India. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(12): 124060.
- [25] Qin Y, Yang D W, Lei H M, Xu K, Xu X Y. Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe Basin of North China during the period of 1960 - 2010. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 55-67.
- [26] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 段艺芳. 1960-2016 年黄土高原干旱和热浪时空变化特征. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 591-601.
- [27] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, Todling R, Molod A, Takacs L, Randles C, Darmenov A, Bosilovich M G, Reichle R, Wargan K, Coy L, Cullather R, Draper C, Akella S, Buchard V, Conaty A, da Silva A, Gu W, Kim G K, Koster R, Lucchesi R, Merkova D, Nielsen J E, Partyka G, Pawson S, Putman W, Rienecker M, Schubert S D, Sienkiewicz M, Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [28] 杜梦蛟, 邓浩, 文仁强, 易侃, 张皓. 大气再分析资料在中国近海的风资源特征和适用性分析. *气候与环境研究*, 2023, 28(5): 483-494.
- [29] 马帅, 李晨曦, 刘言, 陈建徽, 陈发虎, 黄伟. 四套全球网格降水数据集在伊朗的适用性评估. *地理研究*, 2022, 41(11): 3021-3035.
- [30] Wu Z Y, Feng H H, He H, Zhou J H, Zhang Y L. Evaluation of soil moisture climatology and anomaly components derived from ERA5-land and GLDAS-2.1 in China. *Water Resources Management*, 2021, 35(2): 629-643.
- [31] 黎扬兵, 张洪波, 杨天增, 吕丰光, 王雨巍, 姚聪聪. 基于 MGWR 的渭河流域 TRMM 降水产品空间降尺度分析. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 141-151.
- [32] Luo B K, Minnett P J, Szczodrak M, Nalli N R, Morris V R. Accuracy assessment of MERRA-2 and ERA-interim sea surface temperature, air temperature, and humidity profiles over the Atlantic Ocean using AEROSSE measurements. *Journal of Climate*, 2020, 33(16): 6889-6909.
- [33] 尹家波, 郭生练, 杨妍, 陈杰, 顾磊, 王俊, 何绍坤, 吴泊洋, 熊景华. 基于陆地水储量异常预估中国干旱及其社会经济暴露度. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(10): 2061-2076.
- [34] Wu X P, Zhang R R, Bento V A, Leng S, Qi J Y, Zeng J Y, Wang Q F. The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4658.
- [35] Will R E, Wilson S M, Zou C B, Hennessey T C. Increased vapor pressure deficit due to higher temperature leads to greater transpiration and faster mortality during drought for tree seedlings common to the forest - grassland ecotone. *New Phytologist*, 2013, 200(2): 366-374.
- [36] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, Novick K A, Poulter B, Siegwolf R T W, Sperry J S, McDowell N G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1550-1566.
- [37] Han C Y, Zhang B Z, Han S J. Quantitative effects of changes in agricultural irrigation on potential evaporation. *Hydrological Processes*, 2021, 35(2): e14057.
- [38] Ambika A K, Mishra V. Modulation of compound extremes of low soil moisture and high vapor pressure deficit by irrigation in India. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(7): e2021JD034529.
- [39] Elbeltagi A, Srivastava A, Deng J S, Li Z B, Raza A, Khadke L, Yu Z L, El-Rawy M. Forecasting vapor pressure deficit for agricultural water management using machine learning in semi-arid environments. *Agricultural Water Management*, 2023, 283: 108302.
- [40] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [41] Yu X M, Niu L Q, Zhang Y H, Xu Z J, Zhang J W, Zhang S H, Li J M. Vapour pressure deficit affects crop water productivity, yield, and quality in tomatoes. *Agricultural Water Management*, 2024, 299: 108879.
- [42] Ghosh S. The relative role of soil moisture and vapor pressure deficit in affecting the Indian vegetation productivity. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(6): 064012.
- [43] 李素云, 祁栋林, 温婷婷, 史飞飞, 乔斌, 肖建设. 1961—2020 年青海省饱和水汽压差变化特征及影响因子分析. *干旱区研究*, 2023, 40(2): 173-181.
- [44] Fernández-Duque B, Vicente-Serrano S M, Maillard O, Domínguez-Castro F, Peña-Angulo D, Noguera I, Azorin-Molina C, El Kenawy A. Long-term observed changes of air temperature, relative humidity and vapour pressure deficit in *Bolivia*, 1950 - 2019. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(14): 6484-6504.