

1961—2015年中国饱和水汽压差的时空变化特征

栾鹿鸣^{①②}, 王元鑫^③, 朱文彬^{①④*}

① 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院大学南京学院, 江苏 南京 211135;

③ 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083;

④ 青海大学 土木水利学院, 青海 西宁 810016

* 联系人, E-mail: zhuwb@igsrr.ac.cn

2023-08-11 收稿, 2023-10-23 接受

第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0802); 国家重点研发计划项目(2021YFC3000201); 国家自然科学基金项目(42071032); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2020056)

摘要 饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)是指示地区大气干燥程度的重要指标,探究我国各地区 VPD 时空变化特征对气候变化研究和实际农牧业生产等具有重要意义。基于全国 772 个气象站日平均气温和日相对湿度等资料,采用协同克里金插值、Mann-Kendall 趋势检验和偏相关分析等方法,对中国 1961—2015 年饱和水汽压差的时空分布及变化趋势特征进行分析,并讨论了 VPD 与气温和相对湿度的关系。结果表明:1961—2015 年中国 VPD 时空分布差异显著,时间上呈现夏高冬低的特征,空间上年均 VPD 高值主要集中在西北干旱半干旱区,低值主要分布在东北地区、青藏地区以及南方部分地区。全国绝大部分地区 VPD 呈升高趋势,以 2000 年为突变点,平均升高趋势由 1.519 6 hPa/(10 a)增长到 7.074 3 hPa/(10 a)。南方地区与北方地区 VPD 变化的主导因子均是最高气温,而西北地区和青藏地区 VPD 变化的主导因子分别为平均气温和相对湿度;四个地区突变年前后 VPD 变化的主导因子保持不变。

关键词饱和水汽压差;
时空变化;
Mann-Kendall
检验;
偏相关分析

全球气候变化及其对地球生态系统的影响是当今重要的研究热点之一。饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)定义为一定气温下空气饱和水汽压(e_s)与实际水汽压(e_a)的差值(Ghimire et al., 2022; 程梦琦等, 2023),代表空气距离水汽饱和状态的差异程度。诸多研究表明,VPD 作为衡量大气干燥程度的关键指标,在全球气候变暖的大背景下发生了深刻而显著的变化(Yuan et al., 2019; He et al., 2021)。探究 VPD 时空变化特征对于气候风险防范、农牧业生产和水资源管理等具有重要意义。

具体来说,VPD 是水文循环过程的重要驱动力(金佳鑫等, 2023),与蒸散发(evapotranspiration, ET)速率直接相关(韩宇平等, 2018; 陈镜明等, 2020),特别是在植被稀疏或无植被的地表,VPD 的

增加将显著促进蒸散发的增加(Ficklin and Novick, 2017)。此外,VPD 作为重要的生态因子,对植物叶片的气孔导度有直接影响,过高的 VPD 将导致气孔开度降低以防止过多水分流失,但同时也会降低光合作用速率,从而影响植物发育与作物产量(Jarvis, 1976; 张红梅等, 2014)。根据 VPD 变化可以有效监测区域尺度的气象干旱与植被动态特征(Li et al., 2021)。另外,VPD 对气候变化也有显著影响,厘清 VPD 年际变化特征有助于深入理解大气干湿程度对气候变化的响应。宁梓好等(2022)探讨了中国西南地区 VPD 的年际变化特征;结果表明,在突变点后西南地区 VPD 发生显著变化,主要是由于气温上升对相对湿度的影响。Seage et al. (2015)研究发现,美国西南内陆 VPD 偏高与拉尼娜现象明显相

引用格式:栾鹿鸣,王元鑫,朱文彬,2024.1961—2015年中国饱和水汽压差的时空变化特征[J].大气科学学报,47(6):904-916.

Luan L M, Wang Y X, Zhu W B, 2024. Spatio-temporal variations of vapor pressure deficit in China from 1961 to 2015[J]. Trans Atmos Sci, 47(6): 904-916. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230811001. (in Chinese).

关,这种相关性是通过洋流作用引起的。VPD 不仅在水文学、生态学和气象学研究中具有重要地位,在其他领域也扮演着重要角色。譬如,VPD 可被用来合理解释火灾烧毁面积的年际变化。Chiodi et al. (2021)研究了1980—2019年美国西部夜间的VPD变化,发现夜间VPD增加是火灾日越来越长的原因。此外,在某些生物实验工作中,VPD被认为比相对湿度(relative humidity, RH)更适合作为记录指标(Anderson, 1936)。

由于VPD在相关领域中的重要作用,国内学者已开展了较多区域尺度VPD相关研究,但在全国尺度上VPD变化的时空差异性对比分析尚缺乏。在此背景下,本文基于对大量气象观测数据的收集与分析,以空间插值和统计分析为主要研究方法,拟揭示我国VPD在不同时间尺度、不同地理分区的时空差异性与趋势特征,并探析其驱动因素,旨在为相关部门和决策者提供参考,促进我国气候适应性能力的提升,并推动可持续发展战略的实施。

1 数据与方法

1.1 数据

中国地域辽阔,气候类型复杂多样,绝大多数地区属于季风性气候区,年降水量从南至北、从东到西逐步递减。受此影响,植被类型在不同地区之间差异显著,整体上东南地区植被覆盖度高于西北地区。为分析我国不同地理分区VPD差异,本研究根据张元杰等(2022)的研究,将研究区划分为北方地区、南方地区、西北地区和青藏地区(图1)。所采用的分界线来自于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。北方地区指中国东部季风区的北部,主要是秦岭-淮河一线以北,大兴安岭、乌鞘岭以东的地区,东临渤海和黄海,属于温带大陆性季风气候和暖温带大陆性季风气候;南方地区指中国东部季风区的南部,秦岭-淮河一线以南的地区,西接青藏高原,东部与南部濒临东海和南海,以亚热带季风气候和热带季风气候为主;西北地区位于昆仑山-阿尔金山-祁连山和长城以北,大兴安岭、乌鞘岭以西,自东向西由大陆性半干旱气候向大陆性干旱气候过渡;青藏地区位于中国西南边陲,横断山脉及其以西,喜马拉雅山及其以北,昆仑山、阿尔金山和祁连山及其以南,高原气候特征明显。

气象数据来自国家气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。本文选用中国陆面区域772个气象观测站1961—2015年的逐日气象资料,包括日最高气

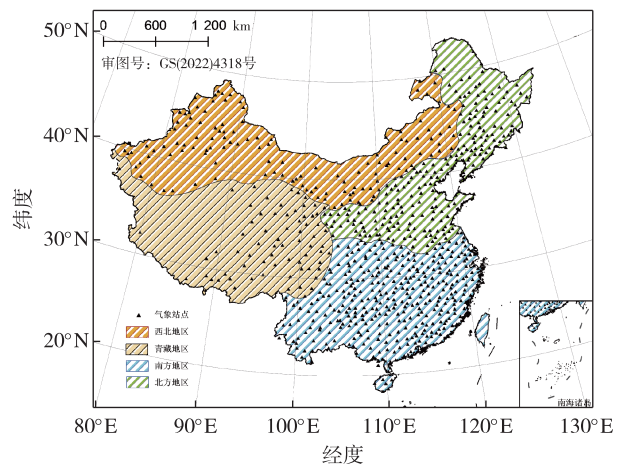


图1 研究区气象站点空间分布

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations in the study area

温、日最低气温、日平均气温和相对湿度。上述4个地理分区的气象站点数量分别为218、354、130和70。

1.2 研究方法

1.2.1 VPD计算方法

空气中含有的水汽所产生的压强为水汽压。若在某一给定气温下,水汽压不断增加使得水汽达到饱和出现凝结,此时的水汽压称为该气温下的饱和水汽压(陈钦弟,1997)。目前已有多个饱和水汽压计算公式,本文对较为常用的饱和水汽压公式——Claperyron-Clausius方程(Bisht and Bras, 2010)和Tetens经验公式(Allen et al., 1998;陈祥明和赵振维,2013)进行比较计算。

Claperyron-Clausius方程是以理论概念为基础,基于物质平衡关系,把饱和水汽压随气温的变化、容积的变化与过程的热效应联系起来,公式如下:

$$e_s = 0.611 \exp \left(\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{T+273.15} \right) \right) \quad (1)$$

其中: $L_v = 2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,为汽化潜热; $R_v = 461 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,为水汽的比气体常数; T 为气温(单位:°C)。

Tetens公式是根据Claperyron-Clausius方程,并假定蒸发潜热为常数推导出来的,公式为:

$$e_s = 0.611 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \quad (2)$$

为比较两个公式的结果差异,用式(1)减去式(2),得到两式结果差与气温的关系,如图2所示。

从图2可以看出,在-50~10°C范围内两公式计算结果差异非常微小,在10°C以后差异逐渐明

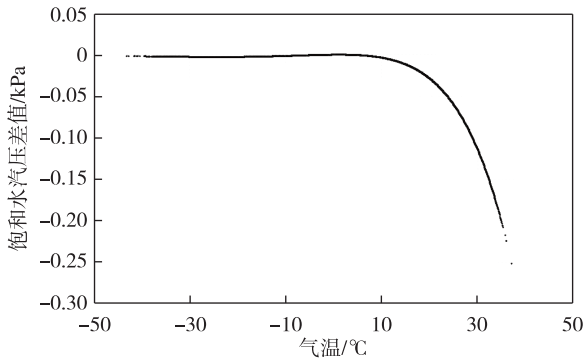


图2 不同饱和水汽压公式计算结果对比
Fig.2 Comparison of saturated water vapor pressure calculated using different formulas

显, Claperyron-Clausius 方程计算结果比 Tetens 经验公式结果偏低。考虑到国内大部分 VPD 研究学者使用 Tetens 经验公式(韩永贵等, 2021; 宁梓好等, 2022), 本文选择 Tetens 经验公式计算结果下的日尺度饱和水汽压数据进行 VPD (单位: kPa) 计算。公式如下:

$$D_{VP} = e_s - e_a, \quad (3)$$

$$e_a = e_s \times H_R. \quad (4)$$

其中: D_{VP} 表示 VPD; H_R 表示给定站点的相对湿度 (单位: %).

1.2.2 协同克里金插值法

空间插值算法在气象、地质、环境等领域具有广泛应用(丁卉等, 2016)。本文为分析 VPD 的空间分布特征, 利用空间插值方法对 VPD 进行可视化展示。目前常用的空间插值方法有克里金插值法、反距离加权插值法、面积权重内插法和样条函数法等, 这些方法优缺点和适用性各有不同(刘时栋等, 2019; 夏天等, 2020; 庞冉等, 2023; 智协飞等, 2023)。当前虽然有专业气象数据插值软件 ANUSPLIN 可进行气象要素的插值分析, 但其在起伏度巨大地区的适用性, 以及其误差的空间分布规律还需进一步研究(钱永兰等, 2010; 谭剑波等, 2016)。考虑到研究范围以及精度等综合因素, 本文选择应用最为广泛且效率与准确度较高的协同克里金插值法。

协同克里金插值法是克里金插值法的拓展, 除了主变量之外, 还引入协同区域化变量, 用于处理具有空间相关性的多个变量的插值问题(高文武等, 2018)。考虑两个变量的协同克里金法表达式(徐炳生等, 2022)为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \alpha_i Z(x_i) + \sum_{j=1}^n \lambda_j Y(x_j). \quad (5)$$

其中: $Z(x_0)$ 为待估值; $Z(x_i)$ 、 $Y(x_j)$ 分别为主变量及

协同变量; α_i 、 λ_j 分别为两变量的权重值。

1.2.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验方法, 用于检测时间序列数据中是否存在显著的变化趋势。该方法由 Mann (1945) 和 Kendall (1975) 提出, 广泛应用于环境科学、气象学、水文学等领域 (Mann, 1945; Kendall, 1975; 章诞武等, 2013)。Mann-Kendall 趋势检验方法如下。

对于具有 n 个样本的时间序列 $x_k (k = 1, 2, \dots, n)$, 计算检验统计量 S , 公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i), \quad i \neq j \text{ 且 } i, j \leq n. \quad (6)$$

其中:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0; \\ 0, & x_j - x_i = 0; \\ -1, & x_j - x_i < 0. \end{cases} \quad (7)$$

当 $n \geq 8$ 时, 统计量 S 近似服从正态分布, 在不考虑序列中等值数据点的情况下, 其均值为 0, 方差为:

$$v(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}. \quad (8)$$

标准化后的检验统计量 Z 的计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{v(S)}}, & S > 0; \\ 0, & S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{v(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (9)$$

给定置信水平 α , 若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则认为时间序列存在上升或下降的趋势, Z 大于 0 时是上升趋势, Z 小于 0 时则是下降趋势(王毅等, 2021)。本研究中变化趋势的程度用趋势度 β (单位: hPa/(10 a)) 表示(康淑媛等, 2009; 孙康慧等, 2019)。对于具有 n 个样本的时间序列 $x_k (k = 1, 2, \dots, n)$, 趋势度计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, j > i. \quad (10)$$

其中: x_j 和 x_i 分别表示时间序列为 j 和 i 时的数据值; Median 为中位数函数。当 $\beta > 0$ 时, 时间序列呈上升趋势, 反之则呈下降趋势。

根据符淙斌和王强 (1992) 的研究, 当 Mann-Kendall 方法进一步用于时间序列 x_k 突变检验时, 定义统计量 S_k :

$$S_k = \sum_{j=1}^k r_j, \quad r_j = \begin{cases} 1, & x_j > x_i \\ 0, & x_j \leq x_i \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, j; 2 \leq k \leq n. \quad (11)$$

在原序列随机独立等假设下, S_k 的均值和方差分别为:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \quad (12)$$

$$v(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, 2 \leq k \leq n. \quad (13)$$

S_k 标准化可得 $U_{F,k}$ 统计量 $S_{UF,k}$:

$$S_{UF,k} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{v(S_k)}}. \quad (14)$$

将此方法应用到 $x_k (k=1, 2, \dots, n)$ 逆序列中,计算逆序列的 U_{Fk} ,同时使 $U_{Bk} = -U_{Fk}, k=n, n-1, \dots, 1$, U_{B1} 为0,可得到 U_{Bk} 曲线。给定显著性水平 $\alpha=0.05$,当 U_F 或 U_B 的值大于0时,表示序列呈上升趋势,小于0表示下降趋势。 U_F 为统计量, U_B 为 U_F 的逆序列,当 U_F 或 U_B 的值超过显著性水平范围时,表明上升或下降趋势显著。若 U_F 和 U_B 两曲线在置信区间内出现交点,则该交点表示时间序列发生突变的节点(王爱慧等,2020;宁梓好等,2022)。

1.2.4 相关分析与偏相关分析

本文通过相关分析与偏相关分析研究 VPD 与气候变量之间的线性关系,相关系数计算公式为:

$$r_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}}. \quad (15)$$

其中: n 代表变量 a 和 b 观测值的样本量; a_i 代表变量 a 的第 i 个观测值; b_i 代表变量 b 的第 i 个观测值; \bar{a}, \bar{b} 分别代表变量 a 和 b 的平均值。

一阶偏相关系数的计算方法(胡晓萌等,2022;杨靖等,2022)如下:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{1-r_{ac}^2}\sqrt{1-r_{bc}^2}}. \quad (16)$$

其中: $r_{ab,c}$ 表示控制变量 c 前提下变量 a 和 b 之间的偏相关系数; r_{ab}, r_{ac}, r_{bc} 分别是两因子之间的相关系数。当 $r_{ab,c} > 0$ 时,表示 a 与 b 呈正相关关系;反之,则二者呈负相关关系。

2 结果与分析

本节主要探讨中国1961—2015年 VPD 的时空变化特征,以及 VPD 与气象因素之间的关系。首先使用 ArcGIS 软件的 Geostatistical Analyst 工具,对772个气象站点的 VPD 进行空间插值,得到全国 VPD 空间分布,以空间连续的方式解析 VPD 的时

空变化特征;然后以相关和偏相关分析为主要方法,分析 VPD 与气温、相对湿度等气象因素之间的关系。

2.1 VPD 时空分布特征

2.1.1 VPD 空间分布特征

以站点月均 VPD 和年均 VPD 计算结果为基础,将站点高程数据作为协同变量进行协同克里金插值,形成全国 VPD 空间分布,结果如图3所示。由图可知,全国年均 VPD 数值范围为0.127~1.547 kPa,平均值为0.526 kPa。年均 VPD 高值主要集中在西北干旱半干旱区,以新疆地区最为明显,这与该地区干旱少雨的特征相吻合(袁瑞瑞等,2021;朱斌等,2023),而年均 VPD 低值主要分布在东北地区、青藏地区以及南方部分地区。

从年内变化来看,我国 VPD 的分布整体呈现“夏季>春季>秋季>冬季”的特征。同时,不同地区在不同季节或月份也表现出明显的空间差异。春、夏、秋3个季节的 VPD 空间分布与年平均的空间分布情况类似,在夏季尤为明显。对于冬季来说,高值主要分布在中国西南及南部区域,尤其是云南以及广西等沿海地区,这是因为西南及华南地区纬度较低,冬季气温相较其他地理分区高,且该区域在冬季处于高压控制,空气较为干燥,使得该区域的 VPD 整体高于其他地区,而低值主要分布在东北地区以及新疆北部。

2.1.2 VPD 时间分布特征

图4展示了四个地理分区 VPD 月尺度及年尺度的统计结果。由图可知,西北地区年均 VPD (0.727 kPa)最高,南方地区(0.498 kPa)次之,北方地区年均 VPD (0.489 kPa)略小于南方地区,青藏地区年均 VPD (0.409 kPa)最低。结合图3空间分布可以看出,不同地理分区的 VPD 均呈现出夏高冬低的时间分布特征。其中,西北地区 VPD 年内变化最为显著,四大地理分区的最高与最低月均 VPD 均出现在西北地区,且差值达到了1.347 kPa。这与西北地区气温年内变化显著,夏季炎热、冬季酷冷,且缺乏降水导致水汽含量较低等因素有关(韩永贵等,2021)。北方地区月均 VPD 在0.147~0.957 kPa,年内 VPD 变化幅度较西北地区次之。南方地区最高月均 VPD 出现在7月,较其他3个地区滞后1个月,并且其冬季 VPD 高于其他3个地区。这种差异性可能是由于南方地区较其他地区提前1个月(6月)进入主雨季且降水达到顶峰导致相对湿度增加引起的。青藏地区 VPD 年内变化曲线最为平滑,

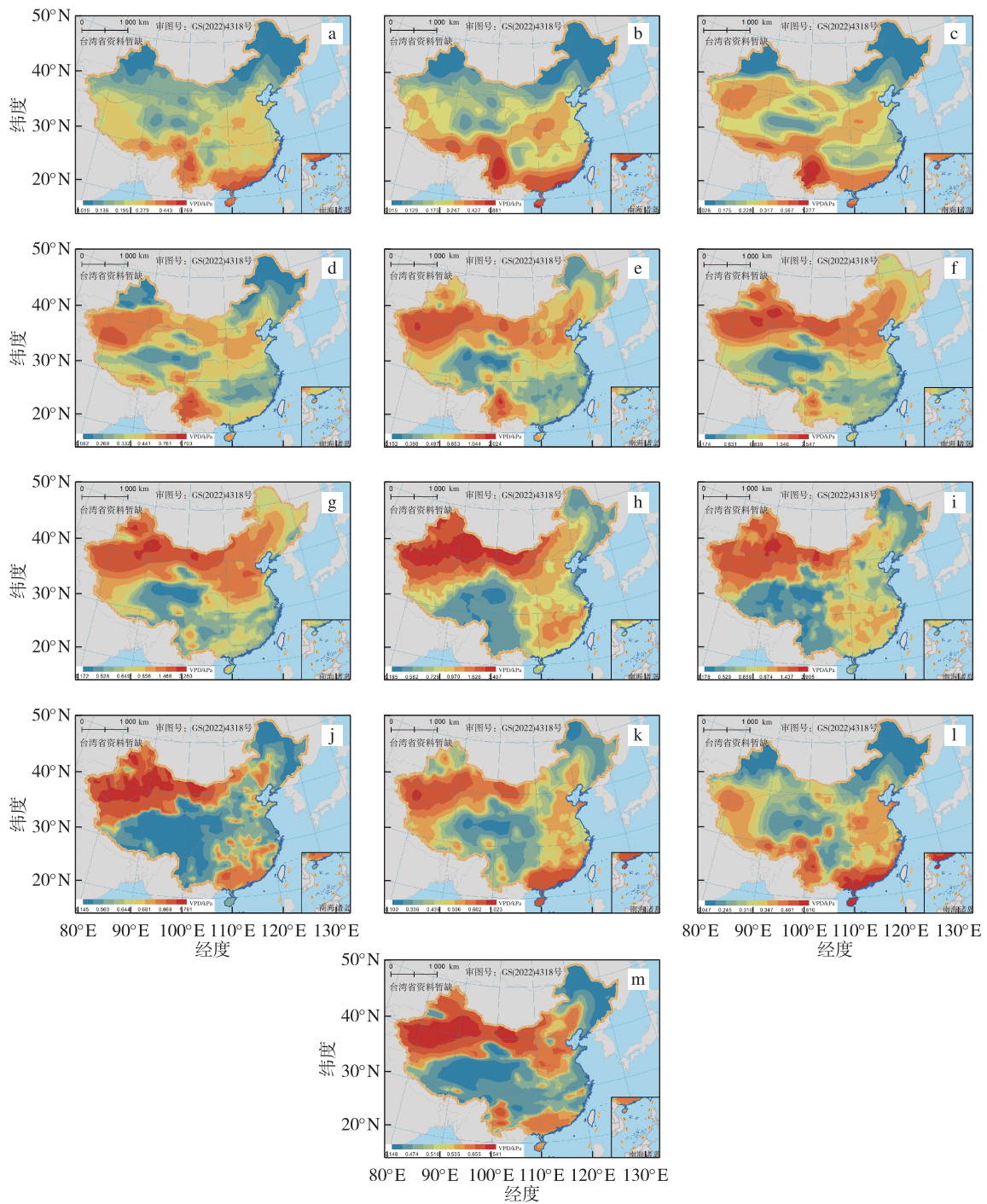


图3 1961—2015年全国月尺度(a—l)及年尺度(m)VPD空间分布(单位:kPa):(a)12月;(b)1月;(c)2月;(d)3月;(e)4月;(f)5月;(g)6月;(h)7月;(i)8月;(j)9月;(k)10月;(l)11月;(m)年均

Fig.3 Spatial distribution of (a—l) monthly and (m) annual average VPD from 1961 to 2015 (units:kPa):(a) December;(b) January;(c) February;(d) March;(e) April;(f) May;(g) June;(h) July;(i) August;(j) September;(k) October;(l) November;(m) annual average

变化范围在 0.227~0.580 kPa,这是由于该地区受高海拔影响,气温及湿度的年内变化均不明显,导致 VPD 的年内变化也相对较小。李素雲等(2023)将青海地区的 VPD 与经度、纬度、海拔等地理因子分别进行多元回归,以量化各地理因子对 VPD 变化的

贡献率;结果表明,各地理因子的贡献率属海拔高度最高。总而言之,4个地区 VPD 的年内变化都呈现出夏季高、冬季低的规律,但各地区 VPD 年内变化幅度不同,按变化大小排序为“西北地区>北方地区>南方地区>青藏地区”。

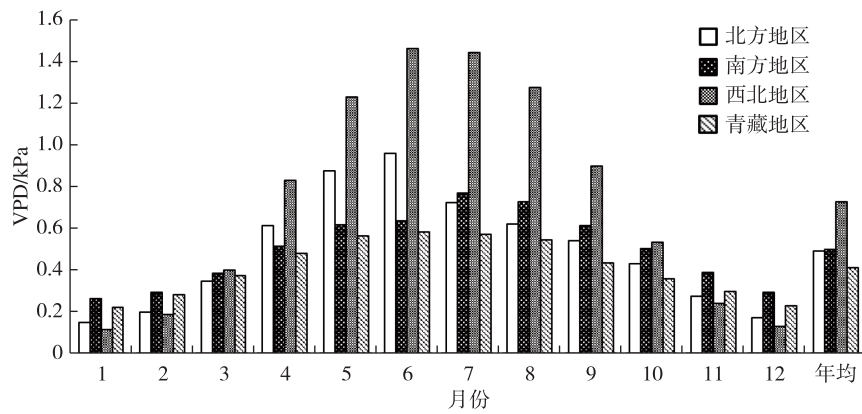


图4 四大地理分区 VPD 月尺度及年尺度统计图(单位:kPa)

Fig.4 Monthly and annual average VPD in four geographical regions(units:kPa)

2.2 VPD 时空变化趋势

2.2.1 VPD 空间变化趋势

根据 Mann-Kendall 趋势检验结果得到全国 VPD 变化趋势,如图 5 所示。表 1 给出了 Mann-Kendall 趋势检验的具体分析结果。通过图表数据可知,全国 VPD 整体上呈现显著升高趋势。具体来说,在 1961—2015 年,全国 772 个气象站点中有 690 个站点的 VPD 呈现升高趋势, β 值范围在 0.013 7~8.268 0 hPa/(10 a)。进一步分析发现,这些站点中有 494 个站点通过了置信度为 95% 的显著性检验,占 VPD 升高站点总数的 71%。VPD 上升幅度较大的站点主要位于云南、青海、宁夏北部以及东南沿海省份;重庆、辽宁、湖南东部的 VPD 上升幅度较小;此外,有少部分区域,如陕西南部 and 河南东部,VPD 呈现下降趋势。

2.2.2 VPD 年际变化趋势

图 6 给出了四大地理分区 VPD 的年际变化趋势。根据 U_F 计算结果可以看出,1961—2015 年四个区域的 VPD 均呈现显著升高趋势。为了识别其变化趋势的突变点,图 6 同时给出了 VPD 逆序列的 U_B 计算结果,结果显示四个地理分区 VPD 的 U_F 与 U_B 曲线均在 2000 年前后出现交点,2000 年之前 VPD 变化相对平稳,此后升高趋势明显加快。具体来说,北方地区与青藏地区在 1998 年发生突变,而西北地区与南方地区突变时间点出现在 2000 年。值得注意的是,青藏地区与其他 3 个地区不同,虽然其 2000 年之后 VPD 的升高速率明显偏大,但其突变检验结果并未通过 5% 信度的显著性检验。

由于各地理分区突变产生的时间点都在 2000 年左右,所以本文将 2000 年作为间隔年份,分别对 1961—1999 年和 2000—2015 年两个时间段的 VPD

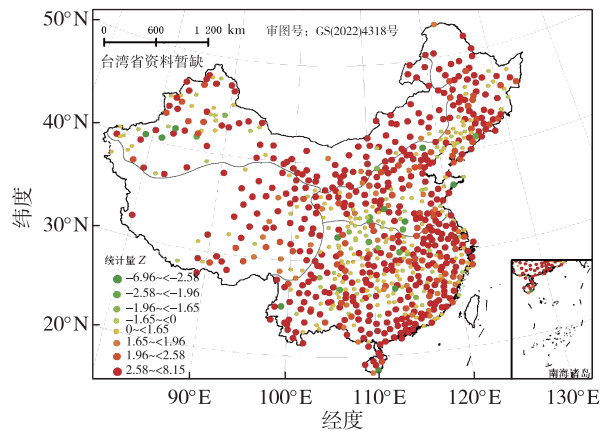


图5 1961—2015年全国 VPD 变化趋势(当 Z 的绝对值大于 1.65、1.96、2.58 时,分别表示通过了置信度为 90%、95%、99% 的显著性检验)

Fig.5 The trend of VPD in the study area from 1961 to 2015(When the absolute value of Z is greater than 1.65, 1.96, and 2.58, it indicates passing significance test at the 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively)

变化趋势进行分析,结果如图 7 所示。整体来看,1961—1999 年 VPD 在全国呈现升高趋势的站点有 440 个,占站点总数的 57%,平均变化趋势在 0.012 6~8.251 7 hPa/(10 a);2000—2015 年 VPD 呈升高趋势的站点有 513 个,占比为 67%,平均变化趋势在 2.185 8~34.134 1 hPa/(10 a);以 2000 年为突变点,平均升高趋势由 1.519 6 hPa/(10 a) 增长到 7.074 3 hPa/(10 a),后一时段约为前一时段平均变化趋势的 4 倍。

具体来说,北方地区在 1961—1999 年,218 个站点中有 144 个站点 VPD 呈升高趋势,平均变化趋势在 0.003 8~5.280 5 hPa/(10 a);在 2000—2015 年,有 93 个站点呈升高趋势,平均变化趋势在 0.193 2~22.022 9 hPa/(10 a)。南方地区在 1961—

表 1 Mann-Kendall 趋势检验分析结果

Table 1 Results of the Mann-Kendall trend test

β	Z	趋势特征	北方地区		南方地区		西北地区		青藏地区		全国总计	
			站点数	百分比/%	站点数	百分比/%	站点数	百分比/%	站点数	百分比/%	站点数	百分比/%
$\beta > 0$	$Z > 2.58$	极显著升高	105	48.17	187	52.82	85	65.38	39	55.71	416	53.89
	$2.58 \geq Z > 1.96$	显著升高	32	14.68	32	9.04	7	5.38	7	10.00	78	10.10
	$1.96 \geq Z > 1.65$	微显著升高	9	4.13	18	5.08	4	3.08	7	10.00	38	4.92
	$Z \leq 1.65$	不显著升高	46	21.10	81	22.88	17	13.08	14	20.00	158	20.47
$\beta < 0$	$ Z \leq 1.65$	不显著降低	18	8.26	23	6.50	12	9.23	3	4.29	56	7.25
	$1.96 \geq Z > 1.65$	微显著降低	3	1.38	3	0.85	1	0.77	0	0	7	0.91
	$2.58 \geq Z > 1.96$	显著降低	3	1.38	5	1.41	1	0.77	0	0	9	1.17
	$ Z > 2.58$	极显著降低	2	0.92	5	1.41	3	2.31	0	0	10	1.30

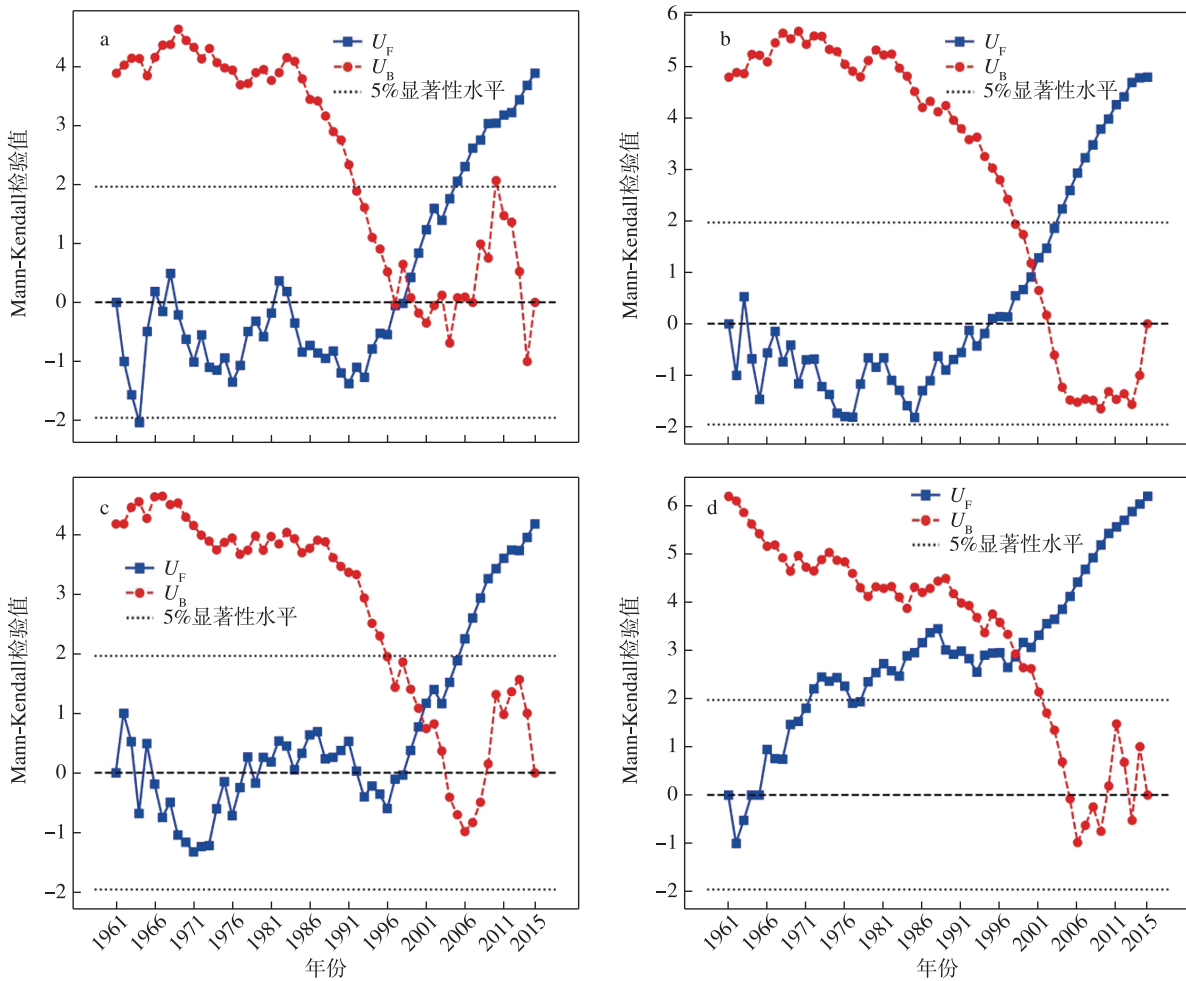


图 6 1961—2015 年四大地理分区的 VPD Mann-Kendall 突变检验结果:(a)北方地区;(b)南方地区;(c)西北地区;(d)青藏地区

Fig.6 Results of the Mann-Kendall mutation test for VPD in four geographical regions from 1961 to 2015:(a) northern China;(b) southern China;(c) Northwest China;(d) Qinghai-Xizang region

1999 年,354 个站点中有 174 个站点呈升高趋势,其中 71 个站点表现为显著升高的趋势,显著升高站点平均变化趋势在 1.231 4~7.654 3 hPa/(10 a);2000 年以后有 261 个站点表现为升高趋势,55 个站点表现为显著升高的趋势,显著升高站点平均变化趋势为 6.869 8~34.134 1 hPa/(10 a)。西北地区

VPD 呈升高趋势的站点的平均变化趋势由 1961—1999 年的 0.104 8~8.251 7 hPa/(10 a) 增长到 2000—2015 年的 0.145 0~24.981 0 hPa/(10 a)。青藏地区在 1961—1999 年,70 个站点中有 46 个站点 VPD 呈升高趋势(0.051 3~6.032 8 hPa/(10 a));到 2000—2015 年,有 62 个站点 VPD 呈升高趋势

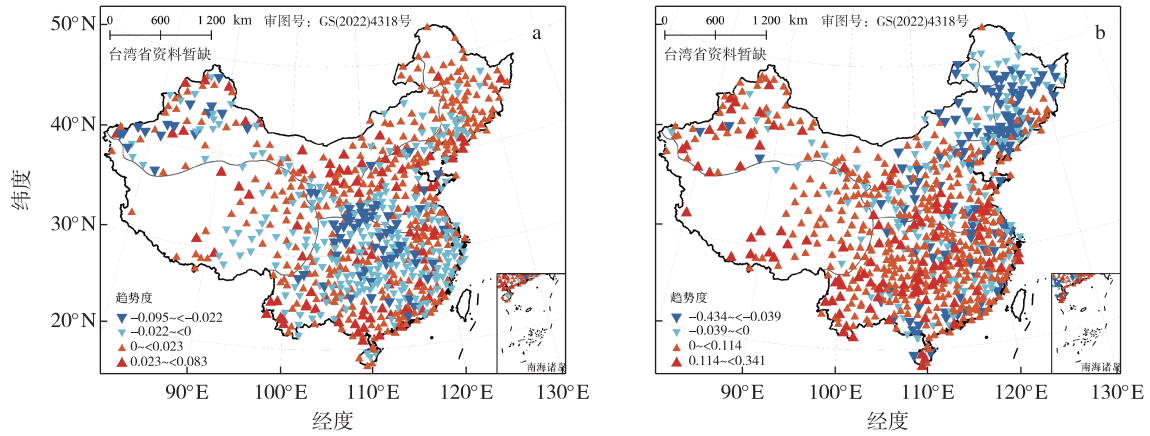


图7 VPD平均年变化趋势空间分布(单位: $\text{hPa} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$):(a)1961—1999年平均变化趋势;(b)2000—2015年平均变化趋势
Fig.7 Spatial distribution of the VPD annual average variation trend (units: $\text{hPa} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$):(a) annual average trend from 1961 to 1999;(b) annual average trend from 2000 to 2015

(0.285 1~31.878 0 $\text{hPa}/(10 \text{ a})$)。

2.3 VPD与其他气象要素的关系

根据公式,饱和水汽压与实际水汽压的差值决定了VPD的变化,饱和水汽压由气温决定,实际水

汽压受相对湿度影响。本文采用相关分析与偏相关分析方法解析气温和相对湿度对VPD变化的潜在影响,结果如图8所示。

从相关分析结果看,四大地理分区无论是年尺

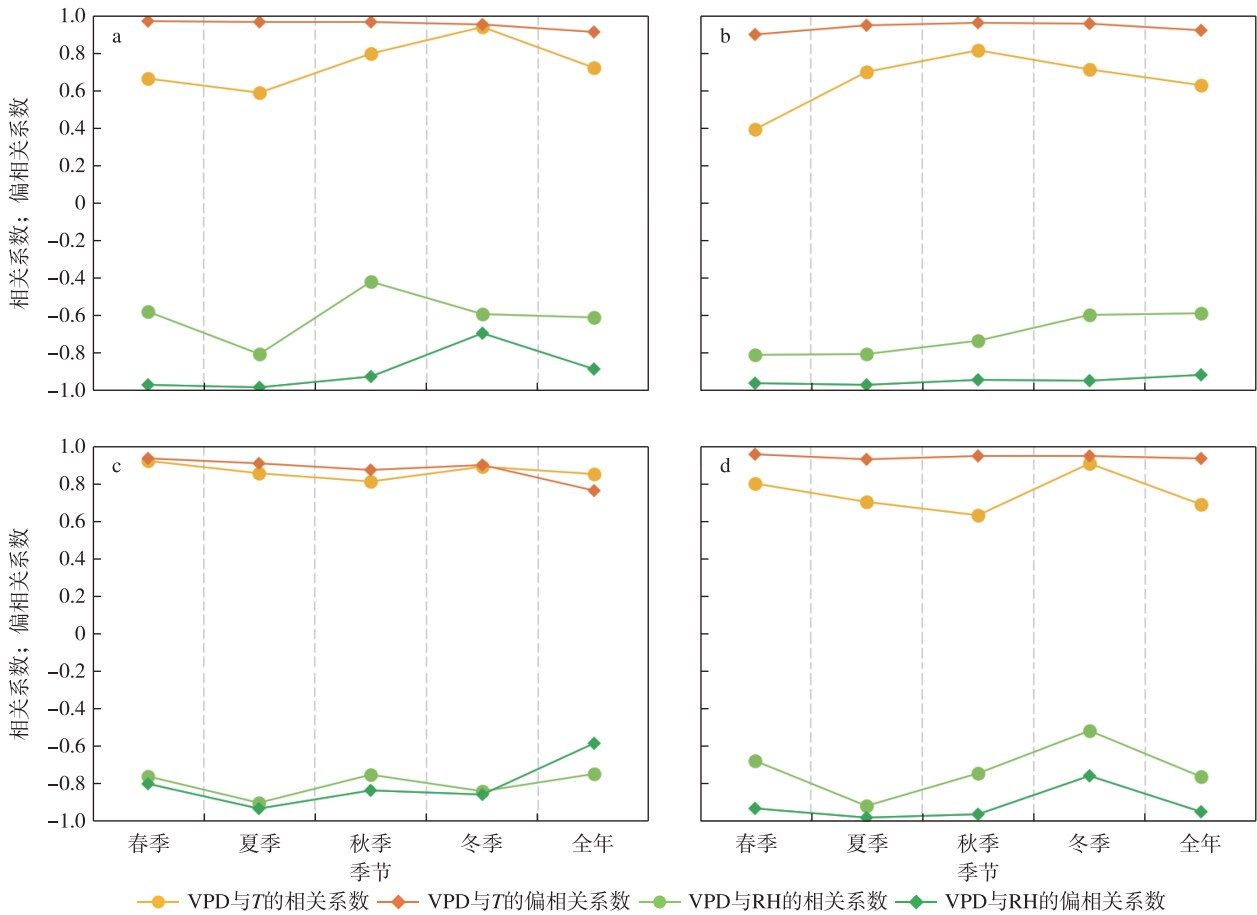


图8 全国四大地理分区 VPD 与气温(T)和相对湿度(RH)的相关系数及偏相关系数:(a)北方地区;(b)南方地区;(c)西北地区;(d)青藏地区

Fig.8 Correlation and partial correlation coefficients between VPD and air temperature (T) or relative humidity (RH) in four geographical regions:(a) northern China;(b) southern China;(c) Northwest China;(d) Qinghai-Xizang region

度还是季尺度,VPD与气温、相对湿度之间都具有明显的相关性。在所有地区,VPD与气温都呈显著正相关关系(北方地区 $r_{VT}=0.72$ 、南方地区 $r_{VT}=0.63$ 、西北地区 $r_{VT}=0.85$ 、青藏地区 $r_{VT}=0.68$),与相对湿度都呈显著负相关关系(北方地区 $r_{VR}=0.61$ 、南方地区 $r_{VR}=0.59$ 、西北地区 $r_{VR}=0.75$ 、青藏地区 $r_{VR}=0.76$)。偏相关分析结果表明,四大地理分区在所有时间尺度(季节和年)上,若不考虑相对湿度的影响,气温对VPD始终呈显著偏正相关($P<0.01$);若不考虑气温的影响,相对湿度对VPD始终呈显著偏负相关($P<0.01$)。具体来说,北方地区的年($r_{VT,R}=0.721$)、春($r_{VT,R}=0.663$)、秋($r_{VT,R}=0.797$)、冬($r_{VT,R}=0.938$),南方地区的年($r_{VT,R}=0.629$)、秋($r_{VT,R}=0.815$)、冬($r_{VT,R}=0.712$),西北地区的年($r_{VT,R}=0.847$)、春($r_{VT,R}=0.916$)、秋($r_{VT,R}=0.809$)、冬($r_{VT,R}=0.887$)和青藏地区的春($r_{VT,R}=0.795$)、冬($r_{VT,R}=0.901$),气温对VPD变化的贡献相对更显著;其他时段相对湿度对VPD的贡献相对更显著。此外,从西北地区VPD对气温和相对湿度的相关分析结果来看,去除其他因素的影响后,VPD与单一因素的相关系数在季节上没有显著差别。这说明气温和相对湿度在西北地区对

表2 VPD与气象因子间的相关系数与相对贡献对比

Table 2 Correlation coefficients between VPD and different meteorological factors as well the comparison of their relative contributions in the linear regression model

地区	年份	相关系数				相对贡献
		T_{ave}	T_{max}	T_{min}	RH	
北方地区	1961—1998年	0.726	0.761	0.672	-0.589	$T_{max}>RH$
	1999—2015年	0.700	0.733	0.647	-0.659	$T_{max}>RH$
南方地区	1961—2000年	0.606	0.659	0.520	-0.598	$T_{max}>RH$
	2001—2015年	0.657	0.687	0.582	-0.616	$T_{max}>RH$
西北地区	1961—2000年	0.842	0.825	0.813	-0.745	$T_{ave}>RH$
	2001—2015年	0.853	0.825	0.831	-0.757	$T_{ave}>RH$
青藏地区	1961—1998年	0.665	0.657	0.561	-0.758	$RH>T_{ave}$
	1999—2015年	0.712	0.686	0.631	-0.751	$RH>T_{ave}$

3 结论

本研究基于1961—2015年长时间序列气象观测数据计算了全国饱和水汽压差,采用协同克里金插值、Mann-Kendall趋势检验和偏相关分析等方法,揭示了不同地理分区VPD的时空分布格局与变化特征,并分析了VPD与各气象因子之间的关系,

VPD产生的影响在全年是相对一致的,不受季节性变化的显著影响。

为了进一步分析不同地理分区突变年前后不同气温因子和相对湿度对VPD的相关性变化,本研究分别计算了VPD与多年日平均气温(T_{ave})、日最高气温(T_{max})、日最低气温(T_{min})和相对湿度的相关系数。同时为了探究各气象因子对VPD变化的影响程度,本研究选择各地区与VPD相关系数最高的气温因子以及相对湿度作为主要自变量,并使用多元线性回归法计算贡献率,结果如表2所示。在北方地区、南方地区和西北地区VPD突变年前后,气温均是VPD变化的主导因子,但在不同区域3种气温因子的主导程度不同。具体而言,北方地区和南方地区突变前后VPD与最高气温的相关系数最高;西北地区突变前后VPD与平均气温的相关系数最高;青藏地区突变前后VPD与相对湿度相关系数最高。从贡献率来看,北方地区和南方地区最高气温对VPD的贡献率较相对湿度高,而西北地区平均气温对VPD的贡献率最高,青藏地区相对湿度对VPD的贡献率最高,这与相关系数表征的特征相同。此外,对比分析显示,同一地区的主导影响因子在突变年前后并未发生改变。

最后分时段讨论了影响VPD变化的主导因子。

研究结果表明,1961—2015年中国VPD时空分布差异显著。全国年均VPD数值范围在0.127~1.547 kPa,平均值为0.526 kPa。年均VPD高值主要集中在西北干旱半干旱区,以新疆地区最为明显,而年均VPD低值主要分布在东北地区、青藏地区以及南方部分地区。从年内变化来看,全国范围内,

VPD 呈现出夏季高、冬季低的一般规律。从年际变化趋势来看,在全国范围内,VPD 整体呈现显著升高趋势。在 1961—2015 年,全国 772 个气象站点中有 690 个站点的 VPD 呈现升高趋势,趋势变化范围在 0.013 7~8.268 0 hPa/(10 a)。以 2000 年为突变点,平均升高趋势由 1.519 6 hPa/(10 a) 增长到 7.074 3 hPa/(10 a)。其中 1961—1999 年 VPD 在全国呈现升高趋势的站点有 440 个,占站点总数的 57%,平均变化趋势在 0.012 6~8.251 7 hPa/(10 a); 2000—2015 年 VPD 呈升高趋势的站点有 513 个,占比为 67%,平均变化趋势在 2.185 8~34.134 1 hPa/(10 a)。从相关分析和偏相关分析的结果来看,所有地区的 VPD 与气温呈显著正相关关系,与

相对湿度呈显著负相关关系。在北方地区、南方地区和西北地区 VPD 在突变年前后,气温均是 VPD 变化的主导因子;北方地区和南方地区突变前后 VPD 与最高气温的相关系数最高,而西北地区突变前后 VPD 与平均气温的相关系数最高。在青藏地区,突变前后相对湿度是 VPD 的主导因子。此外,对比分析显示,同一地区的主导影响因子在突变年前后并未发生改变。

综上所述,本文分析了 VPD 在不同季节、不同地区的变化特征及其主导因素,可以为气候生态和植被模型等研究提供科学基础,为相关部门和决策者提供参考,对我国在不同地区实现可持续性发展具有重要意义。

参考文献 (References)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage.
- Anderson D B, 1936. Relative humidity or vapor pressure deficit [J]. *Ecology*, 17(2): 277-282. doi: 10.2307/1931468.
- Bisht G, Bras R L, 2010. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions; southern great plains case study [J]. *Remote Sens Environ*, 114(7): 1522-1534. doi: 10.1016/j.rse.2010.02.007.
- Chiodi A M, Potter B E, Larkin N K, 2021. Multi-decadal change in western US nighttime vapor pressure deficit [J]. *Geophys Res Lett*, 48(15): e92830. doi: 10.1029/2021gl092830.
- 陈镜明,柳竟先,罗翔中,2020.基于碳水通量耦合原理改进 Penman-Monteith 蒸散发模型 [J]. *大气科学学报*, 43(1): 59-75. Chen J M, Liu J X, Luo X Z, 2020. Improving the Penman-Monteith evapotranspiration model based on the coupling principle of carbon and water fluxes [J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 59-75. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191112007. (in Chinese).
- 陈钦弟,1997.饱和水汽压经验公式修正、导出与应用 [J]. *气象水文海洋仪器*, 14(4): 12-22. Chen Q D, 1997. The correction, leading-out and application of saturated water vapour pressure empirical equation [J]. *Meteor Hydrol Mar Instrum*, 14(4): 12-22. doi: 10.19441/j.cnki.issn1006-009x.1997.04.003. (in Chinese).
- 陈祥明,赵振维,2013.对流层折射修正中水汽压公式对比研究 [J]. *飞行器测控学报*, 32(6): 479-483. Chen X M, Zhao Z W, 2013. Comparison of water vapor pressure formulas used in tropospheric refraction correction [J]. *J Spacecr TT & C Technol*, 32(6): 479-483. doi: 10.7642/j.issn.1674-5620.2013-06-0479-05. (in Chinese).
- 程梦琦,左志燕,蔺郇兴,等,2023.全球陆地饱和水汽压差的年代际突变 [J]. *中国科学:地球科学*, 53(7): 1536-1549. Cheng M Q, Zuo Z Y, Lin Z X, et al., 2023. The decadal abrupt change in the global land vapor pressure deficit [J]. *Sci Sin: Terrae*, 53(7): 1536-1549. (in Chinese).
- 丁卉,余志,徐伟嘉,等,2016.3种区域空气质量空间插值方法对比研究 [J]. *安全与环境学报*, 16(3): 309-315. Ding H, Yu Z, Xu W J, et al., 2016. Comparative study of the three spatial interpolation methods for the regional air quality evaluation [J]. *J Saf Environ*, 16(3): 309-315. doi: 10.13637/j.issn.1009-6094.2016.03.061. (in Chinese).
- Ficklin D L, Novick K A, 2017. Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 122(4): 2061-2079. doi: 10.1002/2016jd025855.
- 符淙斌,王强,1992.气候突变的定义和检测方法 [J]. *大气科学*, 16(4): 482-493. Fu C B, Wang Q, 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Chin J Atmos Sci*, 16(4): 482-493. (in Chinese).
- 高文武,姜燕,赵晋陵,2018.基于协同克里金插值法的土壤锰元素含量预测 [J]. *地理与地理信息科学*, 34(3): 119-124. Gao W W, Jiang Y, Zhao J L, 2018. Predicting and mapping the Mn content in soil based on coKriging [J]. *Geogr Geo Inf Sci*, 34(3): 119-124. (in Chinese).
- Ghimire C P, Ilja van Meerveld H J, Zwartendijk B W, et al., 2022. Vapour pressure deficit and solar radiation are the major drivers of transpiration in montane tropical secondary forests in eastern Madagascar [J]. *Agric For Meteorol*, 326: 109159. doi: 10.1016/j.agrformet.2022.109159.
- 韩永贵,韩磊,黄晓宇,等,2021.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*, 38(2): 303-313. Han Y G, Han

- L, Huang X Y, et al., 2021. Prediction of vapor pressure deficit in Northwest China based on exponential and ARIMA models[J]. *Arid Zone Res*, 38(2): 303-313. doi: 10.13866/j.azr.2021.02.02. (in Chinese).
- 韩宇平, 张丽璇, 王春颖, 等, 2018. 寒区湿地实际蒸散发动态特征及影响因素研究[J]. *南水北调与水利科技*, 16(1): 28-34. Han Y P, Zhang L X, Wang C Y, et al., 2018. Dynamic characteristics and influencing factors of actual evapotranspiration in cold wetland[J]. *South N Water Transf Water Sci Technol*, 16(1): 28-34. doi: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.20180005. (in Chinese).
- He B, Chen C, Lin S R, et al., 2021. Worldwide impacts of atmospheric vapor pressure deficit on the interannual variability of terrestrial carbon sinks[J]. *Natl Sci Rev*, 9(4): nwab150. doi: 10.1093/nsr/nwab150.
- 胡晓萌, 张鑫, 雒舒琪, 等, 2022. 甘肃省不同气候区 1961—2020 年蒸散发时空变化及其影响因子[J]. *节水灌溉* (11): 73-78. Hu X M, Zhang X, Luo S Q, et al., 2022. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in different climatic regions of Gansu Province from 1961 to 2020[J]. *Water Sav Irrig* (11): 73-78. doi: 10.12396/jsgg.2022104. (in Chinese).
- Jarvis P G, 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. *Phil Trans R Soc Lond B*, 273(927): 593-610. doi: 10.1098/rstb.1976.0035.
- 金佳鑫, 蔡裕龙, 郭熙, 等, 2023. 中国亚热带植被蒸腾驱动力解耦分析[J]. *地理学报*, 78(7): 1779-1791. Jin J X, Cai Y L, Guo X, et al., 2023. Decoupled driving forces of variabilities of transpiration in Chinese subtropical vegetation based on remote sensing data[J]. *Acta Geogr Sinica*, 78(7): 1779-1791. doi: 10.11821/dlxb202307016. (in Chinese).
- 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等, 2009. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. *资源科学*, 31(3): 501-508. Kang S Y, Zhang B, Liu J F, et al., 2009. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye City using Mann-Kendall method[J]. *Resour Sci*, 31(3): 501-508. doi: 10.3969/j.issn.1671-7341.2014.17.054. (in Chinese).
- Kendall M G, 1975. Rank correlation methods[M]. London: Hodder Education.
- Li M Y, Yao J Q, Guan J Y, et al., 2021. Observed changes in vapor pressure deficit suggest a systematic drying of the atmosphere in Xinjiang of China[J]. *Atmos Res*, 248: 105199. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105199.
- 李素云, 祁栋林, 温婷婷, 等, 2023. 1961—2020 年青海省饱和水汽压差变化特征及影响因子分析[J]. *干旱区研究*, 40(2): 173-181. Li S Y, Qi D L, Wen T T, et al., 2023. The variation characteristics and influencing factors of vapor pressure deficit in Qinghai Province from 1961 to 2020[J]. *Arid Zone Research*, 40(2): 173-181. (in Chinese).
- 刘时栋, 徐丽萍, 张婕, 2019. 新疆土地生态安全时空变化[J]. *生态学报*, 39(11): 3871-3884. Liu S D, Xu L P, Zhang J, 2019. Spatiotemporal change of land ecological security in Xinjiang[J]. *Acta Ecol Sinica*, 39(11): 3871-3884. doi: 10.5846/stxb201806211361. (in Chinese).
- Mann H B, 1945. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 13(3): 245-259. doi: 10.2307/1907187.
- 宁梓好, 徐宪立, 杨东, 等, 2022. 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*, 43(1): 172-179. Ning Z Y, Xu X L, Yang D, et al., 2022. Temporal variation of vapor pressure deficit and its influencing factors in Southwest China[J]. *Res Agric Mod*, 43(1): 172-179. doi: 10.13872/j.1000-0275.2022.0001. (in Chinese).
- 庞冉, 王文, 武晶, 等, 2023. 基于空间插值逐日降水格点数据的福建省降水时空变化分析[J]. *水土保持学报*, 37(1): 176-187, 203. Pang R, Wang W, Wu J, et al., 2023. Spatial-temporal variation of precipitation in Fujian Province based on spatial interpolated gridded daily precipitation data[J]. *J Soil Water Conserv*, 37(1): 176-187, 203. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.024. (in Chinese).
- 钱永兰, 吕厚荃, 张艳红, 2010. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. *气象与环境学报*, 26(2): 7-15. Qian Y L, Lü H Q, Zhang Y H, 2010. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on ANUSPLIN software[J]. *J Meteor Environ*, 26(2): 7-15. doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2010.02.002. (in Chinese).
- Seager R, Hooks A, Williams A P, et al., 2015. Climatology, variability, and trends in the U.S. vapor pressure deficit, an important fire-related meteorological quantity[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(6): 1121-1141. doi: 10.1175/jamc-d-14-0321.1.
- 孙康慧, 曾晓东, 李芳, 2019. 1980—2014 年中国生态脆弱区气候变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 24(4): 455-468. Sun K H, Zeng X D, Li F, 2019. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980—2014[J]. *Clim Environ Res*, 24(4): 455-468. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058. (in Chinese).
- 谭剑波, 李爱农, 雷光斌, 2016. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J]. *高原气象*, 35(4): 875-886. Tan J B, Li A N, Lei G B, 2016. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 35(4): 875-886. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00037. (in Chinese).
- 王爱慧, 缪月, 陈玥, 2020. 1961—2016 年中国西北地区陆地水分收支的年代际变化特征[J]. *大气科学学报*, 43(6): 953-966. Wang A H, Miao Y, Chen Y, 2020. Interdecadal variation of land water budget in Northwest China from 1961 to 2016[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(6): 953-966. doi:

- 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201112001.(in Chinese).
- 王毅,张晓美,周宁芳,等,2021.1990—2019年全球气象水文灾害演变特征[J].大气科学学报,44(4):496-506. Wang Y,Zhang X M,Zhou N F,et al.,2021.Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019[J].Trans Atmos Sci,44(4):496-506.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210107001.(in Chinese).
- 夏天,吴文嘉,吴文斌,等,2020.地理科学中数据空间重构最新研究进展[J].经济地理,40(11):47-55,94. Xia T,Wu W J,Wu W B,et al.,2020.Research progress of geographic data by space reconstruction[J].Econ Geogr,40(11):47-55,94.doi:10.15957/j.cnki.jjdl.2020.11.006.(in Chinese).
- 徐炳生,王伟,徐颖,等,2022.基于协同克里金的大坝心墙渗流空间模型研究[J].水电能源科学,40(7):98-101. Xu B S,Wang W,Xu Y,et al.,2022.Research on spatial model for core-wall seepage of dams based on cooperative Kriging[J].Water Resour Power,40(7):98-101.doi:10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20211725.(in Chinese).
- 杨靖,戴君虎,姚华荣,等,2022.1992—2020年横断山区植被分布与植被活动变化[J].地理学报,77(11):2787-2802. Yang J,Dai J H,Yao H R,et al.,2022.Vegetation distribution and vegetation activity changes in the Hengduan Mountains from 1992 to 2020[J].Acta Geogr Sinica,77(11):2787-2802.doi:10.11821/dlxb202211007.(in Chinese).
- 袁瑞瑞,黄萧霖,郝璐,2021.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,26(4):413-424. Yuan R R,Huang X L,Hao L,2021.Spatio-temporal variation of vapor pressure deficit and impact factors in China in the past 40 years[J].Clim Environ Res,26(4):413-424.doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20086.(in Chinese).
- Yuan W P,Zheng Y,Piao S L,et al.,2019.Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J].Sci Adv,5(8):eaax1396.doi:10.1126/sciadv.aax1396.
- 章诞武,丛振涛,倪广恒,2013.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,24(4):490-496. Zhang D W,Cong Z T,Ni G H,2013.Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J].Adv Water Sci,24(4):490-496.doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2013.04.019.(in Chinese).
- 张红梅,吴炳方,闫娜娜,2014.饱和水汽压差的卫星遥感研究综述[J].地球科学进展,29(5):559-568. Zhang H M,Wu B F,Yan N N,2014.Remote sensing estimates of vapor pressure deficit:an overview[J].Adv Earth Sci,29(5):559-568.doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.05.0559.(in Chinese).
- 张元杰,翟召坤,张晓倩,2022.基于自然地理分区的中国公路网时空变化分析[J].地理信息世界,29(1):120-124. Zhang Y J,Zhai Z K,Zhang X Q,2022.Temporal and spatial change analysis of China's road network based on natural geographical zoning[J].Geomat World,29(1):120-124.doi:10.3969/j.issn.1672-1586.2022.01.022.(in Chinese).
- 智协飞,吴柏莹,罗忠红,等,2023.华东地区地面和高空风场的多模式集成精细化预报研究[J].大气科学学报,46(6):917-927. Zhi X F,Wu B Y,Luo Z H,et al.,2023.Multimodel ensemble forecasts of high-resolution surface and high-level wind forecasts over East China[J].Trans Atmos Sci,46(6):917-927.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210318001.(in Chinese).
- 朱飙,张强,李春华,等,2023.我国干旱半干旱区气候变化特征及其对干湿波动的影响[J].大气科学学报,46(1):42-54. Zhu B,Zhang Q,Li C H,et al.,2023.Characteristics of climate change in arid and semi-arid areas of China and its influence on climatic dry-wet fluctuation[J].Trans Atmos Sci,46(1):42-54.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221101012.(in Chinese).

· ARTICLE ·

Spatio-temporal variations of vapor pressure deficit in China from 1961 to 2015

LUAN Luming^{1,2}, WANG Yuanxin³, ZHU Wenbin^{1,4}

¹*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing (UCASNJ), Nanjing 211135, China;*

³*School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

⁴*School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China*

Abstract Vapor pressure deficit (VPD) is a critical meteorological variable with significant implications for hydrology, ecology, and climate change. Numerous studies have demonstrated that VPD, a key indicator of atmospheric dryness, has undergone substantial changes in response to global climate warming. Investigating the spatio-temporal variations of VPD across different regions of China is essential for advancing climate change research and supporting agricultural and pastoral practices. While regional-scale VPD studies have been conducted by domestic scholars, comparative analysis of VPD changes at the national scale remain limited. This study uses daily mean air temperature and relative humidity data from 772 meteorological stations across China, applying Tetens' empirical formula to calculate VPD. Through co-Kriging interpolation, Mann-Kendall trend tests, and correlation and partial correlation analyses, the spatiotemporal variability and trends of VPD across different time scales and geographical regions from 1961 to 2015 were examined. Additionally, the study explores the relationships between VPD, temperature, and relative humidity, identifying the dominant factors influencing VPD changes over different periods. The results indicate significant spatiotemporal variation in VPD across China from 1961 to 2015, with higher values in summer and lower values in winter. Spatially, high annual average VPD values were concentrated in the arid and semi-arid regions of Northwest China, while lower values were found in Northeast China, the Qinghai-Xizang Plateau, and parts of the southern region. The annual average VPD across China ranged from 0.127 kPa to 1.547 kPa, with an overall average of 0.526 kPa. Most regions showed an increasing VPD trend over time. Between 1961 and 1999, 57% stations exhibited increasing VPD trends, and this proportion rose to 67% between 2000 and 2015, with the year 2000 identified as a mutation point. The average VPD increase accelerated from 1.519 6 hPa/(10 a) to 7.074 3 hPa/(10 a) after 2000. Correlation and partial correlation analyses revealed that VPD was significantly positively correlated with temperature and negatively correlated with relative humidity in all regions. Maximum temperature was the dominant factor driving VPD changes in southern and northern China, while average temperature and relative humidity played a greater role in the Northwest and Qinghai-Xizang regions. These dominant factors remained consistent before and after the mutation point. While the primary factors influencing VPD changes were explored, further investigation is needed to assess the impact of other potential factors such as topography, vegetation cover, and broader climatic conditions. This study provides insights into the characteristics and drivers of VPD changes across seasons and regions, offering a scientific foundation for climate-ecological and vegetation modeling studies and valuable guidance for policy-makers and relevant stakeholders.

Keywords vapor pressure deficit; spatio-temporal variations; Mann-Kendall test; partial correlation analysis

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230811001

(责任编辑:刘菲)