

侯迎,黄欣慧,褚阳,等.黄河“几字弯”大气水分亏缺及其影响因素的时空变化特征[J].中国环境科学,2025,45(2):637-647.

Hou Y, Huang X H, Chu Y, et al. Spatiotemporal variability of atmospheric moisture deficit and its influencing factors in the “Jizi Bay” of the Yellow River [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):637-647.

黄河“几字弯”大气水分亏缺及其影响因素的时空变化特征

侯迎^{1*},黄欣慧^{1,2},褚阳³,刘雯惠¹,马小娟¹(1.宁夏大学地理科学与规划学院,宁夏 银川 750021;2.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023;3.北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘要: 选取时空趋势分析、地理探测器、时空地理加权回归模型(GTWR),探讨陆-气系统交互作用下,饱和水汽压差(VPD)受太阳辐射、气候、土壤、植被的影响程度及其时空异质性特征.结果表明:1982~2021年黄河“几字弯”地区多年平均 VPD 值为 0.785kPa,该区西北部的年均 VPD 值最高、中部和西部次之.各区域年际和各季节 VPD 均呈显著增加趋势($P<0.05$),其中夏季 VPD 增幅最强[0.072kPa/10a],东部年际 VPD 增幅最强[0.045kPa/10a].在年际尺度上,水分条件(降水和土壤水分)对 VPD 的影响较强,温度次之;东南部 NDVI 对 VPD 也存在较强影响.降水与温度的交互作用对 VPD 影响最强,其次是深层土壤水分与降水、温度和植被指数的交互作用.在时空尺度上,从 1980s 到 2010s,降水和植被指数对 VPD 的限制作用随着时间从该区西北部向东南部逐渐增强;温度对 VPD 的促进作用随着时间从南部向北部逐渐增强;深层土壤水分对 VPD 的限制作用随着时间从东南部向西北部逐渐减弱.研究结果为揭示该区陆地-大气相互作用过程、促进黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据.

关键词: 饱和水汽压差(VPD); 大气水分; 地理探测器; GTWR; 黄河“几字弯”

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0637-11

Spatiotemporal variability of atmospheric moisture deficit and its influencing factors in the “Jizi Bay” of the Yellow River.

HOU Ying^{1*}, HUANG Xin-hui^{1,2}, CHU Yang³, LIU Wen-hui¹, MA Xiao-juan¹ (1.School of Geography and Planning Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 637~647

Abstract: The influence of solar radiation, climate, soil, and vegetation on the vapor pressure deficit (VPD), as well as the characteristics of its spatiotemporal heterogeneity under the effects of its interaction with the terrestrial-atmospheric system, were explored using spatiotemporal trend analysis, geodetector, and geographical and temporal weighted regression (GTWR) models. The results showed that the multi-year average VPD value for the Jizi Bay of the Yellow River from 1982 to 2021 was 0.785kPa, with the highest annual VPD value found in the northwestern part of the area, followed by the central and western parts. Interannual and seasonal VPD showed a significant increase in all regions ($P<0.05$), with the highest increase in summer VPD [0.072kPa/10a] and a high increase in mean annual VPD in the east [0.045kPa/10a]. On the interannual scale, moisture conditions (precipitation and soil moisture) had the strongest influence on VPD, followed by temperature; in the southeast, NDVI had a strong influence on VPD. Additionally, the interaction of precipitation and temperature had the strongest influence on VPD, followed by the interaction of deep soil moisture with precipitation, temperature, and vegetation indices. On the spatiotemporal scale, from the 1980s to the 2010s, the limiting effects of precipitation and vegetation indices on VPD were gradually enhanced over time from the northwest to the southeast of the region. Furthermore, the promoting effects of temperature on VPD gradually increased with time from the south to the north, while the limiting effects of deep soil moisture on VPD gradually weakened with time from the southeast to the northwest. The results of this study provide a scientific basis for revealing the process of land-atmosphere interaction in this region and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin.

Key words: vapor pressure deficit (VPD); atmospheric water; geodetector; GTWR; the Jizi Bay of the Yellow River

饱和水汽压差(VPD)描述特定温度下空气中实际水汽压与饱和水汽压的差值,反映空气距离水汽饱和和状态的程度,即大气水分亏缺程度.近年来,全球陆地^[1]、中国^[2]以及中国的不同气候区^[3]、西北地区^[4]、中国西南^[5]、新疆^[6]、青海^[7]大气水分亏缺程度均呈

上升趋势.对于整个中国,黄河流域春季和夏季大气

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42161008),宁夏自然科学基金项目(2024AAC05041)

* 责任作者, 副教授, hollying@nxu.edu.cn

水分亏缺程度的增幅最为显著^[2].模型模拟显示未来全球大气水分亏缺程度呈持续上升趋势,其中干旱区增幅最大^[8];未来中国西北地区大气水分亏缺程度同样继续升高,其中宁夏和新疆增幅最大^[4].

在未来排放情景中,随着 CO₂ 的大幅增加,持续且增强的大气水分亏缺可能对陆地生态系统构成日益严重的威胁^[8-9].在微观尺度上,VPD 调控着植物气孔的开闭,进而影响植物的蒸腾作用、光合作用等一系列生理过程^[10-11];在生态系统中,VPD 直接关系蒸散过程的水分利用效率^[12-13].VPD 的增加,意味着通过植物蒸腾和土壤蒸发作用到大气中的水汽含量增加,在一定程度上会增加植物受干旱胁迫的程度^[12,14].已有研究表明,大气水分需求主导全球陆地生态系统生产力的干旱胁迫^[13,15-16],对树木的生长、植被功能以及生态系统稳定性越发重要^[12,17].

VPD 的变化由大气中的湿度和温度引起,是一系列陆地—大气反馈的互补物理过程的结果^[18].作为大气湿度重要来源的蒸散蒸腾作用,受植被、土壤湿度等因素控制^[19].因而,大气 VPD 与植物蒸腾速率^[20]和土壤水分^[21-22]表现出强烈的耦合关系.然而,目前研究多从气候因子的视角分析 VPD 变化的原因.在陆—气系统交互作用过程中,太阳辐射、不同土层的土壤水分、植被生长、蒸散蒸腾作用等因素如何影响大气 VPD 的变化? 并且这种影响在不同的时空尺度上如何变化? 值得进一步深入分析和探讨.

黄河“几字弯”(以下简称几字弯)是黄河流域的核心部分,同时作为国家经济发展的战略腹地,在黄河流域生态保护和高质量发展中具有举足轻重的作用.作为干旱半干旱地区水分条件变化的重要指标,VPD 反映大气从地表获取水分的能力,可约束植被的光合作用和正常生理活动^[3].VPD 的持续增加,对干旱半干旱地区陆地植被系统的结构和功能产生重要影响^[23].然而,当前针对几字弯地区大气水分亏缺程度及其影响因素的深入分析不足.基于此,利用 VPD 反映大气水分亏缺程度,选取地理探测器、时空地理加权回归(GTWR)等模型,定量分析 VPD 受太阳辐射、气候、土壤、植被等因素的影响机制及其时空异质性特征,对于深刻揭示该区陆地—大气相互作用过程,维持区域生态系统的平衡与稳定,促进几字弯攻坚战以及黄河流域生态保护和

高质量发展具有重要意义.

1 数据及研究方法

1.1 研究区概况

黄河“几字弯”指黄河流经甘肃、宁夏、内蒙、陕西、山西 5 省(区)形成的“几”字形区域(图 1),涵盖 164 个县(区),总面积 57 万 km²,人口 4140 万人^[24].根据本研究气候数据,几字弯地区多年平均年降水量介于 146~463mm,从东南向西北逐渐减少;年均温介于 4.6~16.7℃,从南向北逐渐降低.该区地处我国干旱和半干旱过渡区域,属于森林和草原分布的过渡地带,森林、草原、荒漠、湿地等生态系统相互交织^[25].该区南部属陕北黄土高原,东部、西部和北部有汾河平原、宁夏平原和河套平原(前套和后套平原).为分析大气水分亏缺及其影响因素的区域特征,将该区分为东部(山西忻州市、吕梁市、临汾市)、西部(内蒙古乌海市、宁夏石嘴山市、银川市、吴忠市、中卫市、甘肃白银市)、南部(甘肃庆阳市、陕西延安市)、北部(内蒙古巴彦淖尔市、包头市、呼和浩特市、山西朔州市)、中部(内蒙古鄂尔多斯市、陕西榆林市).

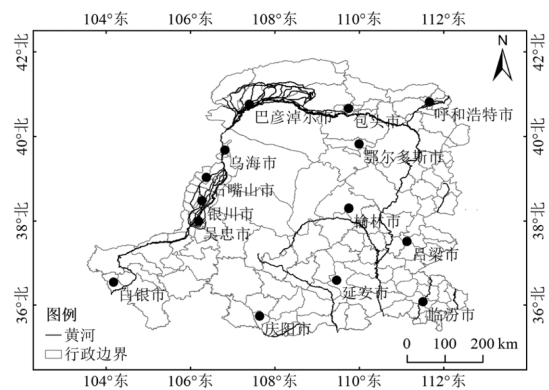


图 1 研究区区位

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据来源

饱和水汽压差(VPD)等于大气饱和水汽压减去实际水汽压,值越大,表示大气水汽亏缺程度越高;反之,大气水汽亏缺程度越低.VPD 数据提取自 TerraClimate 数据集(<https://www.climatologylab.org>),空间分辨率为 1/24°,时间分辨率为月.该数据集通过融合 WorldClim 高空间分辨率气候数据集与随时间变化的 CRU 和 JRA55 数据,利用气候辅助插值

法建立而成,具有更广泛时间记录和更高的空间分辨率^[26],已应用于气候、生态和水文相关研究^[27]。

鉴于自变量的多重共线性会影响回归分析质量,为进行 GTWR 建模分析,同时参考已有研究成果^[5-7],对自变量进行筛选以满足多重共线性检验。最终选取表层土壤水分(SSM)、深层土壤水分(DSM)、归一化植被指数(NDVI)、降水量(PRE)、温度(TEM)、地表净太阳辐射(NR)6 个因素作为自变量。PRE、TEM、NR 和 4 层土壤水分(0~7cm、7~28cm、28~100cm、100~289cm)数据提取自欧洲中期天气预报中心第五代全球气候再分析数据集(ERA5land, <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>),空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为月。该数据集具有更新快、涵盖广、精度高的优势^[28],已用于黄河流域蒸散发、降水空间分布格局和季节变化特征等方面的研究,具有较好的精度和适用性^[29]。NDVI 数据提取自 GIMMS 归一化差异植被指数全球数据集(PKU GIMMS NDVI)^[30],空间分辨率为 $1/12^\circ$ 。

将 0~7cm 土层的土壤水分作为 SSM,将其余 3 层土壤水分合并为 DSM,以分析根区土壤水分与 VPD 的关联性。将 1 月至 12 月数据合并为年值数据。将 3~5 月作为春季、6~8 月作为夏季、9~11 月作为秋季、12 月至次年 2 月作为冬季,进而将月值数据合并为季度数据。所有栅格数据选取时段为 1982~2021 年,并双线性内插至 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析和显著性检验 首先计算 Theil-Sen Median 趋势分析的 β 值(Sen 趋势)^[31]。 $\beta > 0$,表示时间序列呈上升趋势;反之,呈下降趋势。相较于基于一元线性回归模型的趋势分析,该方法不需要样本满足特定的分布特征、不易受到样本异常值的影响^[1]。再借助 Mann-Kendall 检验对 Sen 趋势进行显著性检验^[31]。作为一种非参数统计检验方法,该方法检验范围广、不易受人为影响^[27]。

1.3.2 地理探测器 利用地理探测器检验因变量的空间分异性并解释其驱动力,若因变量被某一自变量显著影响,其空间分布通常具有相似性。该方法具有不受自变量多重共线性影响、不限于乘性交互,探测结果更可靠的优势^[32]。通过该模型得到表征探测因子解释力的 q 值。 q 值越高,表示该因子对因变量的解释力越强;反之,对因变量的解释力越弱。

1.3.3 时空地理加权回归模型(GTWR) GTWR 在传统地理加权回归模型的基础上增加时间维度,进而在空间异质性的研究中综合考虑时间和空间两个维度,有效弥补回归模型中时空非平稳性问题,可较好地描述自变量与因变量之间的时空关系^[33]。计算公式为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: Y_i 表示第 i 个样本的因变量; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 是第 i 个样本的回归截距; u_i, v_i, t_i 分别是第 i 个样本的经度、纬度和时间; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 表示第 k 个解释变量在第 i 个样本的回归系数; X_k 表示第 k 个解释变量在第 i 个样本值; ε_i 是随机干扰项。 $\beta > 0$,表示自变量与因变量呈正相关关系;反之,呈负相关关系。 β 绝对值越大,表示自变量对因变量影响程度越强;反之,影响程度越弱。

以十年为间隔将整个研究时段分为 4 个阶段(1980s、1990s、2000s 和 2010s),利用 GTWR 模型分析各因子对 VPD 年代际变化影响的时空异质性。

2 结果与分析

2.1 VPD 时空演变趋势

2.1.1 VPD 时间变化特征 1982~2021 年几字弯地区 VPD 多年平均值为 0.785kPa,东部、西部、南部、北部和中部 VPD 多年平均值分别为 0.760kPa、0.758kPa、0.669kPa、0.807kPa 和 0.855kPa。该区中部的 VPD 多年平均值最高,且北部高于南部(图 2)。

近 40 年,该区年均 VPD 总体呈上升趋势,增加幅度为 14%,增加速率为 0.039kPa/10a。各子区域年均 VPD 总体也呈上升趋势,东部、西部、南部、北部和中部的增加幅度分别为 14.6%、10.7%、12.2%、12.9% 和 15.8%,增加速率分别为 0.045kPa/10a、0.030kPa/10a、0.040kPa/10a、0.041kPa/10a 和 0.040kPa/10a。该区大气水分亏缺程度呈增加趋势,且东部的增加趋势高于西部、北部高于南部。此外,2004 年后,除西部地区水分亏缺程度持续增加外,其余地区水分亏缺程度均有所缓解(图 2)。

近 40 年,该区春季、夏季、秋季、冬季 VPD 多年平均值分别为 0.949kPa、1.337kPa、0.608kPa 和 0.245kPa(图 3)。夏季大气水分亏缺程度最高,其次为春季,秋季和冬季较低。总体上,该区各季节 VPD 均呈上升趋势,春季、夏季、秋季和冬季的增加幅度分

别为 1.1%、20.7%、13.7%和 27.4%,增加速率分别为 0.060kPa/10a、0.072kPa/10a、0.014kPa/10a 和 0.011kPa/10a.夏季大气水分亏缺程度的增加趋势最

高,其次为春季,秋季和冬季较低.此外,2004 年后,除冬季水分亏缺程度持续增加外,其余季节的水分亏缺程度均有所缓解.

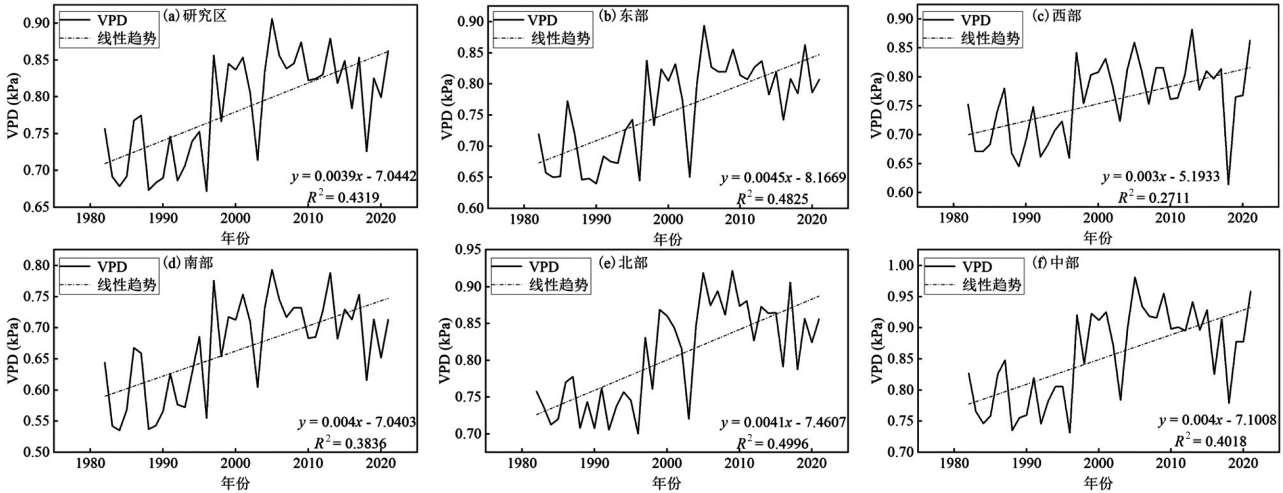


图 2 黄河几字弯及其各分区 VPD 的际年变化趋势

Fig.2 Interannual trends of VPD in Jizi Bay of the Yellow River and its subregions

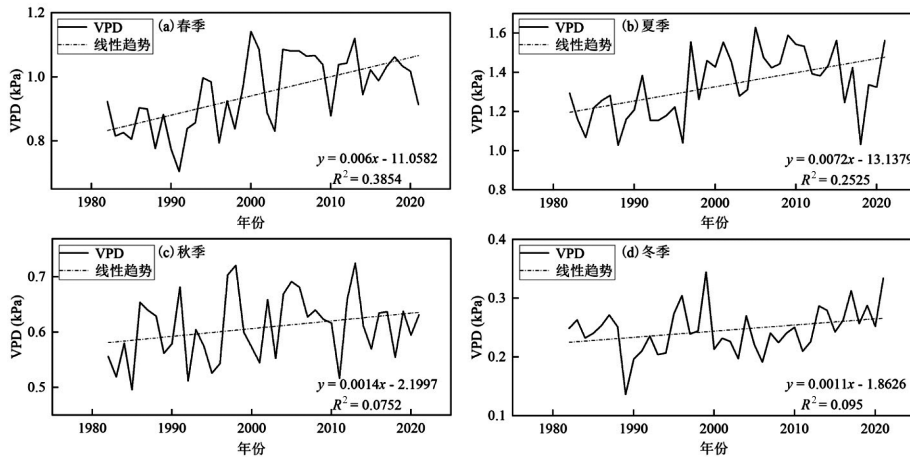


图 3 黄河几字弯地区 VPD 的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of VPD in Jizi Bay of the Yellow River

2.1.2 VPD 空间分布特征与变化趋势 如图 4 所示,几字弯地区西北部年均 VPD 值最高、中部和西部次之、东部和南部较低.春季、夏季、秋季 VPD 的空间分布与年均 VPD 相似,各季节西北部 VPD 值最高、中部和西部次之、东部和南部较低.冬季 VPD 的空间分布与其他季节差异较大,呈现出东南部最高、西部次之、北部较低分布特征.总体而言,对于年际、春季、夏季和秋季,西部、西北部大气水分亏缺程度较高,中部次之,东部、南部较低;对于冬季,南部、东南部大气水分亏缺程度较高,西部次之,北

部较低.

图 5 为 Theil-Sen Median 趋势分析结果,所有栅格的 β 值均大于 0,表明年际和各季节 VPD 均呈增加趋势.图中阴影为通过 Mann-Kendall 显著性检验的区域,表明在此区域 VPD 呈显著增加趋势 ($P < 0.05$).年均 VPD 显著增加区域的面积占比为 99.6%,其中东部和北部 VPD 显著增加的趋势更强.春季 VPD 全部为显著增加的区域,其中东南 VPD 显著增加的趋势更强;夏季 VPD 显著增加区域的面积占比为 99.8%,其中北部和东部 VPD 显著增加的趋

势更强;秋季 VPD 显著增加区域的面积占比为 33.4%,主要分布于北部和东南地区;冬季 VPD 显著

增加区域的面积占比为 49.8%,其中南部 VPD 显著增加的趋势更强,中部和北部次之。

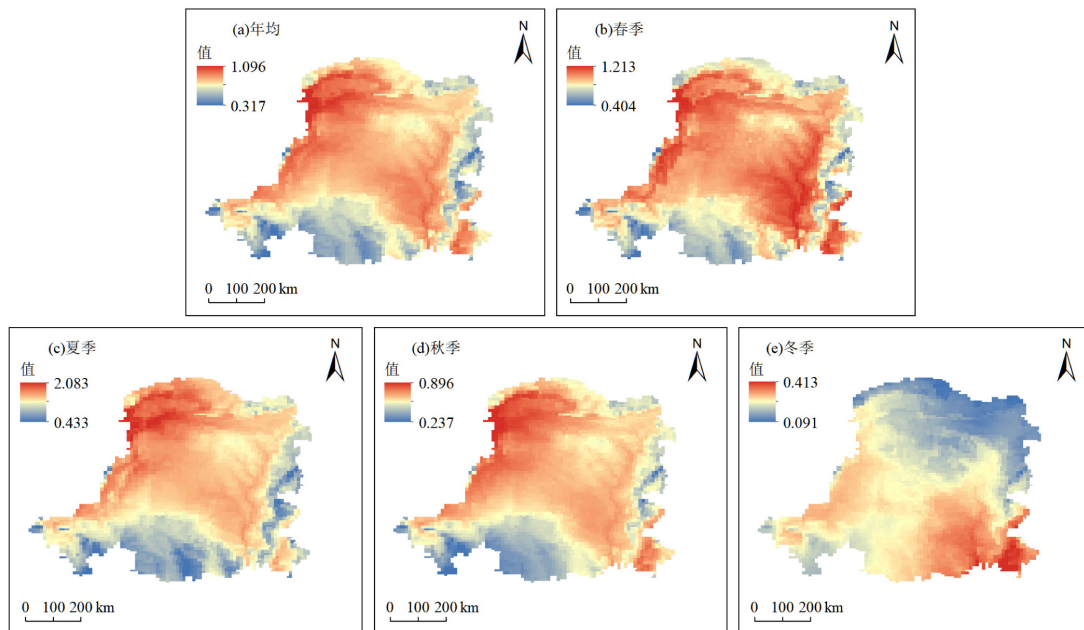


图 4 黄河几字弯地区年际和各季节 VPD 的空间分布特征

Fig.4 The spatial distribution characteristics of interannual and seasonal VPD in Jizi Bay of the Yellow River

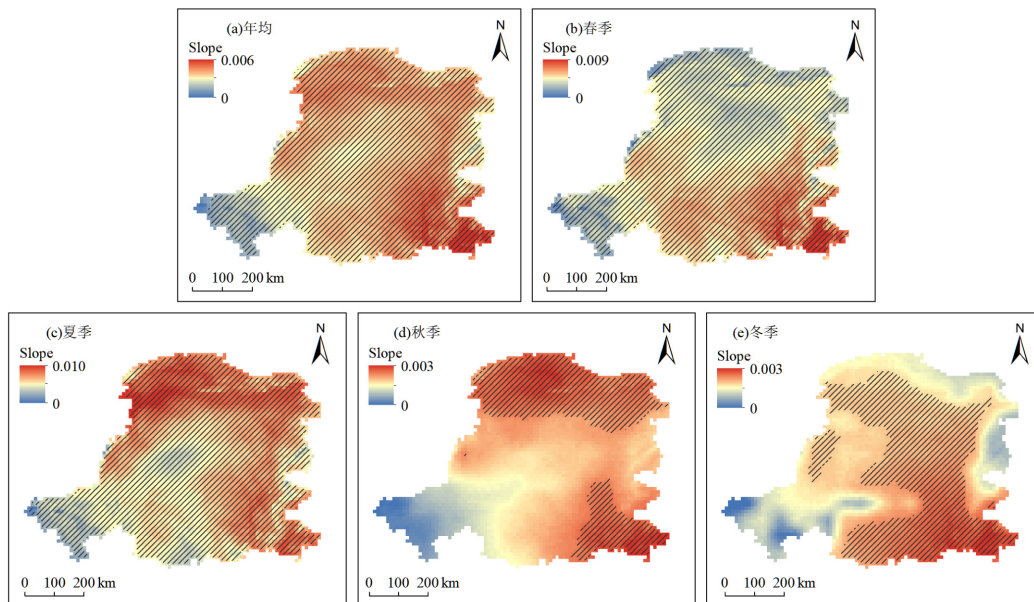


图 5 黄河几字弯地区年际和各季节 VPD 的时空变化趋势

Fig.5 The spatio-temporal trends of interannual and seasonal VPD in Jizi Bay of the Yellow River

图中阴影为显著变化区域($P < 0.05$)

2.2 基于地理探测器的影响因素分析

各影响因子按照 q 值大小依次为:DSM、SSM、PRE、TEM、NP、NDVI(表 1).DSM 对 VPD 的驱动作用最强($q=0.421$),SSM、PRE 的 q 值均大于 0.3,

表明水分条件(土壤水分和降水)是引起该区大气水分亏缺空间分异的主要原因.TEM、NR 的 q 值均大于 0.2,表明净辐射和温度条件为次要原因.对整个研究区而言,NDVI 对该区大气水分亏缺的影响程度较

弱,其 q 值最小(0.123).

进一步利用地理探测器的交互探测模型,探讨各因子交互作用的强弱(图 6).各影响因子的交互作用强度远高于单因子的作用,表现为双因子增强或非线性增强作用,表明多因子共同驱动该区大气水分亏缺的空间分异.其中,PRE 和 TEM 的交互作用对 VPD 的影响最强($q=0.713$),其次为 DSM \cap TEM ($q=0.652$)、SSM \cap TEM($q=0.606$).DSM 与 NDVI 和 PRE 的交互作用对 VPD 的影响也较强(q 值分别为 0.597 和 0.595).

表 1 黄河几字弯 VPD 影响因素的探测结果

Table 1 Detection results of influencing factors of VPD in Jizi Bay of the Yellow River

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
q 值	0.358	0.421	0.123	0.331	0.244	0.202

注: X_1 为表层土壤水分(SSM); X_2 为深层土壤水(DSM); X_3 为归一化植被指数(NDVI); X_4 为降水量(PRE); X_5 为温度(TEM); X_6 为净辐射(NR).

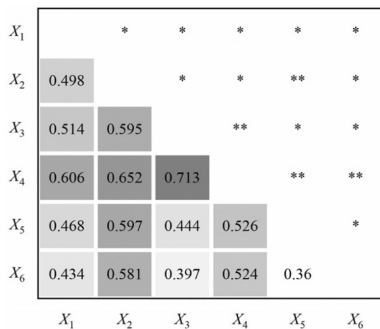


图 6 黄河几字弯 VPD 影响因素的交互探测结果

Fig.6 Interactive detection results of influencing factors on VPD in Jizi Bay of the Yellow River

X_1 为表层土壤水分(SSM); X_2 为深层土壤水(DSM); X_3 为降水量(PRE); X_4 为温度(TEM); X_5 为归一化植被指数(NDVI); X_6 为净辐射(NR);*为两因素交互作用结果表现为双因子增强;**为两因素交互作用结果表现为非线性增强

2.3 基于 GTWR 模型的影响因素分析

2.3.1 模型选择 各因子的方差膨胀因子(VIF)均小于 10 且容差均大于 0.1,表明各因子之间无多重共线性(表 2).

再利用 ArcGIS 的 GTWR 插件,对影响因素进行时空地理加权回归,选择以 AICc 准则和调整拟合度 R^2 作为模型的置信度评价指标(表 3).GTWR 模型的 AICc 值较 GWR、MGWR 模型分别降低

1146.952 和 892.720; R^2 和调整后 R^2 均高于 GWR、MGWR 模型.GTWR 模型的结果明显优于 GWR、MGWR 模型,同时鉴于时空维度的 GTWR 模型具有更高的准确性,因此选取 GTWR 模型探究几字弯 VPD 影响因素的时空异质性.

表 2 多重共线性检验

Table 2 Test for multicollinearity

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
VIF	6.666	4.954	3.271	7.913	1.614	2.713
容差	0.150	0.202	0.306	0.126	0.620	0.369

注: X_1 为表层土壤水分(SSM); X_2 为深层土壤水(DSM); X_3 为归一化植被指数(NDVI); X_4 为降水量(PRE); X_5 为温度(TEM); X_6 为净辐射(NR).

表 3 不同空间回归模型的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of different spatial regression models

参数	GWR	MGWR	GTWR
RSS	42.320	4.092	0.660
AICc	245.952	-8.280	-901
R^2	0.687	0.970	0.997
调整后 R^2	0.669	0.961	0.996

注: RSS 为残差平方和;AICc 为修正赤池信息准则; R^2 为拟合优度.

2.3.2 影响因素的时间变化特征 基于 GTWR 模型结果,绘制各因子回归系数的年代际变化箱图.由图 7 可见,从 1980s 到 2010s,SSM 回归系数的均值、中位数、最大值均逐渐降低,SSM 对 VPD 的影响逐渐减弱.从 1980s 到 1990s,DSM 回归系数的均值、中位数、最小值均逐渐降低,DSM 对 VPD 的影响增强;从 1990s 到 2010s,DSM 回归系数的中位数、最小值均逐渐增加;同时 DSM 回归系数的离散程度逐渐降低(极差逐渐变小),表明 DSM 对 VPD 的影响逐渐减弱,且影响的空间异质性也在逐渐减小.

从 1980s 到 2010s,NDVI 回归系数的均值、中位数、最小值均有所降低;同时 NDVI 回归系数的离散程度(极差)均较大,表明 NDVI 对 VPD 的影响有所增强,但影响的空间异质性较大且维持不变.PRE 回归系数的均值、中位数、最小值均逐渐降低,表明 PRE 对 VPD 的影响逐渐增强.TEM 回归系数的均值、中位数、最大值均逐渐增加,表明 TEM 对 VPD 的影响逐渐增强.NR 回归系数的均值、中位数、最

大值均逐渐降低.同时 NR 回归系数的离散程度(极差)逐渐降低,表明 NR 对 VPD 的影响逐渐减弱,且影响的空间异质性也在逐渐减小(图 7).

综合而言,PRE 和 TEM 对 VPD 的影响较强,且

从 1980s 到 2010s 其影响程度逐渐增强.土壤水分(DSM 和 SSM)对 VPD 的影响次之,但从 1990s 到 2010s 其影响程度逐渐减弱.NDVI 和 NR 对 VPD 影响的空间异质性较大,存在影响较强的区域.

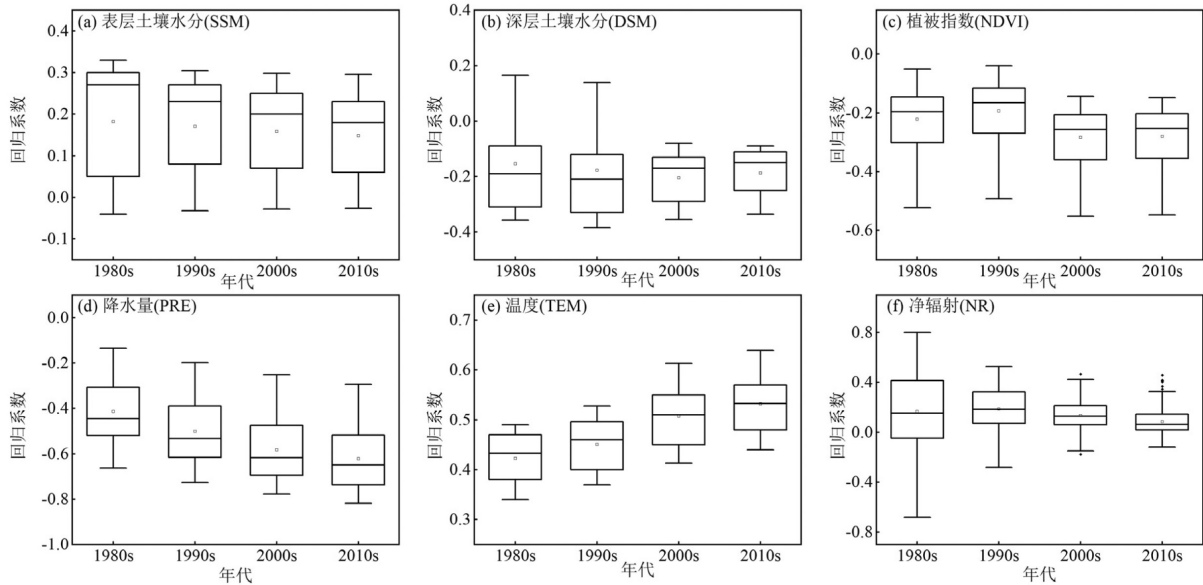


图 7 各影响因素 GTWR 回归系数的年代际变化箱

Fig.7 Box plots of interdecadal variation of the GTWR regression coefficients for various influencing factors

2.3.3 影响因素的时空异质性分析 基于 GTWR 模型结果,绘制各因子回归系数的空间分布图.如图 8 所示,在 1980s、1990s、2000s 和 2010s, SSM 的回归系数基本上均为正值,且几字弯东部的回归系数高于西部,北部回归系数再次之.表明 SSM 对 VPD 的增加起到促进作用,且东部 SSM 的促进作用均强于西部.此外,从 1980s 到 2010s 东、西部 SSM 的促进作用均呈减弱趋势.DSM 的回归系数在 4 个年代均为负值,且回归系数从西北部向东南部逐渐降低.表明 DSM 对 VPD 的增加起到限制作用,且这种限制作用均从西北向东南逐渐增加.此外,从 1990s 到 2010s,基本上各区域 DSM 的限制作用均呈逐渐减弱趋势.PRE 的回归系数在 4 个年代均为负值,且回归系数从几字弯西北部向东南部逐渐降低.表明 PRE 对 VPD 的增加起到限制作用,且这种限制作用均从西北部向东南部逐渐增加.与此同时,从 1980s 到 2010s 各区域 PRE 的限制作用均呈逐渐增加趋势.

如图 9 所示,在 1980s、1990s、2000s 和 2010s, TEM 的回归系数在 4 个年代均为正值,且回归系数

从北部向南部逐渐降低.表明 TEM 对 VPD 的增加起到促进作用,且这种促进作用均从北部向南部降低.与此同时,从 1980s 到 2010s 各区域 TEM 的促进作用均呈逐渐增加趋势.NDVI 的回归系数均为负值,且回归系数从几字弯西北部向东南部逐渐降低.表明 NDVI 对 VPD 的增加起到限制作用,且这种限制作用均从西北部向东南部逐渐增加.值得注意的是,NDVI 回归系数的空间分布差异较大,东南部 NDVI 对 VPD 的限制作用较强,而西北部较弱.整体而言,2000 年后各区域 NDVI 对 VPD 的限制作用强于 2000 年前的限制作用.在 4 个年代,NR 回归系数的空间分布差异较大.在 1980s 和 1990s,南部 NR 对 VPD 的限制作用较强,西北部 NR 对 VPD 的促进作用较强.然而在 2000s,整个区域 NR 对 VPD 的影响较弱.在 2010s,NR 对 VPD 几乎无影响.

综合而言,在时空尺度上,从 1980s 到 2010s,PRE 和 NDVI 对 VPD 的限制作用随着时间从西北部向东南部逐渐增强;TEM 对 VPD 的促进作用随着时间从南部向北部逐渐增加;DSM 对 VPD 的限制作用随着时间从东南部向西北部逐渐减弱;东部 SSM 对

VPD 的促进作用较强,但随着时间减弱.南部和西北部 NR 仅在 2000 年前对 VPD 存在较强地影响.

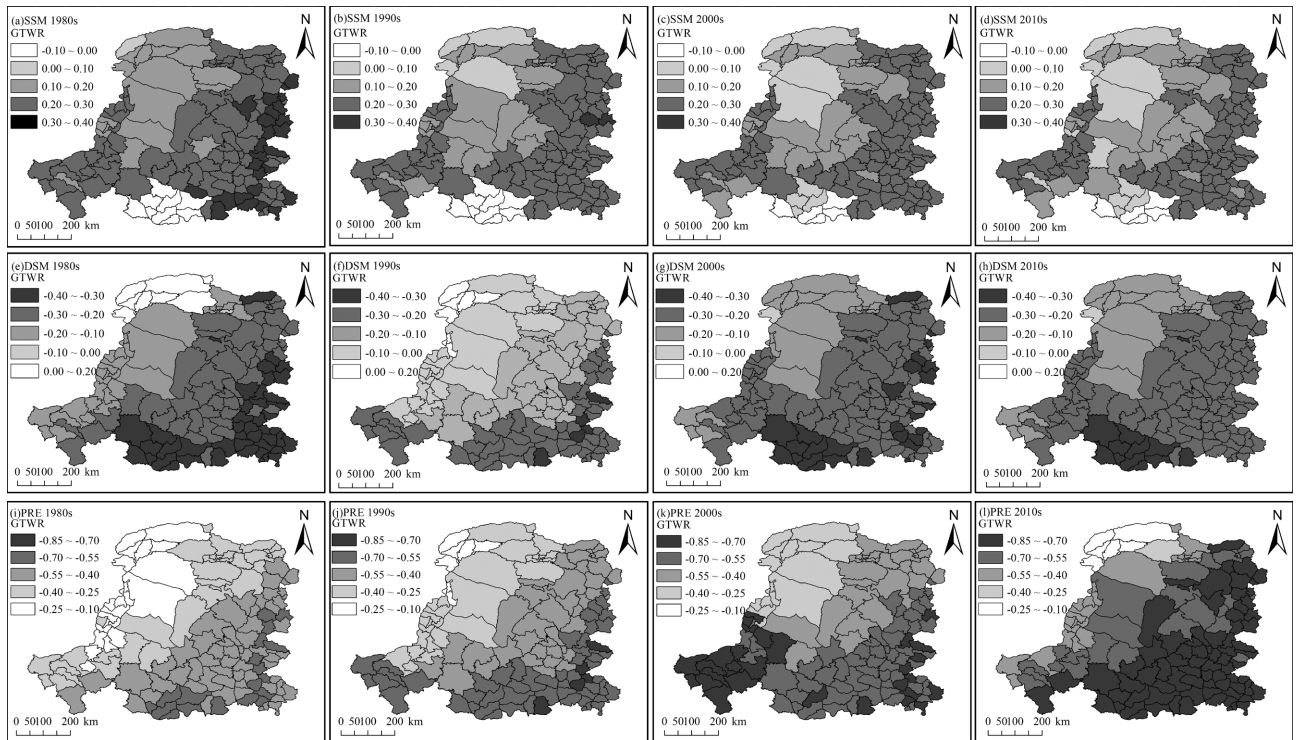


图 8 不同水分因子的 GTWR 回归系数

Fig.8 Regression coefficients of GTWR for different moisture factors

SSM 为表层土壤水分;DSM 为深层土壤水分;PRE 为降水量

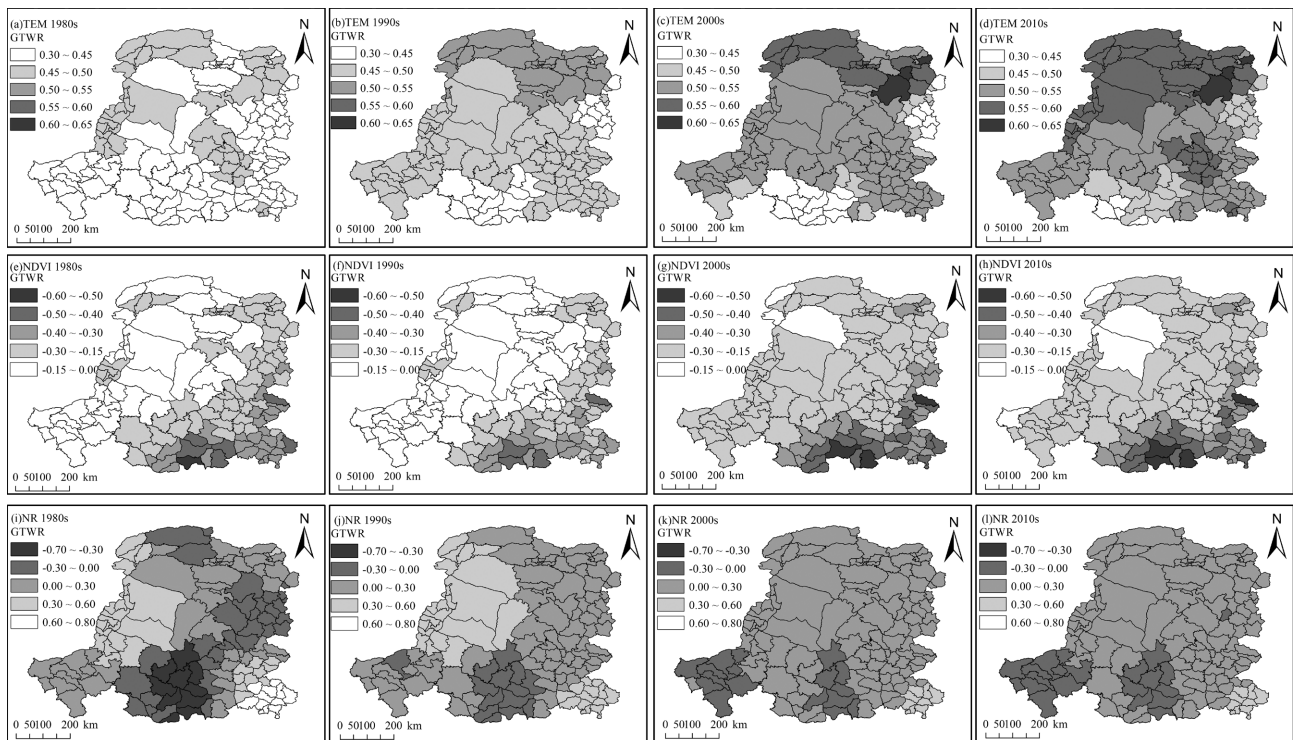


图 9 温度、植被、净辐射因子的 GTWR 回归系数

Fig.9 Regression coefficients of GTWR for temperature, vegetation and net radiation factors

TEM 为温度;NDVI 为植被指数;NR 为净辐射

3 讨论

3.1 VPD 变化趋势的对比分析

近 40 年,几字弯地区多年平均 VPD 总体呈显著上升趋势,增加速率平均为 0.039kPa/10a,同黄河流域 [0.030kPa/10a]^[23]、宁夏 [0.036kPa/10a] 和新疆 [0.033kPa/10a]^[4]的增加速率近似.该区 VPD 增速高于中亚地区 [0.021kPa/10a]^[34]、甘肃 [0.026kPa/10a]、青海 [0.021kPa/10a] 和陕西 [0.012kPa/10a]^[4],更高于全球 VPD 长期趋势 [0.018kPa/10a]^[9]、中国 VPD 平均增加速率 [0.018kPa/10a]^[22]、中国西南地区 2000 年前的增速 [0.010kPa/10a],但低于西南地区 2000 年后的增速 [0.050kPa/10a]^[5].此外,除几字弯地区西部,其他区域在 2004 年后增加速率有所缓解.这种减缓趋势同样存在于 2005 年后的新疆夏季^[4]以及中国湿润区和半干旱区^[2].

3.2 VPD 变化的驱动因子分析

Dong 等^[22]基于随机森林回归模型发现,中国区域降水对 VPD 变化的重要性较弱.然而,在中国北方的内蒙古^[35]、青海^[7]降水与 VPD 存在显著的负相关关系,几字弯地区 PRE 对 VPD 也存在较强地限制作用(回归系数的中位数为-0.648).根据 VPD 的公式,其变化由空气中的湿度和空气温度直接引起.较高的降水量增加大气湿度,大气的实际水汽压随之增加,致使 VPD 值减小,大气水分亏缺程度降低.

相较于温度,中国大部分地区、中亚、东欧北部和中西伯利亚北部等地区的实际水汽压对 VPD 的影响更强^[1].中国青海^[7]和西南地区^[5],在 2000 年后相对湿度的快速降低是饱和水汽压差加速增长的主要原因.虽然几字弯地区 VPD 与温度存在较强的正相关关系(回归系数的中位数为 0.532),但同样弱于其与降水的负相关关系.根据 VPD 的公式,较高的温度引起饱和水汽压的升高,致使其数值增加.但在水分条件整体不佳的几字弯地区,温度的影响程度弱于水分条件对 VPD 的限制作用.此外,降水和温度的交互作用对该区 VPD 的影响最强(q 值为 0.713).

由于陆地—大气相互作用,土壤水分与 VPD 存在强耦合关系^[3,36].西班牙表层土壤水分与年际和所有季节 VPD 均具有较好的相关性^[21],几字弯地区表层土壤水分对 VPD 也存在增强作用.已有研究证明,黄土高原 NDVI 的增加可显著降低土壤蒸发量

($p < 0.05$)^[37].因此,较好的表层土壤水分,促进植被生长,NDVI 值增加,致使该区土壤蒸发量降低,近地表实际水汽压也随之降低,VPD 值增加.

在几字弯地区,相较于表层土壤水分对 VPD 的影响,深层土壤水分和 NDVI 的限制作用更强,且两者的影响程度具有相似的空间分布特征(图 8 和图 9).同时深层土壤水分与降水、温度和 NDVI 的交互作用对 VPD 具有强烈的影响(q 值分别为 0.652、0.597 和 0.595),且远高于单因子的作用.干旱半干旱区植物根系较深,而深层土壤水分决定植物根系可以提取的水量,可直接限制植物光合作用^[38-39].较好的深层土壤水分,促进植物光合作用和植物生长^[19,40],进而可显著增加黄土高原植被蒸腾和冠层截留蒸发($P < 0.05$)^[37].此外,相较于气象因子,植被变化是蒸散发变化的主导因子^[41],超过 70%的蒸散发量通过植物蒸腾的形式实现^[42].植物从根层中获得的水分越多,植物生长越好,经蒸腾作用到大气中的水汽越多.因而,较好的降水、深层土壤水分和植被覆盖度使近地表实际水汽压增加,导致 VPD 减小;反之,近地表实际水汽压减少,VPD 增加.这种现象同样存在于全球范围内,其 VPD 的增加主要归因于近地表实际水汽压增长率的减速^[43];中国西北干旱荒漠和内蒙古半干旱草原区 VPD 与土壤含水量也呈现显著的负相关关系^[22].

此外,NDVI 对 VPD 影响程度的空间异质性较高,在研究区西北部其影响程度较弱,在东南部较强.因此,对于整个区域平均而言,NDVI 对 VPD 影响较弱.

3.3 VPD 驱动因子的变化特征

随着全球气候变暖的加剧,温度升高会导致饱和水汽压的增加,进而可能加剧大气水分亏缺程度.同时,VPD 的增加又进一步放大和加剧增温幅度^[44].然而,实际水汽压的变化受到多种因素的影响,如降水量的减少、陆地蒸散发的增加、植被覆盖度的变化等,这使得 VPD 的变化趋势变得更为复杂^[8,16,39].已有研究表明,影响中国湿润区和干旱区 VPD 增加的第一主导气象要素,在 2000 年后由气温转变为绝对湿度,而半湿润区的主导气象要素由降水转变为气温,半干旱区仍由气温主导^[2];影响青海 VPD 的第一主导气象因子在 1998 年后由最高温度转变为相对湿度^[7].与这些研究结果不同的是,从 1980s 到 2010s 几字弯地区 VPD 的主要影响因素均为水分条件,次要因素

均为温度条件.此外,该区东南部 NDVI 对 VPD 存在较强影响.然而,在 2000 年后,该区降水、温度的影响作用逐渐增强,深层土壤水分、表层土壤水分的影响作用逐渐减弱,东南部 NDVI 的影响几乎无变化.表明在 21 世纪气候因素对该区 VPD 的影响逐渐增强,土壤水分的作用减弱,植被指数的影响维持不变.

4 结论

4.1 几字弯地区西北部大气水分亏缺程度最高,中部和西部次之、东部和南部较低.夏季大气水分亏缺程度最高,春季次之.

4.2 近 40 年,各区域年际和各季节大气水分亏缺程度均呈显著增加趋势($P < 0.05$),夏季 VPD 增幅最强[0.072kPa/10a];东部年际 VPD 增幅较强[0.045kPa/10a].

4.3 在年际尺度上,水分条件(降水和土壤水分)对 VPD 的影响强于温度条件,且降水与温度的交互作用对 VPD 影响最强;深层土壤水分对 VPD 具有较强的影响,特别是其与降水、温度和 NDVI 的交互作用对 VPD 影响强烈.

4.4 在时间尺度上,从 1980s 到 2010s,气候因子(降水和温度)的影响程度逐渐增强,土壤水分的影响程度逐渐减弱.在时空尺度上,从 1980s 到 2010s,从西北部向东南部,降水和 NDVI 对 VPD 的限制作用逐渐增强;从南部向北部,温度对 VPD 的促进作用逐渐增加;从东南部向西北部,深层土壤水分对 VPD 的限制作用逐渐减弱;东部表层土壤水分对 VPD 的促进作用也在减弱.

参考文献:

- [1] Cheng M, Zuo Z, Lin Z, et al. The decadal abrupt change in the global land vapor pressure deficit [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023,66: 1521–1534.
- [2] 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 [J]. *气候与环境研究*, 2021,26(4):413–424.
Yuan R R, Huang X L, Hao L. Spatiotemporal variation and influencing factors of saturated water vapor pressure difference in China in recent 40 years [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021,26(4):413–424.
- [3] Chen S, Zhang S, Wu S. Diverse spatiotemporal patterns of vapor pressure deficit and soil moisture across China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024,52:101712.
- [4] 韩永贵,韩磊,黄晓宇,等.基于指数平滑和 ARIMA 模型的西北地区饱和水汽压差预测 [J]. *干旱区研究*, 2021,38(2):303–313.
Han Y G, Han L, Huang X Y, et al. Prediction of saturated water vapor pressure difference in Northwest China based on exponential smoothing and ARIMA model [J]. *Arid Zone Research*, 2021,38(2): 303–313.
- [5] 宁梓好,徐宪立,杨东,等.中国西南地区饱和水汽压差的年际变化及其影响因素 [J]. *农业现代化研究*, 2022,43(1):172–179.
Ning Z Y, Xu X L, Yang D, et al. Interannual variation of saturated water vapor pressure difference in southwest China and its influencing factors [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022,43(1):172–179.
- [6] 姜萍,袁野.新疆植被总初级生产力对大气水分亏缺的响应 [J]. *干旱区地理*, 2024,47(3):403–412.
Jiang P, Yuan Y. Response of total primary productivity of vegetation to atmospheric water deficit in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2024,47(3):403–412.
- [7] 李素云,祁栋林,温婷婷,等.1961–2020 年青海省饱和水汽压差变化特征及影响因素分析 [J]. *干旱区研究*, 2023,40(2):173–181.
Li S Y, Qi D L, Wen T T, et al. Characteristics and influencing factors of saturated water vapor pressure difference in Qinghai Province from 1961 to 2020 [J]. *Arid Zone Research*, 2023,40(2):173–181.
- [8] Fang Z, Zhang W, Brandt M, et al. Globally increasing atmospheric aridity over the 21st century [J]. *Earth's Future*, 2022,10(10):195–208.
- [9] Yuan W, Zheng Y, Piao S, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth [J]. *Science advances*, 2019,5(8):eaax1396.
- [10] Song Y, Jiao W, Wang J, et al. Increased global vegetation productivity despite rising atmospheric dryness over the last two decades [J]. *Earth's future*, 2022,10(7):109–113.
- [11] Konings A G, Williams A P, Gentile P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation [J]. *Nature Geoscience*, 2017,10:284–288.
- [12] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes [J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(11):1023–1027.
- [13] Li F, Xiao J, Chen J, et al. Global water use efficiency saturation due to increased vapor pressure deficit [J]. *Science*, 2023,381(6658): 672–677.
- [14] Cai G, Wankmüller F, Ahmed M A, et al. How the interactions between atmospheric and soil drought affect the functionality of plant hydraulics [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2023,46(3):733–735.
- [15] Huang C, Huang J, Xiao J, et al. Global convergence in terrestrial gross primary production response to atmospheric vapor pressure deficit [J]. *Science China Life Sciences*, 2024,43:345–356.
- [16] Yu X, Zhang L, Zhou T, et al. Higher atmospheric aridity-dominated drought stress contributes to aggravating dryland productivity loss under global warming [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2024,44: 100692.
- [17] Mirabel A, Girardin M P, Metsaranta J, et al. Increasing atmospheric dryness reduces boreal forest tree growth [J]. *Nature Communications*, 2023,14(1):6901.
- [18] Shekhar A, Buchmann N, Humphrey V, et al. More than three-fold increase in compound soil and air dryness across Europe by the end of 21st century [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2024,44:100666.
- [19] Zhong Z, He B, Wang Y P, et al. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity [J]. *Science advances*, 2023,9(32):eadf3166.
- [20] Ghanem M E, Kehel Z, Marrou H, et al. Seasonal and climatic variation of weighted VPD for transpiration estimation [J]. *European*

- Journal of Agronomy, 2020,113:125966.
- [21] Chen S, Zhang S, Wu S. Diverse spatiotemporal patterns of vapor pressure deficit and soil moisture across China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024,52:101712.
- [22] Dong J, Wu L, Zeng W, et al. Analysis of spatial-temporal trends and causes of vapor pressure deficit in China from 1961 to 2020 [J]. Atmospheric Research, 2024,299:107199.
- [23] 樊玉苗,靳晓辉.近 40 年来黄河流域饱和水汽压差时空演变 [C]//见:中国水利学会.2022 中国水利学术大会论文集(第一分册).北京:黄河水利出版社, 2022:350-356.
- Fan Y M, Jin X H. Spatiotemporal evolution of saturated water vapor pressure difference in the Yellow River Basin in the past 40years [C]// China Water Conservancy Society. Proceedings of the 2022 China Water Resources Academic Conference (Volume 1). Beijing: Yellow River Water Conservancy Press, 2022:350-356.
- [24] 李玲蔚,白永平,杨雪菽,等.黄河几字湾地区可持续发展的动态演变及区域差异 [J]. 干旱区地理, 2022,45(2):639-649.
- Li L W, Bai Y P, Yang X D, et al. Dynamic evolution and regional differences of sustainable development in Jizi Bay of the Yellow River [J]. Arid Land Geography, 2022,45(2):639-649.
- [25] 王 枫,陈幸良.黄河“几”字湾(榆林)林草生态保护修复主要问题及对策 [J]. 林草政策研究, 2021,1(1):76-80.
- Wang F, Chen X L. The main problems and countermeasures of ecological protection and restoration of forest and grass in Jizi Bay of the Yellow River (Yulin) [J]. Journal of Forestry and Grassland Policy, 2021,1(1):76-80.
- [26] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958 to 2015 [J]. Scientific Data, 2018,5:170191.
- [27] 肖 潇,邱新法,徐金勤.基于 TerraClimate 数据集的 1960~2019 年中国干湿气候变化特征 [J]. 长江科学院院报, 2023,40(2):27-33.
- Xiao X, Qiu X F, Xu J Q. Characteristics of dry and wet climate change in China from 1960 to 2019 based on TerraClimate dataset [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023,40(2): 27-33.
- [28] Martí B, Jose U, Giovanni L, et al. Validation of ERA5-Land temperature and relative humidity on four peruvian glaciers using on-glacier observations [J]. Journal of Mountain Science, 2022,19(7): 1849-1873.
- [29] 朱 丽,吕潇雨,郭 浩,等.ERA5-Land 降水产品在黄河流域干旱监测中的适用性研究 [J]. 干旱气象, 2023,41(5):677-687.
- Zhu L, Lv X Y, Guo H, et al. Study on the applicability of ERA5-land precipitation products in drought monitoring in the Yellow River Basin [J]. Arid Meteorology, 2023,41(5):677-687.
- [30] Li M, Cao S, Zhu Z, et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS normalized difference vegetation index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022 [J]. Earth System Science Data, 2023,15: 4181-4203.
- [31] 邹桃红,徐艳艳,陈 鹏,等.洞庭湖流域 2000-2021 年植被覆盖时空动态特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):961-971.
- Zou T H, Xu Y Y, Chen P, et al. Spatiotemporal variations and their driving mechanism of vegetation coverage across Dongting Lake Basin from 2000 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2024,44 (2):961-971.
- [32] 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. Geographic detector: Principles and prospects [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [33] 王海军,张 彬,刘耀林,等.基于重心 GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析 [J]. 地理学报, 2018,73(6):1076-1092.
- Wang H J, Zhang B, Liu Y L, et al. Multidimensional analysis of urban expansion pattern and driving force of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on the center of gravity GTWR model [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(6):1076-1092.
- [34] 陈亚宁.中亚干旱区水-能-粮-生态系统评估与可持续发展 [M]. 北京:科学出版社, 2024.
- Chen Y N. Water-energy-food-ecosystem assessment and sustainable development in the arid regions of Central Asia [M]. Beijing: Science Press, 2024.
- [35] 唐 欢,李振旺,丁 蕾,等.基于地面涡度数据的中国草原区 GPP 遥感产品验证 [J]. 草业科学, 2018,35(11):2568-2583.
- Tang H, Li Z W, Ding L, et al. Verification of GPP remote sensing products in grassland areas of China based on ground eddy data [J]. Pratacultural Science, 2018,35(11):2568-2583.
- [36] Zhou S, Zhang Y, Park Williams A, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events [J]. Science Advances, 2019,5(1):eaau5740.
- [37] 蔡依靠,陈琳舒,吕世轩,等.基于 Google Earth Engine 的黄土高原植被变化对蒸散发分量影响研究 [J]. 地理科学, 2023,43(9):1649-1658.
- Cai Y F, Chen L S, Lv S X, et al. Study on the influence of vegetation change on evapotranspiration on the Loess Plateau based on Google Earth Engine [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023,43(9): 1649-1658.
- [38] Liu L, Gudmundsson L, Hauser M, et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally [J]. Nature Communications, 2020,11(1):4892.
- [39] Denissen J M C, Teuling A J, Pitman A J, et al. Widespread shift from ecosystem energy to water limitation with climate change [J]. Nature Climate Change, 2022,12(7):677-684.
- [40] Yao Y, Liu Y, Zhou S, et al. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought [J]. Global Change Biology, 2023,29(13): 3562-3574.
- [41] 陆 姣.中国区域土壤湿度-蒸散发-大气相互作用机制研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2022.
- Lu J. Study on the interaction mechanism of soil moisture-evapotranspiration-atmosphere in China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.
- [42] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration [J]. Nature, 2013,496(7445):347-350.
- [43] Xu W, Xia X, Piao S, et al. Weakened increase in global near-surface water vapor pressure during the last 20 Years [J]. Geophysical Research Letters, 2024,51(2):226-236.
- [44] Chiang F, Mazdiyasi O, AghaKouchak A. Amplified warming of droughts in southern United States in observations and model simulations [J]. Science Advances, 2018,4(8):eaat2380.

作者简介: 侯 迎(1985-),男,山东菏泽人,副教授,博士,主要从事气候变化及其生态环境效应研究.发表论文 30 余篇.holying@nxu.edu.cn.