

## 海陆气协同作用对华北地区夏季高温热浪的影响

杨凯 冯信贤 黄刚

### Effect of Land–Ocean–Atmosphere Interaction on Summer Heat Waves in North China

YANG Kai FENG Xinxian HUANG Gang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23035>

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

#### 湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因

Spatial–Temporal Characteristics and Causes of Summer Heat Waves in Hunan Province

气候与环境研究. 2017, 22(6): 747 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17025>

#### 1960 ~ 2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势

Linear Trends in Occurrence of High Temperature and Heat Waves in China for the 1960–2018 Period: Method and Analysis Results

气候与环境研究. 2020, 25(3): 225 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134>

#### 中亚地区夏季温度的季节预测

Seasonal Prediction of Summer Temperature over Central Asia

气候与环境研究. 2019, 24(2): 251 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18121>

#### 珠海凤凰山森林下垫面干季和湿季气象要素的对比分析与动量和感热交换系数的参数化研究

Comparison of Meteorological Elements in Dry and Wet Seasons and Parameterization of Momentum and Sensible Heat Exchange Coefficients near the Underlying Surface of the Zhuhai Phoenix Mountain Forest

气候与环境研究. 2020, 25(5): 457 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19027>

#### 我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应

Climate Effect Assessment of Ideal Large–Scale Solar and Wind Power Farms in Northwest China

气候与环境研究. 2021, 26(2): 123 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126>

#### 中国夏季降水的组合统计降尺度模型预测研究

Application of the Hybrid Statistical Downscaling Model in Summer Precipitation Prediction in China

气候与环境研究. 2020, 25(2): 163 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18168>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨凯, 冯信贤, 黄刚. 2023. 海陆气协同作用对华北地区夏季高温热浪的影响 [J]. 气候与环境研究, 28(6): 665–675. YANG Kai, FENG Xinxian, HUANG Gang. 2023. Effect of Land–Ocean–Atmosphere Interaction on Summer Heat Waves in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 28 (6): 665–675. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23035

# 海陆气协同作用对华北地区夏季高温热浪的影响

杨凯 冯信贤 黄刚

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 通过统计分析并利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式进行多组敏感性试验研究发现, 华北地区前期土壤湿度异常与夏季高温热浪的关系受到西太平洋副热带高压 (西太副高) 强度的影响。当西太副高异常偏强时, 其西侧南风携带来自热带海洋的大量水汽至华北地区南部并增加该区域降水, 不利于前期土壤湿度干异常的维持, 从而限制了前期土壤湿度异常对高温热浪的贡献。相反, 当西太副高偏弱时, 华北地区前期土壤湿度干异常持续能力较强, 有利于局地高温热浪的发展。西太副高强度与热带中东太平洋地区海温有关。当夏季热带太平洋海温异常处于暖位相时, 西太副高强度相对较弱且华北地区南部降水偏少, 有利于前期较干土壤条件的维持。此类情况下前期土壤湿度异常可以作为高温热浪的预测信号。

**关键词** 高温热浪 海气相互作用 陆气相互作用 季节预测

文章编号 1006-9585(2023)06-0665-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23035

## Effect of Land–Ocean–Atmosphere Interaction on Summer Heat Waves in North China

YANG Kai, FENG Xinxian, and HUANG Gang

*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** Based on statistical analysis and multiple sensitivity experiments using the Weather Research and Forecasting model, it is found that the relationship between preceding soil moisture anomalies and summer heat waves in North China is affected by the strength of the West Pacific Subtropical High (WPSH). When the WPSH is strong, the southerly winds on its west side carry a large amount of water vapor from the tropics to the southern parts of North China and increase the precipitation in the region, which is not conducive to maintain the preceding soil moisture dry anomaly, thereby restricting the contribution of the preceding soil moisture anomaly to the summer heat waves. In contrast, when the WPSH is weak, the soil moisture dry anomalies in North China can last for a longer duration and lead to heat waves. The WPSH intensity is associated with the Sea Surface Temperature (SST) in the tropical central–eastern Pacific. When the tropical Pacific SST exhibits positive anomaly in summer, the WPSH is relatively weak, and the precipitation in North China is low, which is conducive for maintaining dry soil conditions in North China. Under such scenarios, the preceding soil moisture anomaly can be employed as the prediction signal of heat waves in North China.

**Keywords** Heat waves, Ocean–atmosphere interaction, Land–atmosphere interaction, Seasonal prediction

收稿日期 2023-04-18; 网络预出版日期 2023-09-05

作者简介 杨凯, 男, 1992 年出生, 博士, 主要从事海陆气相互作用相关研究。E-mail: yangkai@mail.iap.ac.cn

通讯作者 黄刚, E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金青年基金项目 42105032, 中国博士后基金 2018M640168

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42105032), China Postdoctoral Science Foundation (Grant 2018M640168)

## 1 引言

我国华北地区人口密集,气候条件受到东亚季风的影响。在全球变暖背景下,华北地区频繁遭受高温热浪事件的影响,给国家和人们带来了严重的损失 (Ding et al., 2010; Sun et al., 2014; Li et al., 2017; Johnson et al., 2018)。前人的研究指出华北地区高温热浪事件在近几年呈现增长趋势 (Li et al., 2017; Chen et al., 2018; Zhang et al., 2020)。因此,如何提高对华北地区夏季高温热浪的季节预测水平是重要的科学问题。

华北地区高温热浪的形成受到来自海洋和陆面过程多方面因素的影响 (Sun, 2012; 陈海山和周晶, 2013; Wang et al., 2016; Deng et al., 2019; Zhang et al., 2020)。热带海温如热带太平洋海温和热带大西洋海温可以通过影响东亚环流系统,在华北地区上空产生高压异常 (Wei et al., 2020; Zhang et al., 2020)。高压系统可以导致局地盛行下沉气流,抑制降水并减少云量,增加向下太阳辐射,是高温热浪形成的主要因素 (Yang et al., 2019)。局地陆气相互作用过程对高温热浪的形成也有重要影响 (Zhang and Wu, 2011)。当土壤偏干时,局地潜热通量减少,感热通量增加,进而导致局地温度升高 (Zhang and Dong, 2010; Liu et al., 2014; Zeng et al., 2014)。在一些情况下,局地温度升高可以加热大气并在对流层中层形成高压异常;高压异常又有利于下沉气流和少云天气,增加向下太阳辐射并使局地气温进一步升高,加剧高温天气的强度 (Fischer et al., 2007a, 2007b)。另一方面,土壤湿度异常偏低时,地表蒸发减少并降低大气中的水汽,不利于降水的形成;降水减少又可以进一步导致土壤湿度的负异常,从而形成正反馈机制并加剧干热天气的发展 (Meng and Shen, 2014; Zhong et al., 2018; Yuan et al., 2021)。土壤湿度与大气之间的反馈过程在华北地区夏季高温热浪的形成过程中起着重要作用 (Wu and Zhang, 2015; Zhang et al., 2015; Chen et al., 2020)。

土壤湿度作为陆面过程的慢变量,对气候异常条件具有一定的记忆能力 (Koster et al., 2014)。华北地区陆气相互作用较强,且土壤湿度记忆时间较长。前人的研究指出华北地区土壤湿度记忆可以达到 3 个月甚至更长 (Wu and Dickinson, 2004),

春季土壤湿度异常可以持续到夏季并影响夏季高温热浪的形成,为高温热浪的季节预测提供了潜在的预报因子 (郭维栋等, 2007; Wu and Zhang, 2015)。然而,在利用前期土壤湿度进行极端高温的季节预测时,一些研究发现不同环流条件下前期土壤湿度的影响可能不同 (Meng and Shen, 2014; Zhong et al., 2018; Zhu et al., 2021)。Quesada et al. (2012) 在利用前冬春季的土壤湿度预测夏季欧洲东南部的高温热浪时,发现前冬和春季的土壤湿度正异常 (土壤较湿) 往往可以抑制夏季欧洲东南部高温热浪的发生;但前冬和春季较干的土壤条件也有可能导致夏季产生高温天气,也有可能对应一个气温较低的夏季。造成这一不对称现象的原因是大气环流条件的影响。当夏季欧洲东南部上空大气存在反气旋环流异常时,下沉气流和异常偏多的向下太阳辐射抑制局地对流并提高局地温度,有利于较干土壤条件的维持并激发土壤湿度—大气之间的正反馈机制;然而,当夏季欧洲东南部上空大气存在气旋式环流异常时,多云天气和异常偏多的降水可以抑制土壤湿度—大气之间的反馈过程,使得前期较干的土壤并不会导致夏季的高温天气。相反,当前期土壤较湿时,无论夏季欧洲东南部上空大气存在何种环流异常,高温天气均不易发生。还有研究提出在较湿的环流条件下,土壤湿度的记忆能力往往较弱 (Song et al., 2019)。除了环流异常的影响以外,土壤干异常和湿异常的持续时间也存在不对称性。在相同的环流条件下,土壤湿度的湿异常衰退相对较快,而干异常往往可以持续更久 (Song et al., 2019)。

前人的研究指出华北地区春季土壤湿度可以作为夏季高温热浪的季节预测因子 (Wu and Zhang, 2015)。然而,在进行实际预测和量化分析时,一些研究发现观测中华北地区前期土壤湿度异常与夏季高温的关系并不稳定 (Wu et al., 2021)。本文的结果也表明华北地区 5 月土壤湿度与夏季高温指数虽然存在显著相关,但相关系数较低,且 5 月土壤湿度的负异常并不一定能够导致夏季产生较强的高温热浪。如前文所述,影响前期土壤湿度与后期高温热浪关系的过程有很多,包括局地环流条件的调控以及土壤湿度异常持续不对称性等。导致华北地区土壤湿度和夏季高温关系不稳定的原因需要进一步的研究。

本文的主要研究内容是结合统计分析和数值模式敏感性试验, 揭示影响华北地区前期土壤湿度和夏季高温热浪关系的主要过程。指出夏季热带中东太平洋海温可以通过影响西太平洋副热带高压强度进而影响华北地区夏季降水和土壤湿度异常的持续能力, 调节华北地区前期土壤湿度和夏季高温热浪关系。

## 2 数据和方法

### 2.1 观测和再分析资料

本文所用到的再分析资料包括 ERA5 (Fifth generation of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts atmospheric reanalyses; <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=overview> [2023-03-01]) 资料 1979~2020 年的日最高温度、地表温度、月土壤湿度、海表温度 (Sea Surface Temperature, SST)、位势高度场、降水量等数据, 水平分辨率为  $0.25^{\circ}$  (纬度)  $\times 0.25^{\circ}$  (经度)。所有变量的异常值均是通过减去 1979~2020 年的平均值计算得来。本文以高温日数来表征华北地区高温热浪的变化特征。以日最高气温大于  $30^{\circ}\text{C}$  为标准定义高温日, 高温日数是指固定某个季节或月份高温日的日数。高温日数可以很好地描述华北地区高温热浪的变化特征。利用绝对阈值和相对阈值计算得到的高温日数变化特征基本一致 (图 1)。我们同样计算了高温强度指数和高温持续时间指数, 两者的定义分别为固定某个季节或月份内所有高温日的日最高气温平均值和固定时间内高温日持续两天以上的次数。华北地区高温日数与高温强度指数以及高温持续时间指数具有较高的相关, 相关系数均超过了 99% 信度检验。因此本文主要以高温日数作为表征华北地区高温热浪变化特征的指数。

### 2.2 控制试验

为了研究影响华北地区前期土壤湿度和夏季高温热浪关系的主要过程, 本文利用 Weather Research and Forecasting Model (WRF, version 4.2.0) 区域气候模式进行了系列敏感性试验。采用 ERA5 再分析资料为 WRF 提供初始场和边界场驱动。首先进行了 1979~2020 共 42 年的控制试验模拟, 主要分析 1981~2020 年的结果。模拟区域如图 2a 所示, 基本覆盖东亚主要区域, 模拟水平分辨率为  $30\text{ km}$ 。

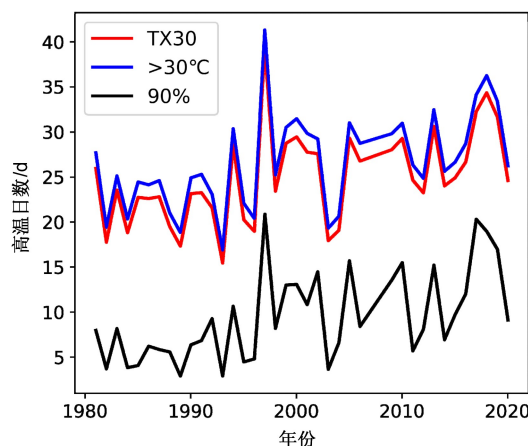


图 1 ERA5 再分析资料不同阈值计算的高温日数的比较。以华北地区区域平均的日最高气温 90% 分位数为阈值 (红色线), 以  $30^{\circ}\text{C}$  为阈值 (蓝色线), 和以每个格点的 90% 分位数为阈值 (黑色线) 得出的华北地区区域平均高温日数曲线

Fig. 1 Comparison of hot day indices using different thresholds from ERA5 reanalysis data. Regional averaged hot day numbers in North China derived using the 90th percentile of the regional averaged daily maximum temperature in North China (red line), the threshold of  $30^{\circ}\text{C}$  (blue line), and the threshold of the 90th percentile of each grid point (black line)

通过多组参数化方案组合的短期模拟, 并借鉴前人利用 WRF 模式模拟东亚地区时所采取的参数化方案, 最终采用的参数化方案包括: The Community Atmosphere Model (CAM) shortwave and longwave schemes (Collins et al., 2006), the Yonsei University (YSU) scheme (Hong et al., 2006b), the WRF-Single-Moment three-class (WSM3) micro-physics scheme (Hong et al., 2006a), the Kain-Fritsch cumulus parameterization scheme (Kain, 2004), Monin-Obukhov surface layer scheme, 其中陆面模式为 the Noah land surface model with multi-parameterization options (Chen and Dudhia, 2001; Niu et al., 2011)。

模拟结果表明, 控制试验较好地模拟出了东亚地区夏季气候主要特征。如图 2a 和 2b 所示, WRF 模式模拟的东亚地区夏季地表温度空间分布与 ERA5 资料的结果基本一致。在 ERA5 中, 我国夏季地表温度表现出明显的南北和东西向差异, 青藏高原地区温度最低而华南地区和西北地区温度相对较高 (图 2b); 聚焦华北地区, 华北地区南部温度高于北部, 东部 (河北和山东) 温度高于西部 (山西), 这些特征在控制试验中都有很好的体现 (图 2a)。对于东亚夏季降水, 虽然模式总体高

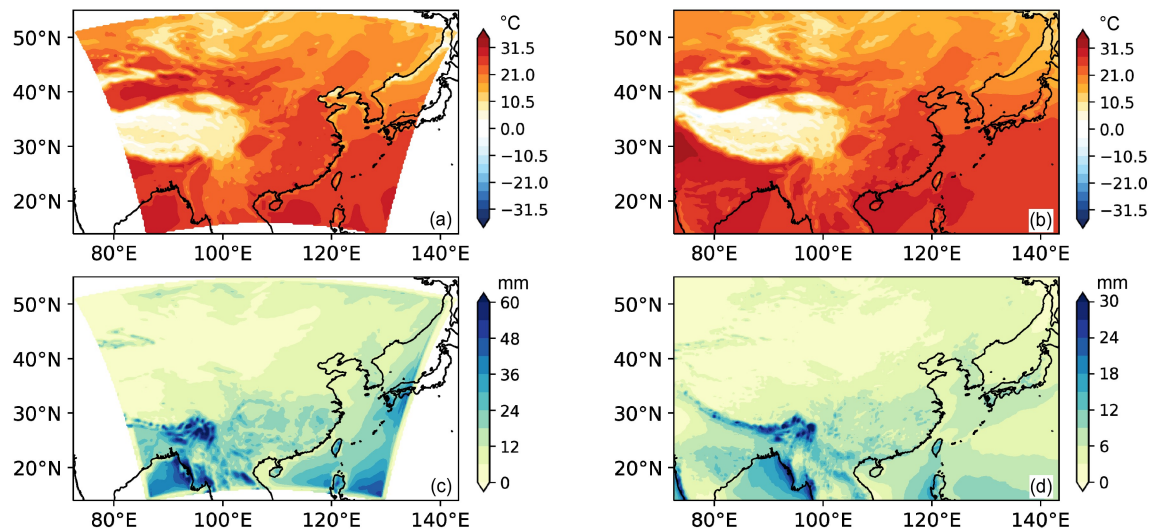


图2 控制试验模拟的(左列)和ERA5资料中(右列)东亚地区1981~2020年夏季(a、b)地表温度和(c、d)降水量的平均值分布

Fig. 2 Spatial patterns of (a, b) summer surface air temperature and (c, d) summer rainfall over East Asia from 1981 to 2020 simulated by WRF control experiment (left panel) and in ERA5 data (right panel)

估了东亚地区的降水量,但还是很好地重现了ERA5资料中南湿北干的空间分布特征(图2c和2d)。

### 2.3 敏感性试验

此外进行了两组敏感性试验。考虑到华北地区夏季高温热浪主要出现在7月(Wu et al., 2021),在进行敏感性试验时,主要考虑了初始土壤湿度对7月高温热浪的影响。两组敏感性试验分别为土壤湿度正异常组和土壤湿度负异常组。首先提取了控制试验1981~2020年共40年6月26日至7月4日(共360 d)的00:00(协调世界时,下同)时刻的土壤湿度数据,并计算华北地区的区域平均,选出其中最干和最湿的一天的土壤湿度数据。以最干天的00:00时刻土壤湿度数据作为土壤湿度负异常组敏感性试验的初始土壤湿度条件,以最湿天的00:00时刻土壤湿度数据作为土壤湿度正异常组敏感性试验的初始土壤湿度条件。利用控制试验每年7月1日的restart文件进行敏感性试验的模拟,积分时间均为1个月,并进行40年的分别模拟。在两组敏感性试验中,除修改4层土壤湿度初始条件以外,其他均与控制试验相同。最终得到土壤湿度正异常组40年×1个月的模拟和土壤湿度负异常组40年×1个月的模拟。每组试验中,每年7月1日土壤湿度的初始条件保持不变(最干或最湿天)。通过比较土壤湿度正异常组和负异常组的差异,来研究初始土壤湿度对华北地区7月高温热浪的影响。此外,将40年的试验分为土壤湿度异常

引起高温热浪高异常年和低异常年,通过比较两年份的特征来确定影响前期土壤湿度与高温热浪关系的主要过程。

## 3 结果

### 3.1 土壤湿度与高温关系的模拟

ERA5再分析资料中华北地区5月土壤湿度与夏季高温日数总体呈现负相关,但在华北地区南部相关系数总体偏小且不显著,相关系数大值区位于北京及其东部地区(图3a)。这说明在华北地区南部,前期土壤湿度异常与夏季高温的关系并不稳定。聚焦6月土壤湿度异常与7月高温日数,两者在华北地区区域平均值的相关系数为-0.38,通过了95%信度检验(图3b)。然而,在一些6月土壤较干的年份(如数值在 $0.2 \sim 0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的年份),7月的高温日数依旧较低。说明6月土壤湿度的干异常并不一定能够导致7月高温日数的增加。对控制试验的结果进行相同的分析发现控制试验的结果与再分析数据的结果基本一致。控制试验中5月次表层土壤湿度与夏季高温日数的高相关区域大致位于华北地区西北部,但高估了华北地区西南部两者的相关(图3c)。在40年的控制试验模拟中,有两年的6月土壤湿度异常明显偏离其他年份,导致40年的6月次表层土壤湿度与7月高温日数呈现较强相关(图3d)。如果不考虑这两个年份,

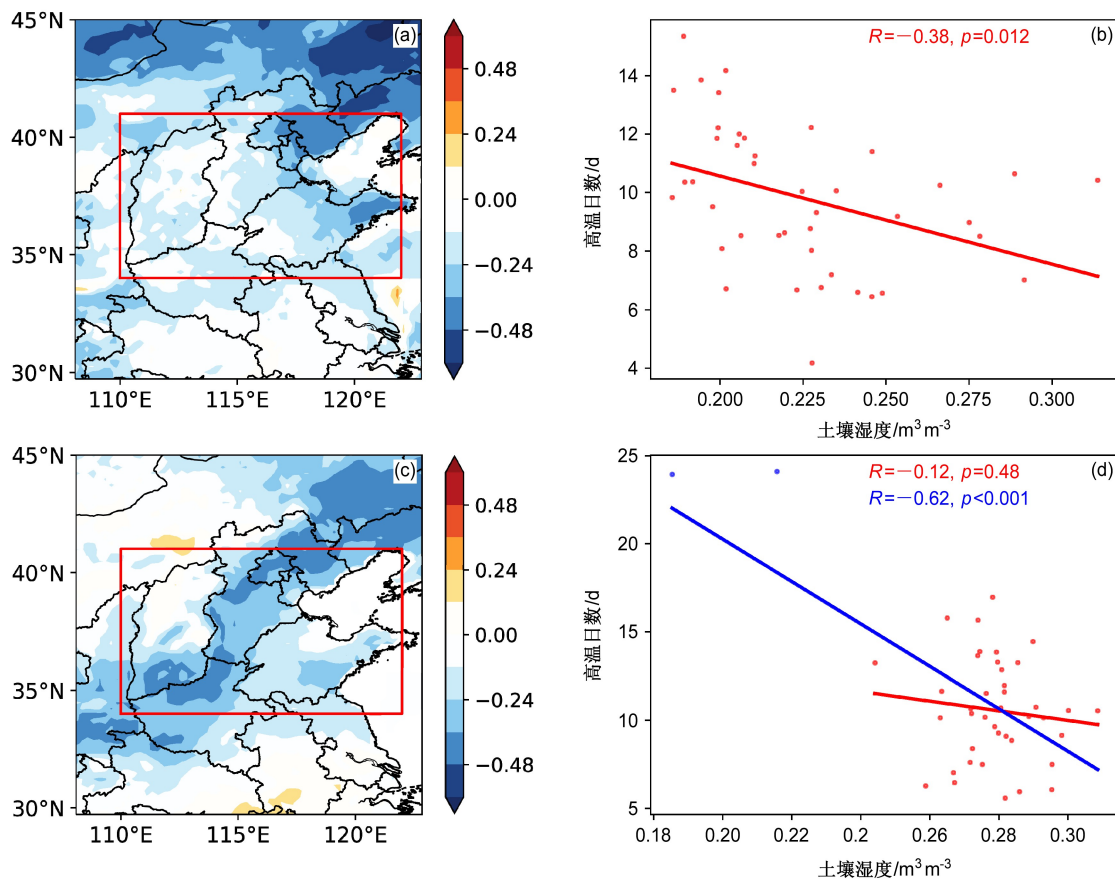


图3 1981~2020年(a、b)ERA5数据、(c、d)控制试验5月次表层(第二层)土壤湿度与夏季高温日数相关系数空间分布(左列)和华北地区(红框区域为本文定义的华北地区范围)区域平均的6月次表层土壤湿度与7月高温日数之间的关系(右列)。在40年的控制试验中,有两年的土壤湿度异常明显偏离其他年份,导致整体6月次表层土壤湿度与7月高温日数存在较强相关(蓝色拟合线及参数)。如果不考虑这两个年份,则两者的相关系数不再显著(红色拟合线及参数)。图3c不包含图3d中两个蓝色点年份数据

Fig. 3 Spatial distributions of the correlation between subsurface (second layer) soil moisture in May and the number of hot days in summer (left panel) and the relationship between Jun subsurface soil moisture and the number of hot days in Jul averaged over North China (red boxed shows the North China region defined in this study) (right panel) from (a, b) ERA5 data and (c, d) control experiment during 1981–2020. In two of the 40 years of the control experiment, the soil moisture anomaly deviates significantly from the other years, resulting in a strong correlation between the Jun subsurface soil moisture and the number of hot days in Jul (blue fitted line and parameters). If these two years are not considered, the correlation coefficient is no longer significant (red fitted line and parameters). The data of the two blue years in Fig. 3d are not included in Fig. 3c

则两者的相关系数不再显著。与再分析资料一样,在控制试验中一些6月土壤较干的年份,7月的高温日数依旧较低(图3d)。因此模式总体能够模拟出再分析资料中前期土壤湿度与高温的关系。模式中的两个土壤湿度异常偏强年(图3d中蓝色点)对本文研究结果和主要结论并没有显著影响,因此之后的研究依旧基于所有年份展开。

通过比较两组敏感性试验的结果发现,模式中7月初土壤湿度的异常确实可以持续较长时间,且次表层土壤湿度异常的持续能力强于表层(图4a和4b),与前人的研究结论一致。此外,两组敏感性试验土壤湿度异常主要体现在华北地区南部

(图4a),这与图3中前期土壤湿度与高温热浪关系较为不稳定的区域基本吻合。与传统观点一致,土壤湿度的负异常导致局地高温日数增加(图4c)。其主要过程是通过抑制地面蒸发,从而增强局地感热通量(图4d)并降低潜热通量(图4e),使得地面温度整体升高,有利于高温天气的产生。不仅如此,与欧洲地区土壤湿度—大气反馈特征一致(Fischer et al., 2007a, 2007b),局地土壤湿度的负异常还可以通过加热大气,使得对流层中层(500 hPa)产生高压异常并伴随下沉气流(图4f和4g)。下沉气流可以减少云量并增加到达地面的太阳辐射,进一步提升地面温度,形成土壤湿

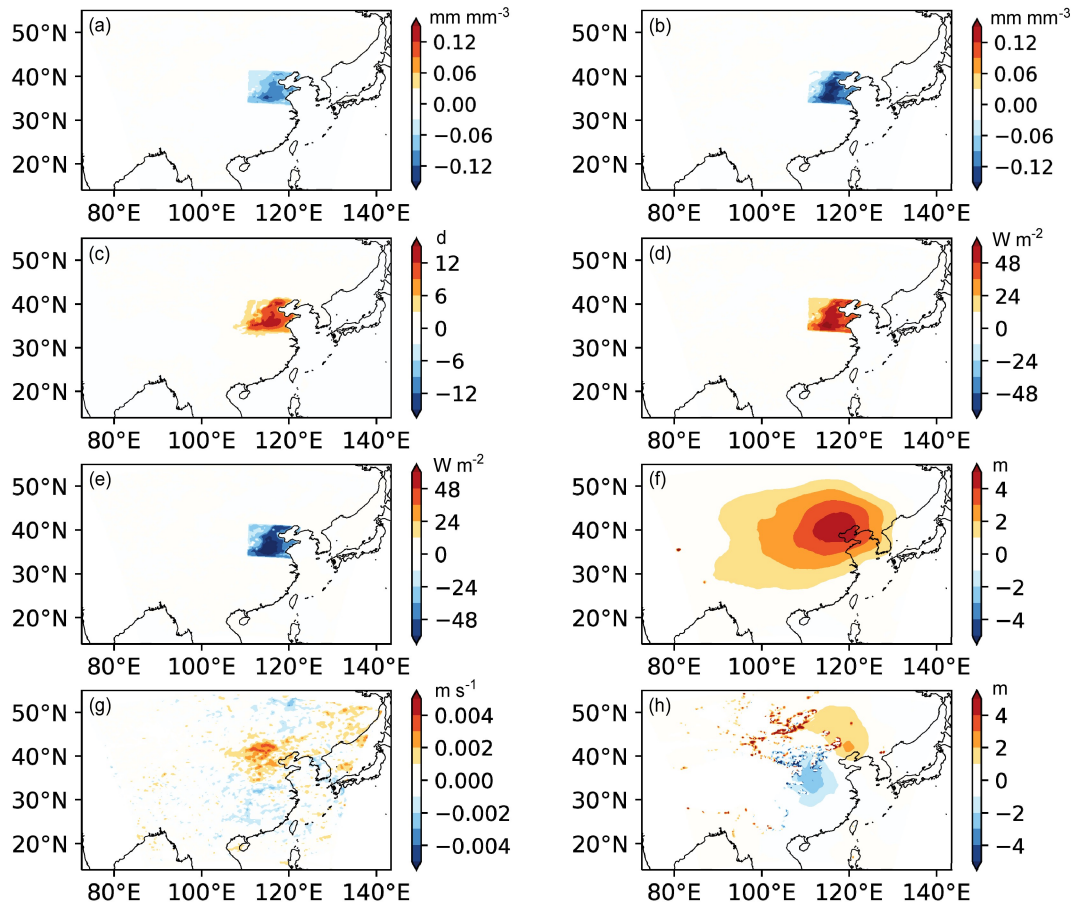


图4 (a) 土壤湿度负异常试验和土壤湿度正异常试验的表层7月平均土壤湿度差异的空间分布;(b-h)同(a),但分别为(b)次表层(第二层)土壤湿度、(c)高温日数、(d)感热通量、(e)潜热通量、(f)500 hPa位势高度场、(g)500 hPa垂直速度场、(h)850 hPa位势高度场

Fig. 4 (a) Differences of the soil moisture in the surface layer in Jul between the negative soil moisture anomaly experiment and positive soil moisture anomaly experiment, (b-h) as in (a), but the variables are (b) subsurface (the second layer) soil moisture, (c) number of hot days, (d) sensible heat flux, (e) latent heat flux, (f) 500-hPa geopotential height field, (g) 500-hPa vertical velocity field, and (h) 850-hPa geopotential height field, respectively

度—大气之间的正反馈机制。相比于对流层中层,土壤湿度异常在对流层低层(850 hPa)造成的局地环流异常相对较弱(图4h)。

### 3.2 土壤湿度异常对高温的不同影响

按照土壤异常所引起的高温日数变化幅度,将40年分为高异常年(20年)和低异常年(20年)。首先计算土壤湿度负异常试验和土壤湿度正异常试验华北地区7月高温日数区域平均的差值,然后根据此差值将40年排序并分成两组。通过比较高异常年和低异常年各变量场特征,确定影响前期土壤湿度和高温之间关系的主要过程。

图5a给出了高异常年和低异常年7月高温日数的差异,可以看出两组年份的高温日数差异主要出现在华北地区南部。高异常年份偏多的高温日数与其偏干的土壤湿度异常有关(图5b),说明在

高异常年份土壤湿度的干异常持续时间更长。图6a展示了高异常年份和低异常年份华北地区区域平均的土壤湿度变化,可以看出初始时刻两组年份的土壤湿度异常基本相同,但在第三天以后,高异常年土壤湿度明显低于低异常年,这种差异一直保持到第20天才逐渐缩小。土壤湿度差异主要与降水有关,高异常年7月降水明显少于低异常年(图5c),并且这种差异从7月第三天开始就有所体现,并基本可以延续到7月底(图6b)。土壤湿度的异常可以通过调节局地水循环过程从而影响局地降水,但由于高异常年和低异常年初始时刻土壤湿度异常相同,因此造成两者差异的主要原因并不是土壤湿度的影响。

### 3.3 环流对土壤湿度与高温关系的调控

高异常年华北地区南部偏少的降水和偏干的土

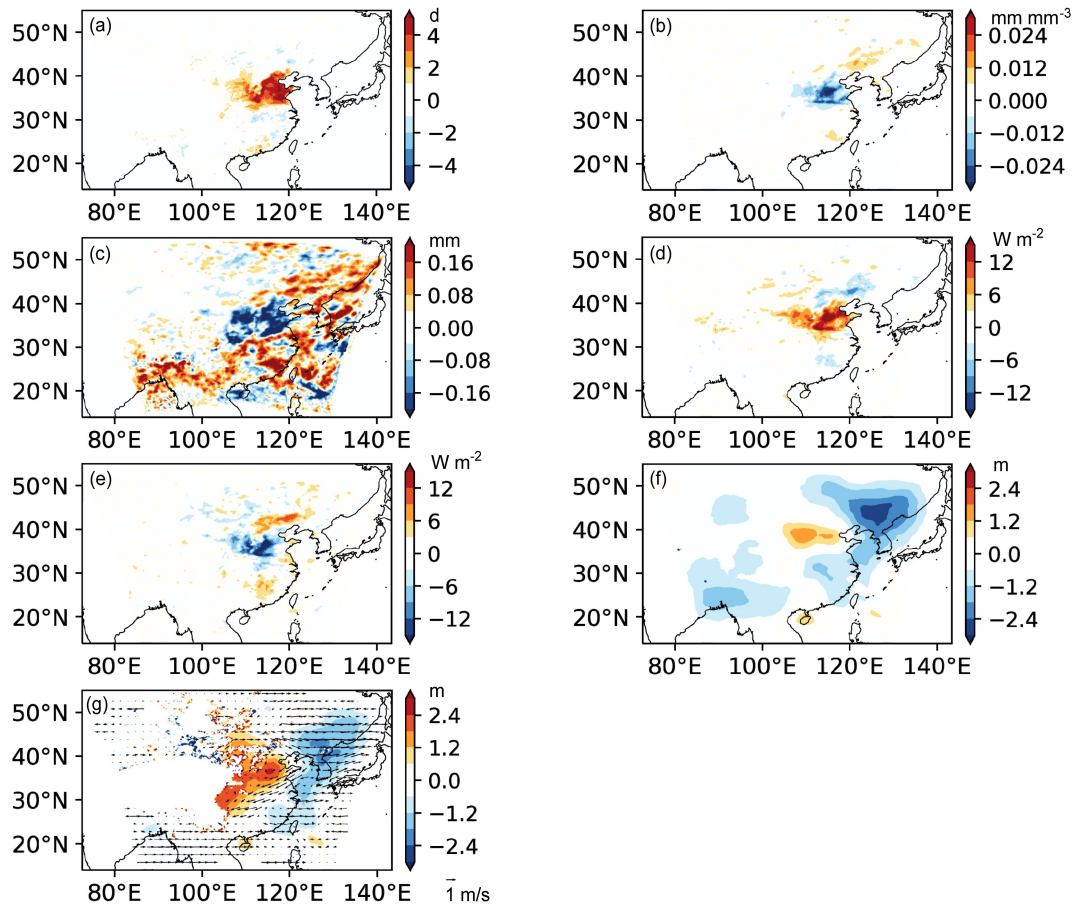


图5 敏感性试验中高异常年和低异常年7月 (a) 高温日数、(b) 次表层土壤湿度、(c) 降水量、(d) 感热通量、(e) 潜热通量、(f) 500 hPa 位势高度场、(g) 850 hPa 位势高度场和风场差异的空间分布

Fig. 5 Differences between high and low anomaly years of the sensitivity experiments in the (a) number of hot days, (b) subsurface soil moisture, (c) precipitation, (d) sensible heat flux, (e) latent heat flux, (f) 500-hPa geopotential height field, (g) 850-hPa geopotential height field, and wind field

壤导致感热通量偏高而潜热通量偏低 (图 5d 和 5h)。感热通量和潜热通量异常的演变基本与土壤湿度异常的演变特征一致 (图 6c 和 6d)。进一步比较高异常年和低异常年的对流层中层环流场, 发现两组年份 500 hPa 位势高度场的差异主要表现在华北地区西部和东北地区, 在本文重点关注的华北地区南部环流场的差异较小 (图 5f)。相反, 两组年份对流层低层环流场的差异在华北地区中部和南部更为明显。与高异常年相比, 低异常年份华北地区中部和南部 850 hPa 存在低压异常, 并伴随较强 (西进) 的西太平洋副热带高压 (西太副高), 两者共同导致华北南部盛行南风气流 (图 5g)。西太副高是影响我国东部夏季降水的主要系统。当其异常偏强时, 西边界可以延伸至我国东部地区并通过西侧的南风将热带海洋湿润的空气向北输送。湿润的南风 and 北部干冷空气相遇有利于降水的形成

(Yang et al., 2022)。低异常年份对应的偏强西太副高有利于局地降水增加, 不利于土壤湿度干异常的持续, 因此导致土壤湿度干异常对高温的贡献较弱。图 5f 也同样体现了对流层中层西太副高的差异。

值得注意的是, 土壤湿度异常所引起的局地环流异常主要体现在对流层中层 (图 4f), 而在对流层低层的影响很弱 (图 4h)。因此高异常年和低异常年所对应的对流层低层环流异常并不是由于土壤湿度的异常引起的。这一点可以通过比较控制试验的结果进行验证。图 7a 展示了控制试验中高异常年和低异常年 7 月 850 hPa 位势高度场和风场差异的空间分布。可以看出在不考虑土壤湿度异常的情况下, 相比于高异常年, 控制试验中低异常年的环流场同样表现出偏强的西太副高, 华北地区中部和南部的低压异常以及盛行南风气流 (图 7a),

与图 5g 基本一致。利用 ERA5 数据进行同样的比较, 也可以得到一样的结果 (图 7c)。控制试验和 ERA5 资料中并没有如敏感性试验中的土壤湿度

异常, 因此可以判定高异常年和低异常年对流层低层环流场的异常并不是由土壤湿度异常引起。进一步比较再分析资料中高异常年和低异常年 7 月海温

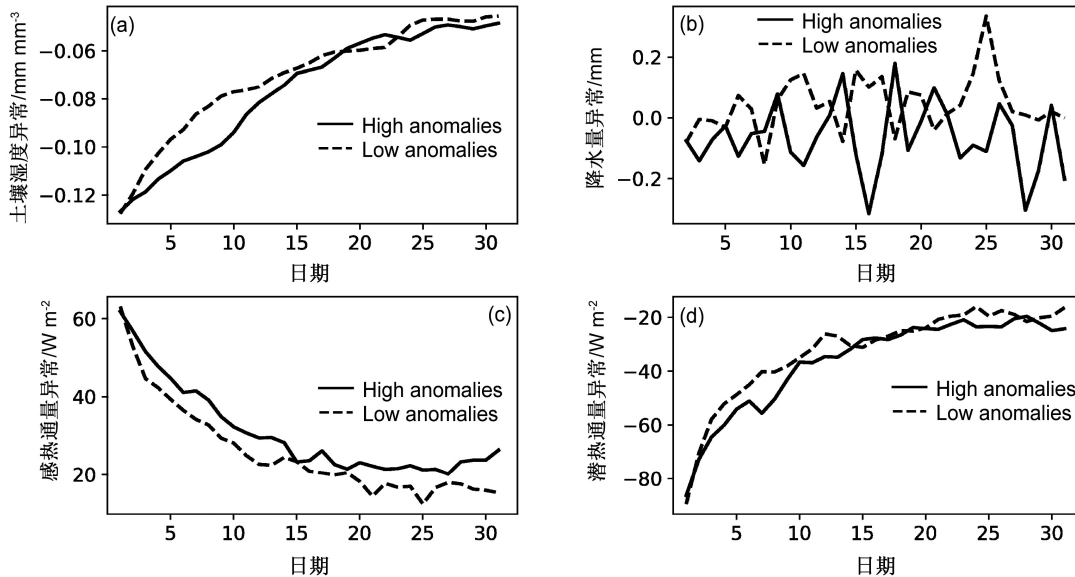


图 6 敏感性试验中高异常年和低异常年华北地区区域平均的 7 月 (a) 次表层土壤湿度异常、(b) 降水量异常、(c) 感热通量异常、(d) 潜热通量异常随时间的变化

Fig. 6 Variations of (a) subsurface soil moisture anomalies, (b) precipitation anomalies, (c) sensible heat flux anomalies, and (d) latent heat flux anomalies in Jul for the high and low anomaly years averaged over North China in the sensitivity experiments

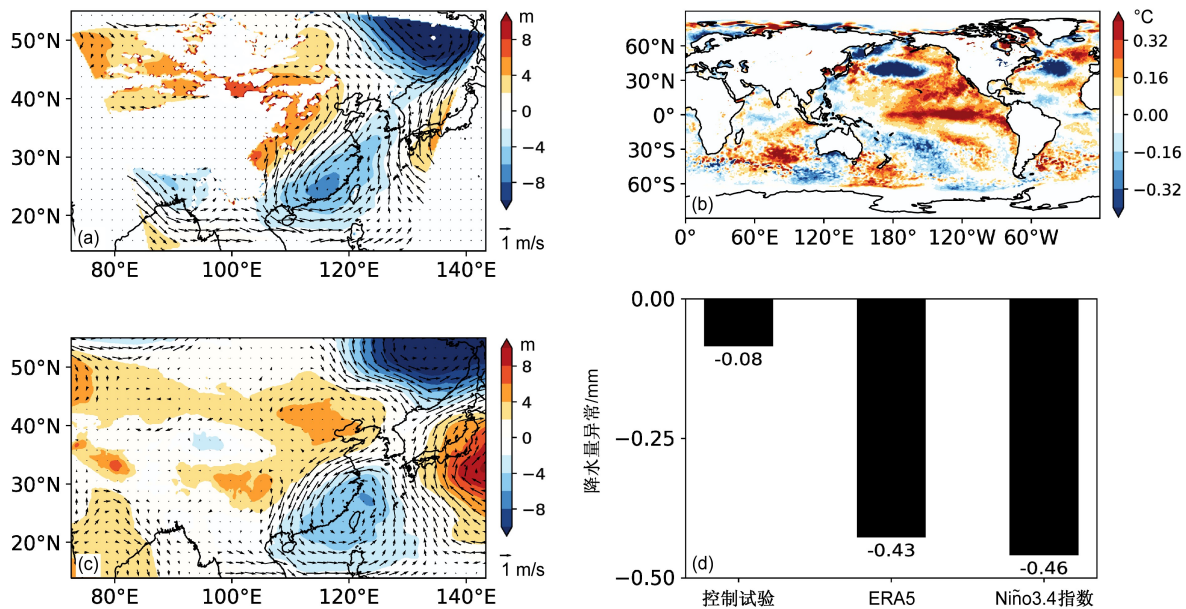


图 7 (a) 控制试验、(c) ERA5 资料高异常年和低异常年 7 月 850 hPa 位势高度场和风场差异的空间分布; (b) ERA5 资料中高异常年和低异常年 7 月海温差异的空间分布; (d) 控制试验和 ERA5 资料中高异常年和低异常年华北地区区域平均的 7 月降水量差值及根据 Niño3.4 指数判定的热带中东太平洋海温暖异常年和冷异常年华北地区区域平均的 7 月降水量差值

Fig. 7 Spatial distributions of the difference between the 850-hPa geopotential height field and wind field in Jul in the high and low anomaly years from (a) the control experiment and (c) the ERA5 data; (b) Spatial distribution of the difference between the SST anomalies in Jul in the high and low anomaly years in the ERA5 data; (d) Regional averaged North China July precipitation differences between the high and low anomaly years in the control experiment and ERA5 data, and differences of the regional averaged Jul precipitation in North China between tropical east-central Pacific SST warm anomaly years and cold anomaly years defined based on Niño3.4 index

异常,发现高异常年对应热带中东太平洋地区暖海温异常(也就是 El Niño),而低异常年对应热带中东太平洋地区冷海温异常,也就是 La Niña 现象(图 7b)。前人的研究指出夏季热带中东太平洋 La Niña 现象可以抑制局地对流,有利于西太副高西伸(Yang et al., 2022),这与图 7a 和图 7c 的结果一致。

另外需要确定的是引起图 5c 中高异常年和低异常年降水量差异的原因是环流系统异常还是土壤湿度异常。通过比较控制试验中高异常年和低异常年华北地区区域平均降水量差异,发现在不考虑土壤湿度异常影响的情况下,高异常年华北地区降水依旧偏少(图 7d)。这一现象同样出现在 ERA5 资料中(图 7d)。这说明两组年份华北地区降水异常并不是由于土壤湿度的异常造成的。以常用的 Niño3.4 指数[定义为(5°S~5°N, 170°W~120°W)区域的海温异常]表征热带中东太平洋地区海温异常,发现当热带中东太平洋地区处于 El Niño 位相(暖位相)时,华北地区降水相对偏少(图 7d),进一步说明热带中东太平洋海温暖异常可以通过削弱西太副高强度,进而减少华北地区暖湿南风气流并减少当地降水,有利于华北地区初期土壤湿度干异常的持续并驱动高温天气的产生。

## 4 总结和讨论

我国华北地区是陆气相互作用较强的区域,其高温热浪的形成受到土壤湿度等陆面变量的影响。土壤湿度的记忆能力为华北地区高温热浪的季节预测提供了潜在的预报因子。然而,华北地区前期土壤湿度与夏季高温之间的关系并不稳定,主要是受到来自对流层低层环流条件的影响。基于统计分析和 WRF 模式敏感性试验,本文指出热带中东太平洋海温可以通过影响西太副高强度进而调节华北地区降水,最终影响华北地区前期土壤湿度与夏季高温之间的关系。当热带中东太平洋海温处于冷位相(La Niña)时,夏季西太副高强度较强,其西侧南风气流为华北地区南部输送大量水汽并造成该区域降水增加,不利于前期华北地区土壤湿度干异常的维持,削弱了土壤湿度干异常对高温的贡献。相反,当热带中东太平洋海温处于暖位相时,西太副高强度较弱,华北地区降水减少并在对流层低层形成高压异常,使得土壤湿度干异常得以维持并造成

较强的高温热浪。此类情况下前期土壤湿度异常可以作为高温热浪的预测信号。本文的研究结果表明局地陆气相互作用及陆面变量的记忆能力会受到来自海气过程主导的环流背景的调控,因此在进行极端气候事件的季节预测时,需要考虑海陆气系统的协同作用。

需要注意的是,本文的研究也存在一些不足。虽然 WRF 模式能够较为准确的描述出东亚地区夏季气候特征,并模拟出华北地区土壤湿度与高温之间的关系,然而本文的结果依旧有可能受到模式偏差的影响。考虑到华北地区夏季高温热浪主要发生在 7 月,因此本文主要进行了针对 7 月高温热浪的敏感性试验,结论是否适用于 6 月和 8 月还需要进一步研究验证。本文仅重点讨论了土壤湿度干异常对增强高温热浪的贡献,而没有讨论土壤湿度干湿异常对高温热浪贡献的不对称性,前人的研究提出土壤湿度干湿异常的持续性可能存在不对称性,这也可能影响土壤湿度与高温之间的关系。此外,本文重点关注了热带海温对华北地区环流条件的影响。前人的研究提出华北地区夏季环流和高温热浪与中纬度多种环流模态,如丝绸之路遥相关型等也有紧密联系,后续研究应关注除热带海温以外的其他因素对华北地区土壤湿度—高温热浪关系的影响。

## 参考文献 (References)

- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(4): 569–585. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2
- Chen H S, Yu B, Zhou B T, et al. 2020. Role of local atmospheric forcing and land–atmosphere interaction in recent land surface warming in the midlatitudes over East Asia [J]. *J. Climate*, 33(6): 2295–2309. doi:10.1175/JCLI-D-18-0856.1
- 陈海山, 周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 II. 敏感性试验分析 [J]. *大气科学*, 37(1): 1–13.
- Chen Haishan, Zhou Jing. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part II: Sensitivity experiment analysis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(1): 1–13. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11048
- Chen Y, Zhai P M, Zhou B Q. 2018. Detectable impacts of the past half-degree global warming on summertime hot extremes in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(14): 7130–7139. doi:10.1029/2018GL079216
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2006. The formulation and

- atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3) [J]. *J. Climate*, 19(11): 2144–2161. doi:10.1175/JCLI3760.1
- Deng K Q, Yang S, Ting M, et al. 2019. Dominant modes of China summer heat waves driven by global sea surface temperature and atmospheric internal variability [J]. *J. Climate*, 32(12): 3761–3775. doi:10.1175/JCLI-D-18-0256.1
- Ding T, Qian W H, Yan Z W. 2010. Changes in hot days and heat waves in China during 1961–2007 [J]. *Int. J. Climatol.*, 30(10): 1452–1462. doi:10.1002/joc.1989
- Fischer E M, Seneviratne S I, Lüthi D, et al. 2007a. Contribution of land–atmosphere coupling to recent European summer heat waves [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(6): L06707. doi:10.1029/2006GL029068
- Fischer E M, Seneviratne S I, Vidale P L, et al. 2007b. Soil moisture–Atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave [J]. *J. Climate*, 20(20): 5081–5099. doi:10.1175/JCLI4288.1
- 郭维栋, 马柱国, 王会军. 2007. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨 [J]. *气候与环境研究*, 12(1): 20–28.
- Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. 2007. Soil moisture—An important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 12(1): 20–28. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.01.003
- Hong S Y, Kim J H, Lim J O, et al. 2006a. The WRF single moment microphysics scheme (WSM) [J]. *J. Korean Meteor. Soc.*, 42: 129–151.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006b. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- Johnson N C, Xie S P, Kosaka Y, et al. 2018. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown [J]. *Nat. Commun.*, 9(1): 1724. doi:10.1038/s41467-018-04040-y
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(1): 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2
- Koster R D, Chang Y H, Schubert S D. 2014. A mechanism for land–atmosphere feedback involving planetary wave structures [J]. *J. Climate*, 27(24): 9290–9301. doi:10.1175/JCLI-D-14-00315.1
- Li Y, Ding Y H, Li W J. 2017. Observed trends in various aspects of compound heat waves across China from 1961 to 2015 [J]. *J. Meteor. Res.*, 31(3): 455–467. doi:10.1007/s13351-017-6150-2
- Liu D, Wang G L, Mei R, et al. 2014. Impact of initial soil moisture anomalies on climate mean and extremes over Asia [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(2): 529–545. doi:10.1002/2013JD020890
- Meng L, Shen Y J. 2014. On the relationship of soil moisture and extreme temperatures in East China [J]. *Earth Interact.*, 18(1): 1–20. doi:10.1175/2013EI000551.1
- Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(D12): D12109. doi:10.1029/2010JD015139
- Quesada B, Vautard R, Yiou P, et al. 2012. Asymmetric European summer heat predictability from wet and dry southern winters and springs [J]. *Nat. Climate Change*, 2(10): 736–741. doi:10.1038/nclimate1536
- Song Y M, Wang Z F, Qi L L, et al. 2019. Soil moisture memory and its effect on the surface water and heat fluxes on seasonal and interannual time scales [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(20): 10730–10741. doi:10.1029/2019JD030893
- Sun J Q. 2012. Possible impact of the summer North Atlantic oscillation on extreme hot events in China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5(3): 231–234. doi:10.1080/16742834.2012.11446996
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in eastern China [J]. *Nat. Climate Change*, 4(12): 1082–1085. doi:10.1038/nclimate2410
- Wang W W, Zhou W, Li X Z, et al. 2016. Synoptic-scale characteristics and atmospheric controls of summer heat waves in China [J]. *Climate Dyn.*, 46(9): 2923–2941. doi:10.1007/s00382-015-2741-8
- Wei J, Wang W G, Shao Q X, et al. 2020. Heat wave variations across China tied to global SST modes [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125(6): e2019JD031612. doi:10.1029/2019JD031612
- Wu L Y, Zhang J Y. 2015. The relationship between spring soil moisture and summer hot extremes over North China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(12): 1660–1668. doi:10.1007/s00376-015-5003-0
- Wu W R, Dickinson R E. 2004. Time scales of layered soil moisture memory in the context of land–atmosphere interaction [J]. *J. Climate*, 17(14): 2752–2764. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2752:TSOLSM>2.0.CO;2
- Wu X J, Wang L C, Yao R, et al. 2021. Identifying the dominant driving factors of heat waves in the North China Plain [J]. *Atmos. Res.*, 252: 105458. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105458
- Yang K, Zhang J Y, Wu L Y, et al. 2019. Prediction of summer hot extremes over the middle and lower reaches of the Yangtze River valley [J]. *Climate Dyn.*, 52(5): 2943–2957. doi:10.1007/s00382-018-4302-4
- Yang K, Cai W J, Huang G, et al. 2022. Increased variability of the western Pacific subtropical high under greenhouse warming [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 119(23): e2120335119. doi:10.1073/pnas.2120335119
- Yuan G H, Zhang L, Liu Y B. 2021. Impacts of soil moisture and atmospheric moisture transport on the precipitation in two typical regions of China [J]. *Atmos. Res.*, 247: 105151. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105151
- Zeng X M, Wang B, Zhang Y, et al. 2014. Sensitivity of high-temperature weather to initial soil moisture: A case study using the WRF model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(18): 9623–9639. doi:10.5194/acp-14-9623-2014
- Zhang G W, Zeng G, Li C, et al. 2020. Impact of PDO and AMO on

- interdecadal variability in extreme high temperatures in North China over the most recent 40-year period [J]. *Climate Dyn.*, 54(5): 3003–3020. doi:10.1007/s00382-020-05155-z
- Zhang J, Liu Z Y, Chen L. 2015. Reduced soil moisture contributes to more intense and more frequent heat waves in northern China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(9): 1197–1207. doi:10.1007/s00376-014-4175-3
- Zhang J Y, Dong W J. 2010. Soil moisture influence on summertime surface air temperature over East Asia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 100(1): 221–226. doi:10.1007/s00704-009-0236-4
- Zhang J Y, Wu L Y. 2011. Land–atmosphere coupling amplifies hot extremes over China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 56(31): 3328. doi:10.1007/s11434-011-4628-3
- Zhong S, Yang T, Qian Y, et al. 2018. Temporal and spatial variations of soil moisture–precipitation feedback in East China during the East Asian summer monsoon period: A sensitivity study [J]. *Atmos. Res.*, 213: 163–172. doi:10.1016/j.atmosres.2018.05.014
- Zhu S G, Qi Y J, Chen H S, et al. 2021. Distinct impacts of spring soil moisture over the Indo-China Peninsula on summer precipitation in the Yangtze River basin under different SST backgrounds [J]. *Climate Dyn.*, 56(5): 1895–1918. doi:10.1007/S00382-020-05567-X