氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

近40年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析

袁瑞瑞 黄萧霖 郝璐

Spatio–Temporal Variation of Vapor Pressure Deficit and Impact Factors in China in the Past 40 Years

YUAN Ruirui HUANG Xiaolin HAO Lu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2021.20086

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

1961～2018年长白山区不同等级降水时空变化特征

SpatialTemporal Variation Characteristics of Different Grades of Precipitation in Changbai Mountain from 1961 to 2018

气候与环境研究. 2021, 26(2): 227 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2020.20093

1961～2013年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013

气候与环境研究. 2020, 25(5): 483 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2019.19130

区域气候模式CWRF对我国极端温度时空变化的模拟评估

Evaluation of the SpatioTemporal Variations of Extreme Temperature Simulations in China Based on the Regional ClimateWeather Research and Forecasting Model

气候与环境研究. 2021, 26(3): 333 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2021.20116

中国半干旱区草甸草原和典型草原碳通量日变化特征

Diurnal Variations of the Carbon Fluxes of Semiarid Meadow Steppe and Typical Steppe in China

气候与环境研究. 2020, 25(2): 172 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2019.19096

1960~2011年中国日降水集中程度的时空变化特征

Spatial and Temporal Variability of Daily Precipitation Concentration in China during 1960–2011

气候与环境研究. 2017, 22(3): 301 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2016.15248

1991~2010年中国小时暴雨时空变化格局及其与城镇化因子的空间相关分析

Spatiotemporal Pattern of Hourly Heavy Rainfall in China and Its Spatial Correlation with Urbanization Factors during 1991–2010

气候与环境研究. 2017, 22(3): 355 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9585.2017.16139

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 Ruirui, HUANG Xiaolin, HAO Lu. 2021. Spatio–Temporal Variation of Vapor Pressure Deficit and Impact Factors in China in the Past 40 Years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (4): 413−424. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20086

近 40 年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析

袁瑞瑞　黄萧霖　郝璐

南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室，南京 210044

摘　要　基于全国 600 多个站点的逐月气象观测资料，利用 Mann–Kendall 检验、多元线性回归等方法分析了中国地区 1980～2018 年不同气候区（干旱区、湿润区、半干旱区与半湿润区）饱和水汽压差（Vapor Pressure Deficit，VPD）的时空变化特征，检测了影响中国地区饱和水汽压差变化的主导气象因素。结果发现：近 40 年来，我国湿润区和干旱区的夏季和冬季 VPD 分布呈相反格局，大部分地区 4 个季节 VPD 均呈上升趋势，春、夏两季在黄河流域以及东南沿海地区的上升趋势尤为显著。4 个气候区的 VPD 均在 21 世纪初发生突变上升，其中湿润区突变年份偏早（1996 年），干旱区突变年份较晚（2004 年），且干旱区的上升幅度最大，约为 0.04 kPa/10 a。影响饱和水汽压差增加的主导因子在不同气候区、不同季节有所差异，但总体而言，气温和绝对湿度的变化是影响我国 VPD 年际变化的主要因素。其中，2000 年以后，影响半湿润区、半干旱区 VPD 变化的主导因子为气温，干旱区、湿润区为绝对湿度。

关键词　饱和水汽压差　时空变化　主导因子　不同气候区

文章编号　1006-9585(2021)04-0413-12　　**中图分类号**　P426　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20086

Spatio–Temporal Variation of Vapor Pressure Deficit and Impact Factors in China in the Past 40 Years

YUAN Ruirui, HUANG Xiaolin, and HAO Lu

Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract　Vapor pressure deficit (VPD) is critical to the carbon–water cycle of an ecosystem, which is widely used in various hydrological cycles, vegetation carbon cycles, and evapotranspiration-estimation models. However, few studies on VPD have been conducted. Most regions of China are experiencing accelerated urbanization and continuing increased interannual variations in atmospheric parameters, such as temperature and humidity. An in-depth study on the variation and dominant factors of VPD in different seasons and climate regions will provide a scientific basis for the study of climate, ecology, and vegetation models. Such a study will also help improve environmental management in different climate regions to achieve ecologically sustainable development. Based on the monthly meteorological observation data of more than 600 stations in China, combined with the Mann–Kendall test, multiple linear regression, and other methods, this study analyzed the spatio–temporal variation pattern of VPD in the four climate regions (i.e., arid, humid, semiarid, and subhumid) of China from 1980 to 2018 to detect the dominant meteorological factors affecting the variation of VPD. The results showed that for the last 40 years, the distribution of VPD in Chinahadd spatial and seasonal differences. For

收稿日期　2020-07-20；**网络预出版日期**　2021-04-23

作者简介　袁瑞瑞，女，1996 年出生，硕士研究生，主要从事气候变化方面的研究。E-mail: yuanrr_818@163.com

通讯作者　郝璐，E-mail: hl_haolu@163.com

资助项目　国家自然科学基金项目 41877151、41977409、42061144004

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grants 41877151, 41977409, and 42061144004)

all four climate regions, VPD had the characteristics of "summer > spring > autumn > winter." The distribution of VPD in summer and winter is opposite in the humid and arid regions of China. That is, the VPD in spring and summer gradually increased from the humid region to the arid region; whereas, it gradually decreased from the humid region to the arid region in winter. VPD exhibited an upward trend in most areas of China in the four seasons, particularly in the Yellow River Basin and southeast coastal areas in spring and summer. Moreover, the VPD of the four climate regions increased abruptly in the early 21st century. Among them, the humid region had an earlier mutation year (1996), and the arid region had a later mutation year (2004); the increase in the arid region was the highest, at approximately 0.04 kPa/10 a). These phenomena indicate that the atmosphere has become drier, and to determine the cause of this phenomenon, we analyzed the contribution rate of meteorological factors to VPD. The results showed that the dominant factors affecting the increase in VPD are different in different climate regions and seasons, but overall, changes in air temperature and absolute humidity are the main factors affecting the interannual change of VPD in China. After 2000, the dominant factors affecting VPD in subhumid and semiarid and other areas are temperature and absolute humidity, respectively.

Keywords Vapor pressure deficit, Spatio–temporal variation, Dominate factors, Climate regions

1 引 言

饱和水汽压差（Vapor Pressure Deficit，VPD）表示的是实际空气距离水汽饱和状态的程度，即空气的干燥程度。已有相关研究表明，VPD 在决定植物生理功能中起着关键作用（Cunningham, 2004; 陈彪等, 2015; 赵卉忱等, 2020）。首先，VPD 对植物叶片的气孔导度有直接影响，VPD 增大能够促进叶片表面的气孔张开，有利于植被更好地吸收水分以进行光合作用和正常生理活动，但 VPD 超过一定阈值时又将导致植物降低气孔开度以阻止过多的水分流失，从而抑制植物的生长（闫敏等, 2016）；其次，VPD 还与植物液流、水分利用效率等有显著的相关关系（李静, 2014; 秦奔奔和景元书, 2017）。研究指出，地球的理想 VPD 范围在 0.45～1.24 kPa，最佳为 0.85 kPa；植物能够较好生长的 VPD 范围是 0.8～0.95 kPa（李静, 2014），而实际中的环境因子经常无法满足植物进行最佳生长的条件。因此，植物对环境中 VPD 的响应受到越来越多研究者的关注。

另一方面，作为大气从陆地表面提取水分的能力的准确度量，VPD 可反映大气对水分的"需求"（atmospheric demand）（刘玉莉等, 2014），是植被蒸散的主要驱动因素之一（于贵瑞和王秋凤, 2010）。通过改变植物气孔行为，VPD 极大地限制了许多生物群落的陆地蒸散（贾志军等, 2007; Fletcher et al., 2007）。Novick et al.（2016）指出 VPD 与大气水分需求直接相关且影响地表水分传导和蒸散；郭媛（2012）探讨了 1960～2010 年来影响中国长江流域实际蒸发量的气象因素，结果表明，就年际变化而言，全流域实际蒸发量与 VPD 变化呈显著负相关关系。此外，VPD 增加会显著影响森林死亡率（Yuan et al., 2019），VPD 极端高的年份极可能会对植被造成相当大的水分胁迫，从而导致疾病、火灾和死亡的风险（Seager et al., 2015）。不仅如此，VPD 还会影响粮食产量，极端高温对美国玉米生产的主要影响与 VPD 增加有关（Lobell et al., 2013）；Zhang et al.（2017）发现，VPD 的增加对不同地区、不同作物的产量影响不同，除中国东南部的小麦外，VPD 的增加会导致作物产量普遍下降。

可见，VPD 对于生态系统的结构和功能具有重要意义，但是其作用却往往被低估（Novick et al., 2016），尤其是在有着陆地"碳汇"之称的半湿润地区。最新研究发现，近 10 年来，全球 VPD 有普遍升高趋势（Mao et al., 2017），这势必对区域生态系统产生一定的影响，但是在区域尺度上，VPD 变化趋势的相关研究还有待开展。在我国城市化进程加快以及我国大部分地区温、湿等大气参数呈现显著变化趋势的大背景下（徐兴奎, 2011; 唐国利等, 2012），深入探讨 VPD 在不同季节、不同气候区的变化特征及其主导因素，不仅可以为气候、生态和植被模型等研究提供科学基础，对于我国不同气候区提高生态管理水平以实现生态可持续性发展也具有重要意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 气象数据

气象数据来自国家气象信息中心（http://data.cma.cn/[2020-01-10]），对全国 601 个基本、基准地面气象观测站及自动站的 1980～2018 年气象资

料月值数据集进行统计分析。数据主要包括平均气温、最高（低）气温、相对湿度、降水量、风速、日照时数等。为了分析 VPD 的季节性变化，将一年分为春季（3～5 月）、夏季（6～8 月）、秋季（9～11 月）、冬季（12 月～次年 2 月）4 个季节，并参考中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn/[2020-01-30]）对干湿地区的划分，将全国分为湿润区、半湿润区、半干旱区以及干旱区 4 个区（图 1）来分析 VPD 的区域性差异。空间分布图采用专用气象数据插值软件 ANUSPLIN 完成，ANUSPLIN 基于薄盘样条函数理论，引入多个影响因子作为协变量，大大提高插值精度，对时间序列的气象要素更加适合（刘志红等, 2008）。考虑到青藏高原地形的特殊性，本文引入高程作为协变量，DEM 数据来自中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn/[2020-01-30]），分辨率 1 km。

2.2　VPD 计算

VPD 是在给定某一空气温度时的饱和水汽压与实际水汽压的差值。饱和水汽压是温度的函数，可直接由温度计算得到，见 Tetens 经验公式（Allen et al., 1998）：

$$e^0(T) = 0.6108\exp\left[\frac{17.27T}{T+237.3}\right], \qquad (1)$$

其中，T是空气温度（单位：°C），$e^0(T)$是温度T时的饱和水汽压（单位：kPa）。

由于上式是非线性函数，对于月尺度这样较长时间间隔的平均饱和水汽压，若用平均气温来代替日最高、最低气温，则会使平均饱和水汽压估计值偏低，相应的水汽压差也变小，因此以该时间间隔内的日平均最高、最低气温分别对应的饱和水汽压的均值计算（Li et al., 2014）：

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}, \qquad (2)$$

其中，e_s 是平均饱和水汽压（单位：kPa），T_{max}、T_{min}分别是日平均最高、最低气温（单位：°C）。实际水汽压 e_a（单位：kPa）则根据月平均相对湿度（φ_{mean}）计算：

$$e_a = e_s\frac{\varphi_{mean}}{100}. \qquad (3)$$

最终得到 VPD（V_{PD}，单位：kPa）：

$$V_{PD} = e_s - e_a. \qquad (4)$$

2.3　Mann–Kendall 趋势检验

本文采用 Mann–Kendall（M–K）非参数检验法检测时间序列的趋势变化（Mann, 1945; Kendall, 1975），统计值 Z>0 表明序列是增加趋势，Z<0 表明序列是减少趋势。Z 的绝对值大于 1.65、1.96、2.58 时，表明通过了置信度分别为 90%、95%、99% 的显著性检验（孙康慧等, 2019）。将 M–K 检验进一步用于检验序列突变时，定义统计变量 UF_k、UB_k，取显著性水平 α=0.05，则临界值 $U_{0.05}$= 1.96。将 UF_k、UB_k 两个统计量序列曲线和±1.96 线绘制在同一张图上，若 UF_k 的值大于 0，则表明序列呈上升趋势，小于 0 则呈下降趋势，超过临界

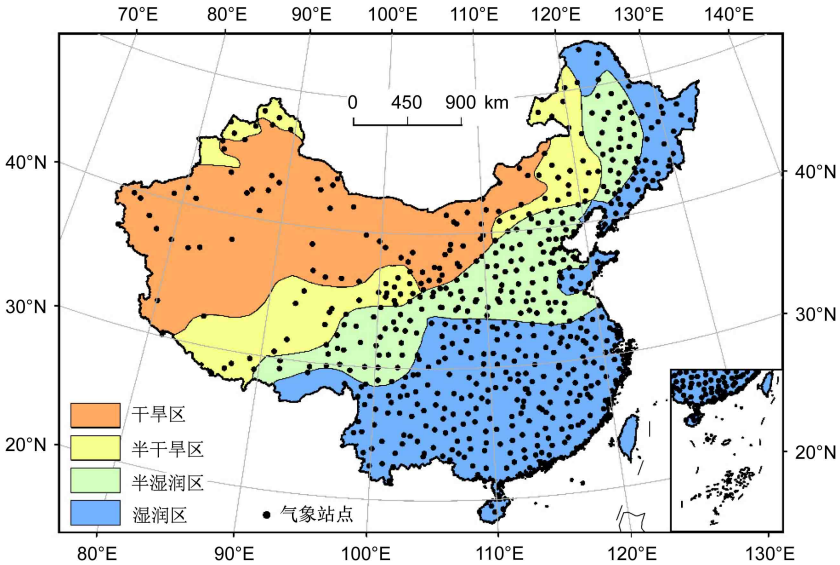

图 1　研究区气候分区以及气象站空间分布

Fig. 1　Climate regions and meteorological stations in the study area

线表明上升或下降趋势明显。如果 UF_k 和 UB_k 两条直线出现交点，且交点在临界线之间，那么交点对应的时刻便是突变开始的时刻（陈婧等, 2019）。

2.4 影响因素分析

采用多元线性回归法分析 VPD 的主要影响因子。运用逐步回归分析保留对 VPD 影响程度较大的自变量，建立多元线性回归方程，并计算相应的贡献率（Li et al., 2014; 朱晓华等, 2019）：

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + \ldots\ldots, \quad (5)$$

$$c_1 = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| + \ldots\ldots}, \quad (6)$$

其中，Y 代表 VPD，X_i 代表各个气象要素，a、b、c……为第 i 个气象要素所对应回归系数，c_1为 X_1 变量对 VPD 的相对贡献率，以此类推。

3 结果与分析

3.1 VPD 的空间分布

3.1.1 不同季节的 VPD 空间分布

图 2 为近 40 年来中国地区 VPD 的年及季节尺度的分布情况。就全国而言，1980～2018 年多年平均 VPD 值的范围在 0～2.1 kPa。西北干旱半干

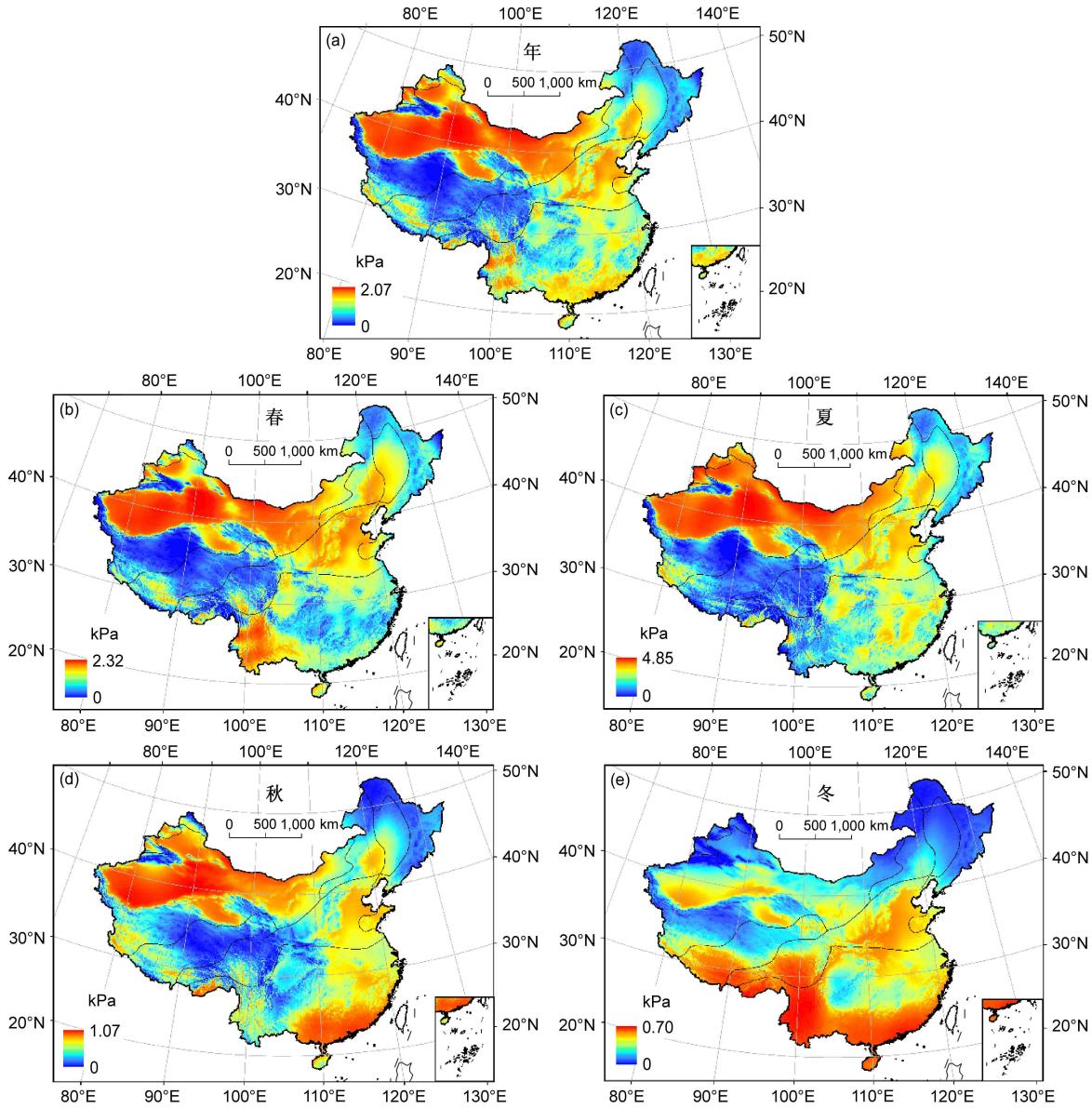

图 2 1980～2018 年中国全年和四季饱和水汽压差（VPD）的空间分布：（a）全年；（b）春季；（c）夏季；（d）秋季；（e）冬季

Fig. 2 Spatial distribution of annual and seasonal VPD (vapor pressure deficit) in China from 1980 to 2018: (a) Annual; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter.

旱区的 VPD 较高，尤其在新疆地区，达到 2.0 kPa 左右，这与西北地区干旱少雨的气候特点相对应，其余地区的 VPD 相对较低。多年平均 VPD 最高值出现在新疆的吐鲁番地区，因该地区四周高山环抱，增热迅速、散热慢，形成气温高、降水少的特点，VPD 值可达到 2.0 kPa。低值主要分布青藏地区、黑龙江地区，台站最低值出现在青海省玉树州的清水河站，VPD 值仅 0.12 kPa。

分季节来看，春、夏、秋 3 个季节的 VPD 空间分布与全年的空间分布情况类似，均表现出西北干旱半干旱区 VPD 高，青藏高原、东北以及南方大部分区域 VPD 低的规律，且在夏季尤为明显。这与我国近几十年来蒸发皿蒸发量的空间分布有相近之处（朱晓华等, 2019），即内蒙古和新疆地区值较大，东北地区和青藏地区较小，表明 VPD 与区域的蒸发潜力在空间上存在对应关系。冬季 VPD 值介于 0～0.7 kPa，且其分布规律与其他 3 个季节有所不同，具体表现为高纬地区偏低，而低纬的云南、南部沿海地区 VPD 较高的分布规律，与我国近几十年来冬季的总蒸发量基本一致，进一步表明了饱和水汽压差对陆地蒸散发的主导作用（朱晓华等, 2019）。

3.1.2　不同气候区 VPD 的差异

根据水分条件，将我国划分为 4 个不同的气候区，对近 40 年来全国的饱和水汽压差进行分区域统计（图 3）。可以看出，全年以及春季、夏季的平均 VPD 在湿润区最低，在干旱区最高，半湿润区和半干旱区的值介于二者之间。其中，夏季平均 VPD 表现为由湿润区到干旱区逐渐增大的分布特点，而冬季相反，表现为平均 VPD 由湿润区到干旱区逐渐减小的特点。4 个气候区平均 VPD 均呈现“夏季>春季>秋季>冬季”的特征。干旱区 VPD 的季节性差异大，夏季与冬季相差约 1.4 kPa，湿润区的季节性差异小，夏季与冬季相差约 0.4 kPa，半湿润区及半干旱区的值介于二者之间。

3.2　VPD 的时间变化

3.2.1　VPD 变化趋势的空间分布

通过绘制中国地区年及不同季节 VPD 变化趋势的空间分布图，可以更直观的了解 VPD 在近 40 年来的变化情况（图 4）。1980～2018 年，VPD 在全国呈现上升趋势的站点为 566 个，占总台站个数的 94%，其中 76% 的站点通过了 0.05 的显著性检验。上升最显著的区域主要是内蒙古的阿拉善盟、新疆东部、四川以及江浙一带，M–K 趋势值

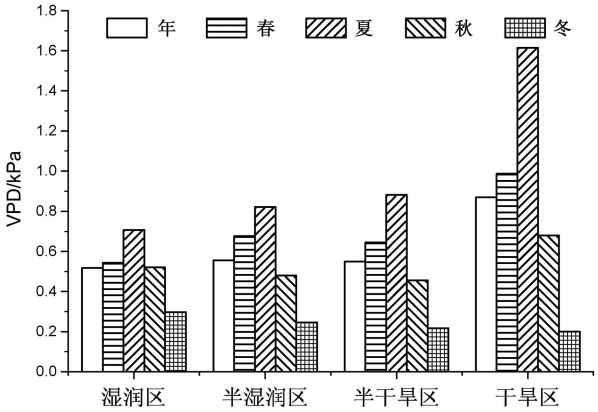

图 3　1980～2018 年中国全年和四季不同区域 VPD 的分布情况

Fig. 3　Distribution of annual and seasonal VPD in different regions of China from 1980 to 2018

（Z 值）达到 5.0 以上，表明这些地区 VPD 的上升趋势极其显著。仅有新疆西北部、贵州等小部分区域 VPD 呈现下降的趋势。

分季节来看，各个季节仍表现出全国大部分地区 VPD 呈上升趋势的规律。春、夏两季在黄河流域以及东南沿海地区的上升趋势尤为显著，通过 α=0.05 显著性检验的站点分别达到 65% 和 56%。秋、冬季出现显著上升趋势的站点集中在云南、四川以及江浙一带，通过 α=0.05 显著性检验的站点分别达到 46% 和 41%。同时秋、冬季出现 VPD 降低趋势的站点数增多，但仅有 2% 和 0.4% 的站点通过 α=0.05 的显著性检验。通过 Sen’s 坡度检验（赵彦军等, 2019），发现春、夏两季平均 VPD 的上升幅度较大，约为 0.04 kPa/10 a。

3.2.2　不同气候区 VPD 时间变化趋势

对 1980～2018 年全国饱和水汽压差的变化趋势进行分区统计，图 5 为 4 个气候区 VPD 逐年变化的距平以及累积距平。总体来说，近 40 年来各气候区的 VPD 均呈现上升趋势，与全球大气水汽压差的长期变化趋势一致（Yuan et al., 2019）。

对于各个气候区，累积距平曲线均在 2000 年前后发生转折，在 2000 年以前，距平值低于 0，逐年的 VPD 值低于 1980～2018 年 VPD 的平均值，而 2000 年以后高于平均值，表明这种增加趋势大致出现在 21 世纪初，与全球大气水汽压差在上世纪 90 年代末以来呈现急剧增加的趋势结论一致（Yuan et al., 2019）。对各个区的 1980～2018 年逐年 VPD 值做 M–K 突变检验，得到一致的结论：4 个区的 VPD 均在 21 世纪初突变上升并通过显著性检验，其中湿润区突变年份偏早（1996 年），

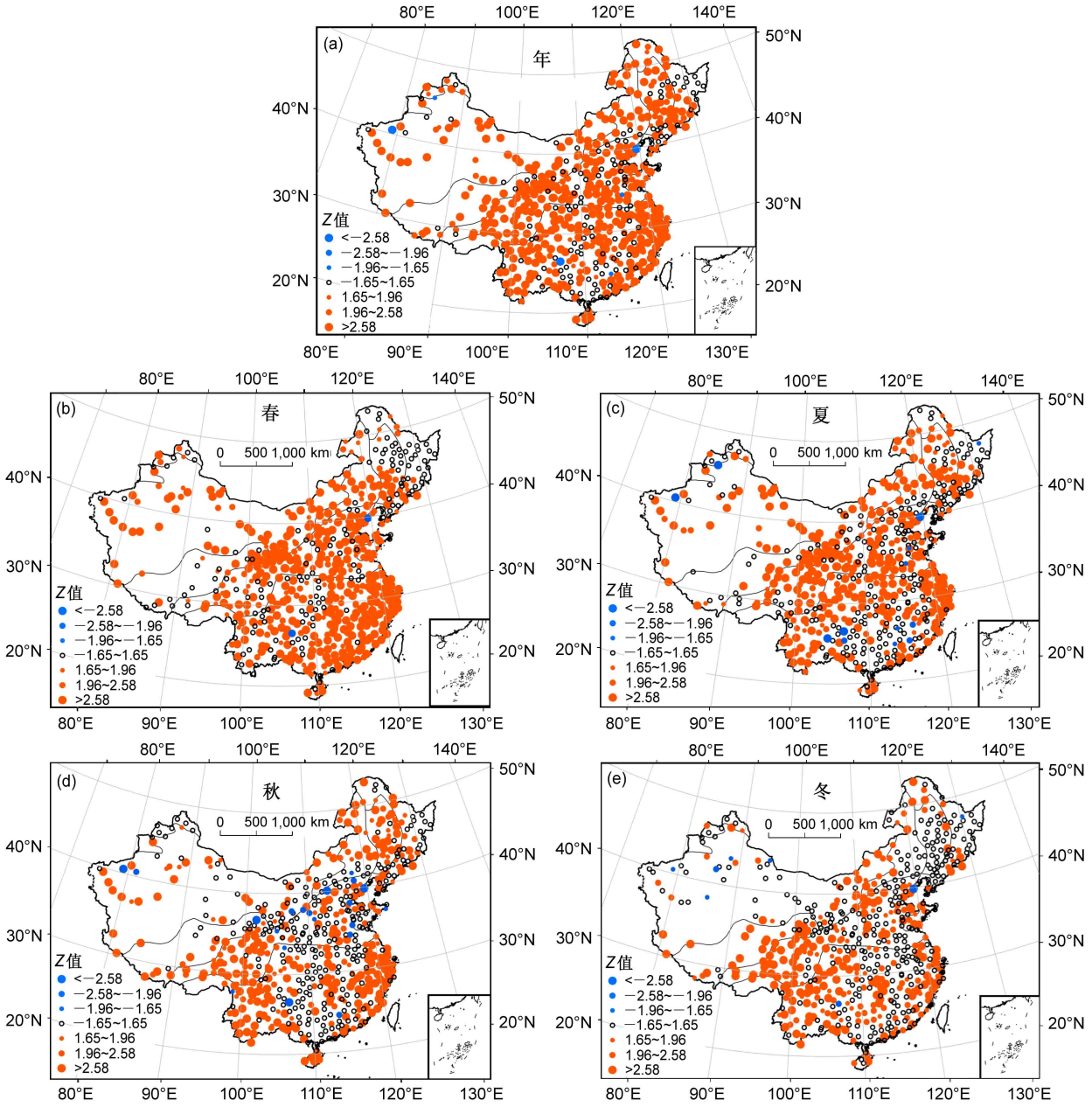

图 4 1980～2018 年中国全年和四季 VPD 的 M–K 变化趋势（ Z 值）：（a）全年；（b）春季；（c）夏季；（d）秋季；（e）冬季。蓝色实心圆代表 VPD 呈下降趋势，橙色实心圆代表 VPD 呈上升趋势，黑色空心圆代表 VPD 无显著变化趋势；$|Z|$大于 1.65、1.96、2.58 分别表示 VPD 的变化趋势通过了 0.1、0.05、0.01 显著性检验

Fig. 4 Trends of annual and seasonal VPD in China from 1980 to 2018: (a) Annual; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter. The blue and orange solid circles denote the downward and upward trends of VPD, respectively, and the black hollow circle denotes no significant change trend of VPD; $|Z| > 1.65$, 1.96, and 2.58 shows that the changing trend of VPD passed the significance test with a significance level of 0.1, 0.05, and 0.01, respectively

干旱区突变年份较晚（2004 年），并且在 1996 年以前呈下降趋势（图 6）。通过 Sen's 坡度检验（赵彦军等, 2019），发现干旱区的上升幅度最大，约为 0.04 kPa/10 a。

3.3 影响 VPD 时空变化的气象因素

根据 VPD 的整体变化趋势，将 1980～2018 年划分为 1980～1999 年和 2000～2018 年两个时段来分别分析影响 VPD 的气象要素，气象要素包括：平均气温、风速、日照时数、降水、气压和绝对湿度。将各气象要素对 VPD 的贡献率排序整理，结果见表 1。

不同时段、不同气候区、不同季节影响 VPD

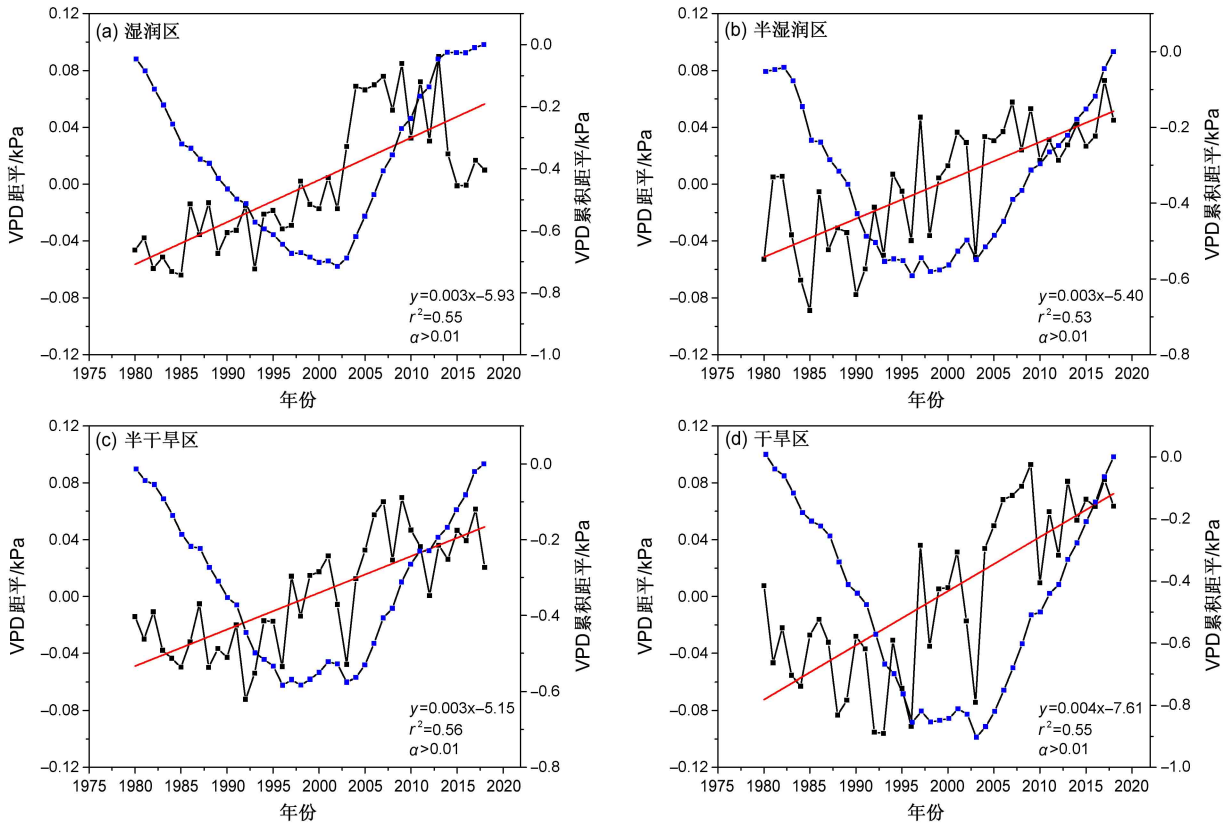

图 5　1980～2018 年中国不同气候区 VPD 的变化趋势：（a）湿润区；（b）半湿润区；（c）半干旱区；（d）干旱区。r^2 表示决定系数，α 表示显著性水平。黑色曲线代表 VPD 的距平，蓝色曲线代表 VPD 的累积距平，红色直线为 VPD 距平的线性拟合

Fig. 5　Trends of VPD in different climate regions of China from 1980 to 2018: (a) Humid region; (b) subhumid region; (c) semiarid region; (d) arid region. r^2 denotes the coefficient of determination, α denotes the significance level. The black and blue curves denote the anomaly and cumulative anomaly of VPD, respectively, and the red line denotes the linear fit of the anomaly of VPD

变化的主导因素有所差异，但总体而言，主要为气温和绝对湿度（表 1）。具体而言，第一时段（1980～1999 年），影响各个气候区 VPD 的第一主导气象要素为气温，其次为降水（半干旱区秋季为日照时数）；与第一时段相比，第二时段（2000～2018 年）主导气象要素有所变化，湿润区的年、春季以及干旱区的年、夏、秋季由绝对湿度主导，而湿润区和半湿润区的秋季由降水主导，其余仍由气温主导。总体而言，对于年际变化来说，两阶段相比，干旱区和湿润区的绝对湿度对 VPD 的作用增大，温度的作用略有减小。对两阶段气温和绝对湿度的年际变化做 Sen's 坡度检验如表 2 所示。随着气温逐渐升高，饱和水汽压增大，即空气中可容纳的水汽含量增加，而 2000 年后，由于西北干旱区降水量减少（徐荣潞，2020），干旱区绝对湿度由第一阶段的增加趋势转为降低趋势，空气中容纳的水汽含量以 0.12 g m^{-3} (10 a)$^{-1}$ 的速率降低，直接导致了 VPD 的迅速升高。而第二阶段半干旱区和半湿润区绝对湿度变化不大，气温的增加速率相对较大，饱和水汽压越来越大，因此气温仍是 VPD 增加的主导因子。湿润区第一阶段气温增幅较高，而绝对湿度增幅低，气温的增加是 VPD 增加的主导因子，第二阶段的气温与绝对湿度均呈增加趋势，气温的增加幅度低，绝对湿度增加幅度相对较大，达 0.21 g m^{-3} (10 a)$^{-1}$，这可能是因为湿润区降水量充沛，气温的升高使得更多的水蒸汽被吸收到空气中，其与气温的共同作用导致 VPD 的增加幅度相对第一阶段放缓（图 5），但 VPD 的值相比第一阶段整体偏高（表 1）。

3.4　VPD 变化对参考蒸散的影响

根据彭曼公式（Li et al., 2014）计算不同气候区各季节的参考蒸散（ET_0）并与 VPD 做相关性分析，结果表明（表 3），1980～2018 年间 VPD 与参考蒸散在不同气候区、不同季节均呈现显著正相关关系，相关性均通过 α=0.01 的显著性检验。年尺度上，湿润区 ET_0 与 VPD 的相关性最强

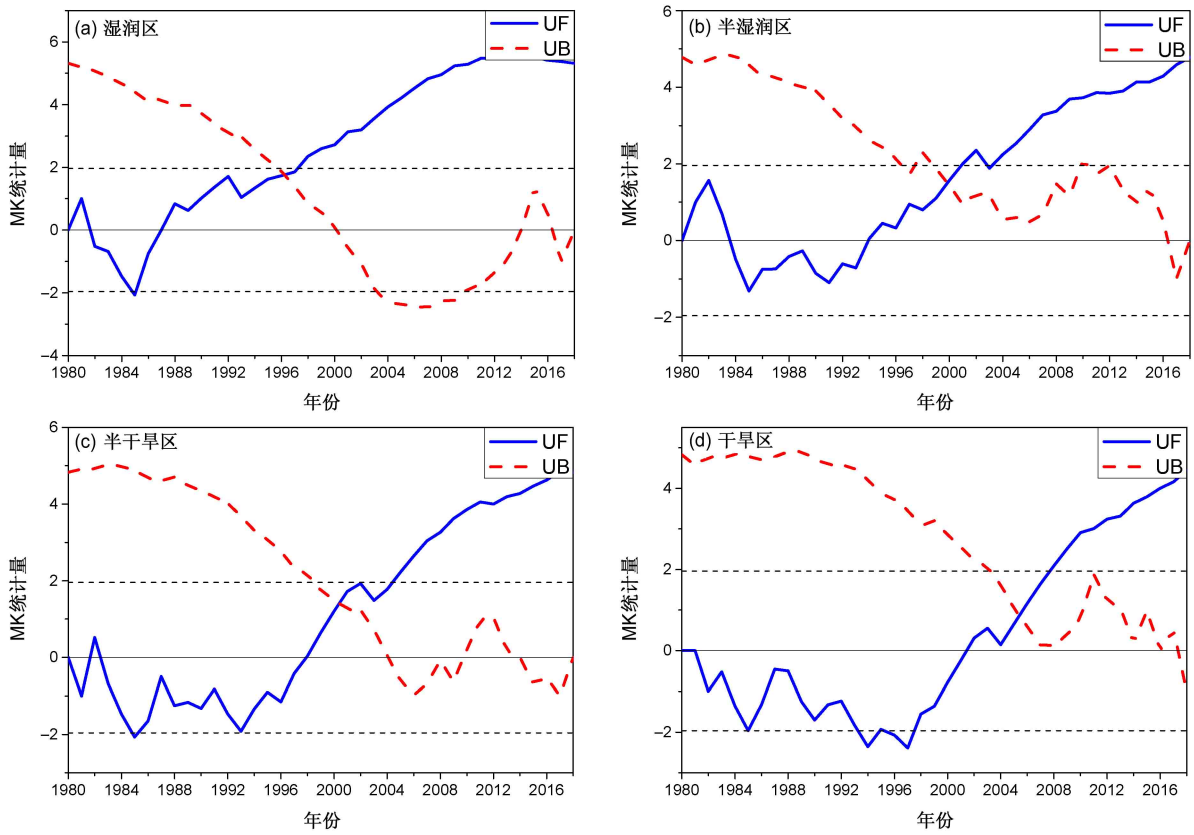

图 6 1980～2018 年中国不同气候区 VPD 的 Mann–Kendall 统计量曲线：（a）湿润区；（b）半湿润区；（c）半干旱区；（d）干旱区。黑色虚线为 α=0.05 水平临界值

Fig. 6 Mann–Kendall statistical curves of VPD in different climate regions of China from 1980 to 2018: (a) Humid region; (b) subhumid region; (c) semiarid region; (d) arid region. The black dash line denotes the significance level of α = 0.05

（0.88）；各个气候区冬季、春季的相关性（0.85～0.96）强于夏季、秋季（0.67～0.85）。这表明，ET_0 随着 VPD 的增加而增加，尤其是在降水较少的干燥季节（冬、春两季），这可能导致作物需水量上升并加剧用水短缺从而对作物产量产生影响（Fan et al., 2016）。

4 讨论

气温升高会导致大气和地表之间温度差异增大，同时大气和地表间的湿度差异也会发生非线性变化，VPD 可以描述这种共同的综合作用（徐兴奎，2011）。本研究中年均 VPD 的空间分布状况与朱晓华等（2019）在 1961～2017 年 VPD 的空间分布情况基本一致，但本文进一步分季节讨论，发现我国冬季 VPD 的分布情况与其他季节不同，主要体现在干旱区的 VPD 较湿润区低。唐欢等（2018）研究指出，VPD 与降水量之间呈负相关关系，降水量越大，VPD 值越小；韩磊等（2018）、党宏忠等（2019）的研究认为在小时和日尺度上 VPD 与气温、风速、太阳辐射呈正相关，而与相对湿度呈负相关。我们的结论与以上基本一致，并进一步发现气温和绝对湿度的变化是影响我国 VPD 近 40 年变化的主要因素。其中，2000 年以后，影响不同气候区 VPD 变化的主导因子不同，这可能与不同气候区本身的水分条件差异、植被覆盖率、城市化进程差异以及城市化引起的蒸散发含量差异等有关。

目前针对饱和水汽压差的研究较少，Matsoukas et al.（2011）认为全球气温上升是导致水汽压差上升的主要原因；Irmak et al.（2012）指出影响美国普拉特河（Platte River）流域水汽压差上升的原因为气温和降水；Qin et al.（2019）认为气温的升高以及城市化进程导致了秦淮河流域蒸散下降，这可能是饱和水汽压差上升的主要原因，前者增加了饱和水汽压而后者降低了实际水汽压；

表 1　1980 ~ 2018 年中国不同气候区全年和四季饱和水汽压差变化及影响因素

Table 1　Impact factors of the variation of vapor pressure deficit from 1980 to 2018

气候区域	时段	VPD均值/kPa 1980～1999年	VPD均值/kPa 2000～2018年	VPD变化趋势（M–K值）	气象因素作用 1980～1999年	气象因素作用 2000～2018年
湿润区	全年	0.48	0.55	5.30 *	T>AH>h	AH>T>P>u
	春季	0.50	0.59	5.13*	T>AH>h	AH>T>h>R
	夏季	0.66	0.76	3.99*	T>AH>h	T>AH
	秋季	0.49	0.55	3.36*	R主导	R主导
	冬季	0.28	0.31	3.15*	T>AH>h>P	h>R
半湿润区	全年	0.53	0.59	4.77*	R>T>P	T>P>AH>R
	春季	0.63	0.73	3.77*	T>AH>h	T>AH
	夏季	0.77	0.87	4.02*	T>AH	T>AH>h
	秋季	0.47	0.49	2.85*	T>AH>R	R>u
	冬季	0.24	0.25	2.56*	T>AH>R	T>AH>P
半干旱区	全年	0.52	0.58	4.81*	T>AH>h	T>AH
	春季	0.61	0.68	4.38*	T>AH>h>P	T>AH
	夏季	0.82	0.94	3.46*	T>AH>h	T>AH
	秋季	0.45	0.47	2.66*	h>T>R	
	冬季	0.21	0.23	3.36*	T>AH>h	T>AH
干旱区	全年	0.83	0.92	4.55*	T>AH>h>P	AH>T
	春季	0.93	1.05	3.92*	T>AH	T>AH>R
	夏季	1.53	1.71	4.19*	T>AH>h	AH>T
	秋季	0.66	0.70	3.12*	T=h>R	AH>T>R>P
	冬季	0.19	0.20	1.28 +	T>AH	T>AH

*代表变化趋势通过了α=0.05的显著性水平检验，+代表存在上升趋势但未通过α=0.05的显著性水平检验；T、u、h、R、P、AH分别表示气温、风速、日照时数、降水、气压和绝对湿度对饱和水汽压差变化的影响。

表 2　1980 ~ 2018 年中国不同气候区气温与绝对湿度的 Sen's 坡度值

Table 2　Sen's slope of temperature and absolute humidity from 1980 to 2018

气候区	气温Sen's坡度值 /10^{-1} ℃ (10 a)$^{-1}$ 1980～1999年	气温Sen's坡度值 2000～2018年	绝对湿度Sen's坡度值 /g m^{-3} (10 a)$^{-1}$ 1980～1999年	绝对湿度Sen's坡度值 2000～2018年
湿润区	0.42	0.17	0.18	0.21
半湿润区	0.63	0.26	0.18	0.05
半干旱区	0.55	0.31	0.20	−0.02
干旱区	0.58	0.24	0.27	−0.12

注：Sen's坡度值均已乘10，代表每10年气象要素的变化趋势。

表 3　1980 ~ 2018 年中国不同气候区在年及季节尺度上 VPD 与参考蒸散的相关系数

Table 3　Correlation coefficients between VPD and reference evapotranspiration at different annual and seasonal scales in different climate regions of China from 1980 to 2018

气候区	VPD与参考蒸散的相关系数 全年	春季	夏季	秋季	冬季
湿润区	0.88 **	0.89 **	0.73 **	0.85 **	0.94 **
半湿润区	0.64 **	0.85 **	0.67 **	0.69 **	0.94 **
半干旱区	0.81 **	0.90 **	0.83 **	0.72 **	0.93 **
干旱区	0.83 **	0.91 **	0.83 **	0.83 **	0.96 **

*和**分别代表通过了α=0.05和0.01的显著性检验。

Hao et al.（2018）发现长江三角洲城市地区 VPD 的增加与稻田湿地向城市转化造成的植被覆盖指数降低密切相关；Seager et al.（2015）预计大气环流异常能够通过温暖而干燥的空气影响 VPD，前期降水的减少也可能会使土壤变干并导致 VPD 增加。我们的研究表明，1980～2018 年，主导湿润区、半干旱区和干旱区年平均 VPD 年际变化的气象因素为气温和绝对湿度，主导半湿润区年平均 VPD 年际变化的气象因素为气温和降水。

研究还发现，我国 VPD 的空间分布与蒸发皿蒸发量的空间分布相似（朱晓华等, 2019），预示着 VPD 与区域的蒸发潜力在空间上存在对应关系，而 VPD 的增加预示着大气“干燥力”加强，对应

的区域内蒸发潜力会增加，进而会引起地表能量和水分收支的变化，这对于深入探讨我国在当前全球气候变化和变异条件下区域的环境效应有参考价值。Hao et al.（2018）在分析我国南方湿地的“城市干岛”效应时发现长江三角洲地区 VPD 与参考蒸散呈显著正相关关系。Qin et al.（2019）在半湿润区秦淮河流域的研究发现，近二十年来秦淮河流域参考蒸散发的控制因子有所改变，除了气温，VPD 也成为这一流域参考蒸散发变化的主要控制因子。湿度下降、VPD 升高甚至超过了温度升高对参考蒸散增加的影响，并因此加重大气水分需求，气候由湿热变得干热，出现“热岛干化”现象。张美玲等（2015）在研究 1961～2010 年鲁南地区参考蒸散量的时空分布特征及气候归因时，也发现 VPD 与参考蒸散的年际变化呈正相关。本文也在全国范围内发现在 1980～2018 年 VPD 与参考蒸散在不同气候区、不同季节均呈现显著正相关的关系。

本文是在全国范围下进行分析的，由于各地区气候、海拔、下垫面等的不一致，在以后更具体的研究区域下有待更深一步讨论。另外，在探究影响 VPD 的时空变化因素时，还需结合城乡差异、下垫面结构、植被覆盖、云量等多方位多角度因素，以获得对 VPD 更加全面和深入的认识。

5 结论

（1）1980～2018 年，我国 VPD 的分布存在空间差异性和季节差异性。不论哪个气候区，VPD 均呈“夏季>春季>秋季>冬季”；全年以及春、夏季节的 VPD 由湿润区到干旱区逐渐升高，冬季相反，即湿润区和干旱区的夏季和冬季 VPD 分布呈相反格局。

（2）我国绝大部分地区逐年 VPD 呈增长趋势，各个季节各个区域均呈现显著增长趋势（仅干旱区冬季为不显著增长），即大气变得更“干燥”了；各区域逐年 VPD 的增长趋势是 2000 年左右发生突变的结果，湿润区较早，干旱区较晚，此前呈现平稳波动或下降的趋势。

（3）影响 VPD 增大的主导因子在不同区域、不同季节有所差异，但总体看来，气温和绝对湿度的变化是 VPD 年际变化的主要影响因素。对于年际变化来讲，2000 年后，影响湿润区和干旱区 VPD 增加的第一主导气象要素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。

参考文献（References）

Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements [Z]. Rome, Italy: FAO, 17−27.

陈彪, 陈立欣, 刘清泉, 等. 2015. 半干旱地区城市环境下樟子松蒸腾特征及其对环境因子的响应 [J]. 生态学报, 35(15): 5076−5084. Chen Biao, Chen Lixin, Liu Qingquan, et al. 2015. Transpiration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to urban environmental factors in semi−arid area [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 35(15): 5076−5084. doi:10.5846/stxb201401150113

陈婧, 马志强, 胡天洁, 等. 2019. 华北背景地区大气能见度变化特征及影响因素分析 [J]. 气候与环境研究, 24(2): 277−288. Chen Jing, Ma Zhiqiang, Hu Tianjie, et al. 2019. Variation characteristics of atmospheric visibility and its influence factors in the background area of North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(2): 277−288. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18085

Cunningham S C. 2004. Stomatal sensitivity to vapour pressure deficit of temperate and tropical evergreen rainforest trees of Australia [J]. Trees, 18(4): 399−407. doi:10.1007/s00468-004-0318-y

党宏忠, 却晓娥, 冯金超, 等. 2019. 晋西黄土区苹果树边材液流速率对环境驱动的响应 [J]. 应用生态学报, 30(3): 823−831. Dang Hongzhong, Que Xiaoe, Feng Jinchao, et al. 2019. Response of sap flow rate of apple trees to environmental factors in Loess Platea of western Shanxi province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 30(3): 823−831. doi:10.13287/j.1001-9332.201903.015

Fan J L, Wu L F, Zhang F C, et al. 2016. Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956−2015 [J]. J. Hydrol., 542: 923−937. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.09.060

Fletcher A L, Sinclair T R, Allen L H Jr. 2007. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean [J]. Environmental and Experimental Botany, 61(2): 145−151. doi:10.1016/j.envexpbot.2007.05.004

郭媛. 2012. 近 50 年来 (1960～2010) 长江流域实际蒸发量变化的时空格局及其影响要素分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 51pp. Guo Yuan. 2012. Temporal and spatial structure of variations of actual evapotranspiration and the analysis of the impact factors over the Yangtze River basin nearly 50 years (1960−2010) [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 51pp.

韩磊, 何俊, 齐拓野, 等. 2018. 宁夏河东沙区侧柏冠层气孔导度对环境因子的响应及其模拟 [J]. 生态学杂志, 37(9): 2862−2868. Han Lei, He Jun, Qi Tuoye, et al. 2018. Responses and modeling of canopy stomatal conductance of *Platycladus orientalis* to environmental factors in Hedong sandy land, Ningxia [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 37(9): 2862−2868. doi:10.13292/

j.1000-4890.201809.032

Hao L, Huang X L, Qin M S, et al. 2018. Ecohydrological processes explain urban dry island effects in a wet region, southern China [J]. Water Resour. Res., 54(9): 6757−6771. doi:10.1029/2018WR023002

Irmak S, Kabenge I, Skaggs K E, et al. 2012. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River basin, central Nebraska—USA [J]. J. Hydrol., 420-421: 228−244. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.006

贾志军, 宋长春, 王跃思, 等. 2007. 三江平原典型沼泽湿地蒸散量研究 [J]. 气候与环境研究, 12(4): 496−502. Jia Zhijun, Song Changchun, Wang Yuesi, et al. 2007. Studies on evapotranspiration over mire in the Sanjiang Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(4): 496−502. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.04.004

Kendall M G. 1975. Rank Correlation Methods [M]. 4th ed. London, UK: Griffin.

李静. 2014. 几种植物叶片气孔导度与植物激素对大气湿度的响应 [D]. 山东大学博士学位论文, 158 pp. Li Jing. 2014. Response of stomatal conductance and phytohormones of leaves to vapor pressure deficit in some species of plants [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Shandong University, 158pp.

Li Z X, Feng Q, Liu W, et al. 2014. Spatial and temporal trend of potential evapotranspiration and related driving forces in southwestern China, during 1961−2009 [J]. Quaternary International, 336: 127−144. doi:10.1016/j.quaint.2013.12.045

刘玉莉, 江洪, 周国模, 等. 2014. 安吉毛竹林水汽通量变化特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 34(17): 4900−4909. Liu Yuli, Jiang Hong, Zhou Guomo, et al. 2014. Water vapor flux variation characteristic and the relationship with its environment factors in *phyllostachys edulis* forest in Anji [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 34(17): 4900−4909. doi:10.5846/stxb201301050025

刘志红, Li Lingtao, McVicar T R, et al. 2008. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用 [J]. 气象, 34(2): 92−100. Liu Zhihong, Li Lingtao, McVicar T R, et al. 2008. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(2): 92−100. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.02.013

Lobell D B, Hammer G L, McLean G, et al. 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States [J]. Nature Climate Change, 3(5): 497−501. doi:10.1038/nclimate1832

Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13(3): 245−259. doi:10.2307/1907187

Mao K B, Chen J M, Li Z L, et al. 2017. Global water vapor content decreases from 2003 to 2012: An analysis based on MODIS data [J]. Chinese Geographical Science, 27(1): 1−7. doi:10.1007/s11769-017-0841-6

Matsoukas C, Benas N, Hatzianastassiou N, et al. 2011. Potential evaporation trends over land between 1983-2008: Driven by radiative fluxes or vapour−pressure deficit? [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(15): 7601−7616. doi:10.5194/acp-11-7601-2011

Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. 2016. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes [J]. Nature Climate Change, 6(11): 1023−1027. doi:10.1038/nclimate3114

秦奔奔, 景元书. 2017. 樟树树干液流特征及其与气象因子的相关性研究 [J]. 江西农业大学学报, 39(2): 349−356, 365. Qin Benben, Jing Yuanshu. 2017. A study on the rule of sap flow in camphor tree and its relation to meteorological factors [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (in Chinese), 39(2): 349−356, 365. doi:10.13836/j.jjau.2017045

Qin M S, Hao L, Sun L, et al. 2019. Climatic controls on watershed reference evapotranspiration varied during 1961−2012 in southern China [J]. Journal of the American Water Resources Association, 55(1): 189−208. doi:10.1111/1752-1688.12714

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]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 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 Kanghui, Zeng Xiaodong, Li Fang. 2019. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980−2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 455−468. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058

唐国利, 罗勇, 黄建斌, 等. 2012. 气候变暖在继续 [J]. 气候变化研究进展, 8(4): 235−242. Tang Guoli, Luo Yong, Huang Jianbin, et al. 2012. Continuation of the global warming [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese), 8(4): 235−242. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.04.001

唐欢, 李振旺, 丁蕾, 等. 2018. 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, 35(11): 2568−2583. Tang Huan, Li Zhenwang, Ding Lei, et al. 2018. Validation of GPP remote sensing products using eddy covariance flux observations in the grassland area of China [J]. Pratacultural Science (in Chinese), 35(11): 2568−2583. doi:10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0353

徐荣潞, 李宝富, 廉丽姝. 2020. 1960～2015 年西北干旱区相对湿度时空变化与气候要素的定量关系 [J]. 水土保持研究, 27(6): 233−239, 246. Xu Lurong, Li Baofu, Lian Lishu. 2020. Quantitative relationship between the spatio−temporal change of relative humidity and climatic factors in the arid region of Northwest China from 1960 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation (in Chinese), 27(6): 233−239, 246.

徐兴奎. 2011. 1970～2000 年中国近地层大气热力增强的气候效应 [J]. 地球科学进展, 26(1): 48−56. Xu Xingkui. 2011. Climatic effect of atmospheric thermodynamics over land surface from 1970−2000 [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 26(1): 48−56. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2011.01.0048

闫敏, 李增元, 田昕, 等. 2016. 黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 40(1): 1−12. Yan Min, Li Zengyuan, Tian Xin, et al. 2016. Remote sensing estimation of gross primary productivity and its response to climate change in the upstream of Heihe River basin [J]. Chinese Journal of Plant Ecology (in Chinese), 40(1): 1−12. doi:10.17521/cjpe.2015.0253

于贵瑞, 王秋凤. 2010. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学

[M]. 北京: 科学出版社. Yu Guirui, Wang Qiufeng. 2010. Ecophysiology of Plant Photosynthesis, Transpiration, and Water Use (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.

Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, et al. 2019. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth [J]. Science Advances, 5(8): eaax1396. doi:10.1126/sciadv.aax1396

张美玲, 鹿翠华, 陈连侠, 等. 2015. 1961～2010 年鲁南地区参考作物蒸散量时空分异特征及气候归因 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 35(6): 582−589. Zhang Meiling, Lu Cuihua, Chen Lianxia, et al. 2015. Variation characteristics and climate explanation of spatial distribution and temporal variation of reference crop evapotranspiration in south of Shandong from 1961 to 2010 [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition) (in Chinese), 35(6): 582−589. doi:10.3969/j.issn.1671-8151.2015.06.005

Zhang S, Tao F L, Zhang Z. 2017. Spatial and temporal changes in vapor pressure deficit and their impacts on crop yields in China during 1980−2008 [J]. J. Meteor. Res., 31(4): 800−808. doi:10.1007/s13351-017-6137-z

赵卉忱, 贾根锁, 王鹤松, 等. 2020. 中国半干旱区草甸草原和典型草原碳通量日变化特征 [J]. 气候与环境研究, 25(2): 172−184. Zhao Huichen, Jia Gensuo, Wang Hesong, et al. 2020. Diurnal variations of the carbon fluxes of semiarid meadow steppe and typical steppe in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(2): 172−184. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19096

赵彦军, 徐宗学, 谭秋阳, 等. 2019. 深圳市降水特征时空演变规律分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 55(5): 564−571. Zhao Yanjun, Xu Zongxue, Tan Qiuyang, et al. 2019. Spatiotemporal variations in precipitation in Shenzhen [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 55(5): 564−571. doi:10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.05.003

朱晓华, 徐芳, 姬祥祥, 等. 2019. 基于 PenPan 模型中国蒸发皿蒸发量的时空变化及成因分析 [J]. 节水灌溉, (7): 87−94, 100. Zhu Xiaohua, Xu Fang, Ji Xiangxiang, et al. 2019. Spatio−temporal variation and causes of Pan evaporation in China based on PenPan model [J]. Water Saving Irrigation (in Chinese), (7): 87−94, 100. doi:10.3969/j.issn.1007-4929.2019.07.018