

Characteristics of Dry/Wet Heat Wave and Related Air Pollution over the Yangtze River Delta in Summer

Yue Deng, Wenjun Qu*

Department of Marine Meteorology, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Email: dengyue010203@163.com, *quwj@ouc.edu.cn

Received: Mar. 25th, 2020; accepted: Apr. 9th, 2020; published: Apr. 16th, 2020

Abstract

The surface meteorology observation data (during 1973 to 2018), the ground air quality monitoring data (during 2015 to 2018) and the NCEP and ERA5 reanalysis data are used to analyze the atmospheric circulation and the spatial-temporal distribution of near-surface air pollution during the (dry/wet) heat wave (HW) events over the Yangtze River Delta (YRD) of China with composite and case analyses. The results show that: 1) the enlarged and intensified Western Pacific Subtropical High (WPSH) is conducive to the formation of HW. The regional heat wave days (HWD) over YRD are accompanied with an enlarged and intensified WPSH, which is more obvious during the regional dry heat wave days (DHWD). 2) The higher ozone level near surface is associated with hotter and drier weather conditions. The average ozone concentration during the HWD, DHWD, wet heat wave days (WHWD) and the whole summer are 89.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 91.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 86.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 76.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. During the DHWD, the WPSH center is located over the east part of YRD, and the stations to the east of the Taihu Lake are controlled by more stable weather conditions, associated with higher ozone and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations near surface than the stations to the west of the Taihu Lake. 3) During the two typical HW cases over YRD (in Jul. 2017 and Aug. 2018), the enlarged and intensified WPSH is associated with descending over a large area of YRD, the adiabatic and non-adiabatic heating of the atmosphere enhanced. More short-wave (solar) radiation reaches the surface during the dry HW case, with subsequently more upward long-wave radiation, sensible heat and latent heat flux which can heat the atmosphere near surface and result in HW. 4) Regarding ozone pollution during the two HW cases, the weather during the dry HW case is associated with hotter and drier air as well as smaller wind speed and more stable boundary layer, which provide more favorable conditions for ozone formation and pollutants accumulation over ground, thus more severe ozone pollution compared to the wet HW case.

Keywords

Dry and Wet Heat Wave, Composite Analysis, Ozone Pollution, Western Pacific Subtropical High, The Yangtze River Delta

*通讯作者。

长江三角洲夏季干/湿型热浪及其期间大气污染特征研究

邓悦, 屈文军*

中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系, 山东 青岛

Email: dengyue010203@163.com, *quwj@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020年3月25日; 录用日期: 2020年4月9日; 发布日期: 2020年4月16日

摘要

本文选用中国1973~2018年地面综合观测数据、2015~2018年地面空气质量监测站数据、美国国家环境预报中心和欧洲中期天气预报中心的再分析资料,从合成统计和个例分析两个角度分析长江三角洲(长三角)(干/湿)热浪期间的大气环流形势及近地面污染物浓度的时空分布,结果表明:1)西太平洋副热带高压(西太副高)偏西偏强有利于热浪天气的形成。长三角区域热浪日期间西太副高位置偏西、偏北,强度偏强,干热浪日表现更明显。2)高温干燥的气象背景促使近地面臭氧浓度升高。热浪日、干热浪日、湿热浪日和夏季平均的臭氧浓度分别为 $89.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $91.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $86.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $76.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。干热浪期间副高中心位于长三角东部上空,太湖以东站点天气形势稳定,近地面臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于太湖以西站点。3)2017年7月、2018年8月长三角两次热浪个例期间西太副高异常偏强且西伸明显,为长三角带来大范围的下沉运动,大气绝热与非绝热加热异常增强,干热浪中偏多的太阳短波辐射使地面获得更多能量,偏多的向上长波辐射和感热、潜热通量使近地面气温偏高而出现热浪天气。4)长三角两次热浪个例期间近地面均发生臭氧污染事件,干热浪期间天气形势稳定,低层风速很小,高温、干燥的稳定环流形势为地面臭氧的形成和污染物累积提供了有利条件,臭氧污染较湿热浪个例更严重。

关键词

干湿型热浪, 合成分析, 臭氧污染, 西太平洋副热带高压, 长江三角洲

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自2013年国务院以防治 $\text{PM}_{2.5}$ 为主颁布《大气污染防治行动计划》强力治理我国的大气污染以来,我国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著下降[1],但重点区域臭氧污染呈现加剧态势[2]。臭氧生成的主要机制——光化学反应中需要光作为催化剂,高浓度臭氧常出现在晴朗(辐射强)和小风(扩散弱)的天气条件下[3][4]。使用地面观测资料[5]、高空探测数据[6]进行分析以及对于几次典型热浪事件的数值模拟[7][8]都揭示近地面臭氧浓度与气温存在正相关关系,高温热浪期间的近地面臭氧浓度特征及时空变化值得关注和警惕。

影响我国夏季高温的主要环流系统是西太副高,强盛偏西的副高有利于中国东部高温天气的形成与维持[9]。南亚和东亚热带季风区异常强的对流运动,使得南亚高压偏东、偏强、西太副高偏西、偏北、偏强[10];异常增强的西太副高控制下的大范围下沉运动增强大气绝热加热,异常增强的西北太平洋反气旋环流使得当

地水汽含量因输出而减少, 从而使得非绝热加热增强, 到达地面的太阳短波辐射增加, 地面气温升高[11]。

热浪时段干燥、高温、稳定的天气是促发臭氧污染的有利条件。常炉予[12]对上海市臭氧污染的大气环流形势进行客观分型研究, 发现促发臭氧污染的环流形势与副高有关, 副高控制条件下臭氧浓度的超标率为 68%。目前国内对臭氧污染和局地气象要素的研究局限在分析某城市臭氧浓度与局地气象要素的关系上, 缺乏基于天气学特征、大气环流配置对臭氧污染的深入分析。本研究重点关注长三角夏季干/湿型热浪的臭氧污染特征, 使用合成统计与个例分析结合的方法, 基于天气学特征、大气环流配置和热力状况, 比较长三角夏季(干/湿)热浪与平均状态下环流形势及近地面臭氧浓度的差异, 分析热浪成因以及热浪时段近地面大气污染严重的原因。

2. 数据和方法介绍

2.1. 数据来源与站点选取

1) 中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0), 本文使用此数据集中长三角区域 23 个地面气象观测站点在 2017 和 2018 年两次热浪过程中的日最高气温、日平均相对湿度、日平均风速等数据进行研究, 站点分布如图 1a 所示。

2) 美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的 1973~2018 年每日八个标准时次(即 UTC 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 和 21 时)中国地面综合观测数据, 本文使用此数据集中长三角区域 20 个站点 1973~2018 年夏季(取 6~8 月, 下同)的气温和相对湿度进行(干/湿)热浪日的选取与合成, 站点分布如图 1b 所示。

3) 中国环境监测总站提供的 2015~2018 年长三角地区 31 个地面空气质量监测站的逐小时空气质量数据, 主要使用臭氧、PM_{2.5} 的逐小时观测数据分析热浪过程中近地面污染物浓度的时空分布, 站点分布如图 1c 所示。

4) 美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的 1979~2018 年夏季位势高度场、风场、相对湿度场和旋度场的逐日再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 用于分析热浪过程的大气环流形势; 1980~2010 年气候态位势高度场再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 用于比较热浪过程大气环流形势与气候态的差异。

5) 欧洲中期天气预报中心(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA5 (The fifth generation ECMWF reanalysis for the global climate and weather), 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 用于诊断两次热浪个例的热力过程。

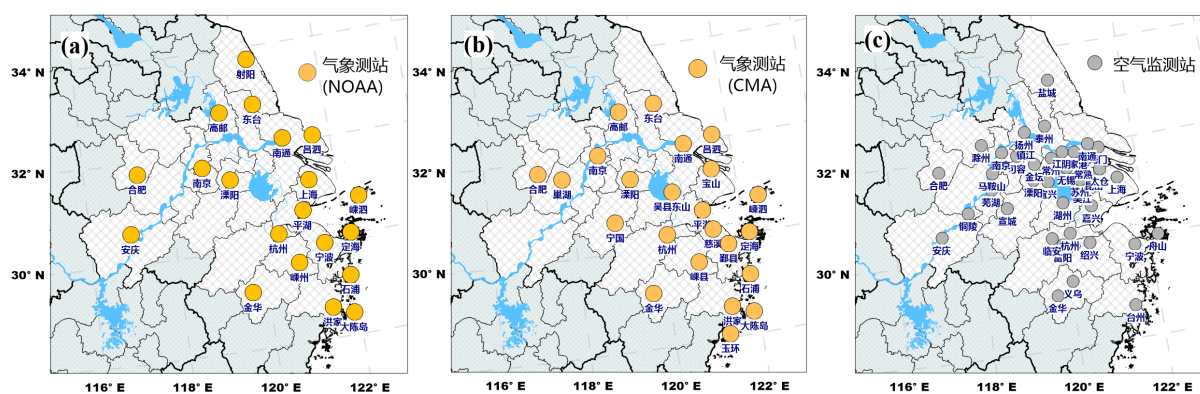


Figure 1. (a) Distribution of surface meteorological sites (data from NOAA); (b) distribution of surface meteorological sites (data from CMA) and (c) distribution of surface air monitoring sites over the YRD

图 1. (a) 长三角地面气象站点分布, 数据源自 NOAA; (b) 长三角地面气象站点分布, 数据源自 CMA; (c) 长三角地面空气监测站分布

2.2. 热浪天气的定义及分类

1) 高温日: 若某站某日最高气温高于 35°C, 则定义当日为该站点的高温日。

2) 单站热浪天气过程与热浪日: 若某站出现连续 3 日以上的高温日, 则将此段连续高温过程定义为热浪天气过程, 此过程持续期间为热浪日。若热浪日的日平均相对湿度小于 70%, 则定义当日为干热浪日, 反之则为湿热浪日。

3) 区域干/湿热浪日: 若某日长三角气象测站中有 5 个及以上站点为热浪日, 则定义该日为长三角区域热浪日。对于区域热浪日, 若当日区域内所有站点的日平均相对湿度平均值小于 70%, 则定义当日为区域干热浪日, 反之则为区域湿热浪日。

3. 长三角(干/湿)热浪日的大气环流特征及地面污染物浓度特征

3.1. 长三角(干/湿)热浪日及大气环流特征

按照 2.2 节的方法, 统计得到单站(干/湿)热浪日情况如图 2 所示, 图 2a~c 分别给出长三角采样率在 98% 以上的 15 个地面气象测站 1973~2018 年夏季的热浪日、干热浪日和湿热浪日的日数。长三角热浪日数最多的城市是安庆(950 天), 其次是金华(741 天)和上海(508 天), 其余城市的热浪日数在 500 天以下; 干热浪日天数排位前三的城市为安庆(629 天)、金华(546 天)和定海(393 天); 湿热浪日天数排位前三的城市为安庆(321 天)、合肥(267 天)和南京(250 天)。平湖、定海和金华的干热浪日占比较高, 分别为 100%、93% 和 74%; 石浦、射阳和宁波的湿热浪日占比较高, 分别为 100%、94% 和 87%。大部分沿海城市站点热浪日数少于内陆城市, 可能与这两类站点的海陆热力性质差异有关, 海水较高的比热容使得沿海地区白天比内陆地区升温慢, 夜晚降温少, 且沿海地区近地面午间受海风影响, 有冷平流输送, 所以沿海地区在正午时的最高温度比内陆低, 出现热浪天气的次数比邻近的内陆城市少。

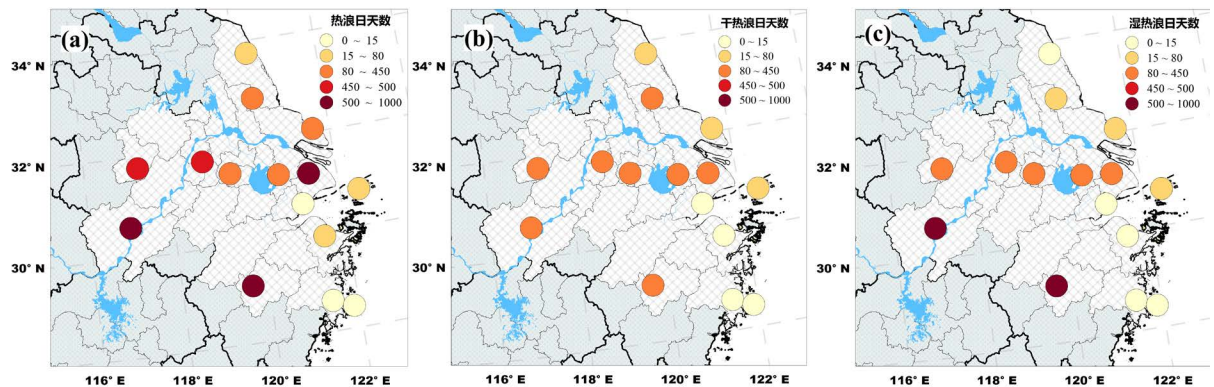


Figure 2. (a) Heat wave day number; (b) Dry heat wave day number and (c) Wet heat wave day number over the YRD during the summer from 1973 to 2018 (unit: day)

图 2. 1973~2018 年夏季长三角。(a) 热浪日天数; (b) 干热浪日天数; (c) 湿热浪日天数(单位: 天)

长三角区域热浪日西太副高位置偏西, 强度偏强, 其中干热浪日此特点更显著。1973~2018 年夏季长三角共出现区域热浪日 445 天, 其中 310 天为区域干热浪日, 135 天为区域湿热浪日。分别合成区域热浪日、区域干热浪日和区域湿热浪日三种情况下的位势高度场(图 3)和地面污染物浓度场(图 4、图 5), 并与夏季平均情况进行比较。长三角热浪日期间西太副高位置偏西偏北, 强度偏强。将 500 hPa 位势高度上 5880 gpm 包围的高值区看作西太副高控制区, 1973~2018 年夏季 500 hPa 平均位势高度场上西太副高中心并未在 110°E~130°E, 20°N~40°N 范围内出现, 长三角上空 500 hPa 平均位势高度为 5850 gpm。长三角热浪日期间西太副高控制着中国东南部, 平均西伸脊点位置达到 112.5°E, 平均北界位于 33.5°N, 平

均高值中心位于长三角东部东海海域, 中心值超过 5895 gpm。与长三角热浪日的平均位势高度相比, 长三角干热浪日期间西太副高更强, 中心强度与长三角热浪日同为 5895 gpm 但中心范围更大, 平均西伸脊点位置为 112°E, 平均北界位置为 34°N, 分别较长三角热浪日偏西 0.5°和偏北 0.5°; 而长三角湿热浪日期间西太副高相对较弱, 平均西伸脊点位置为 113°E, 平均北界位置为 33°N, 分别较长三角热浪日偏东 0.5°和偏南 0.5°。

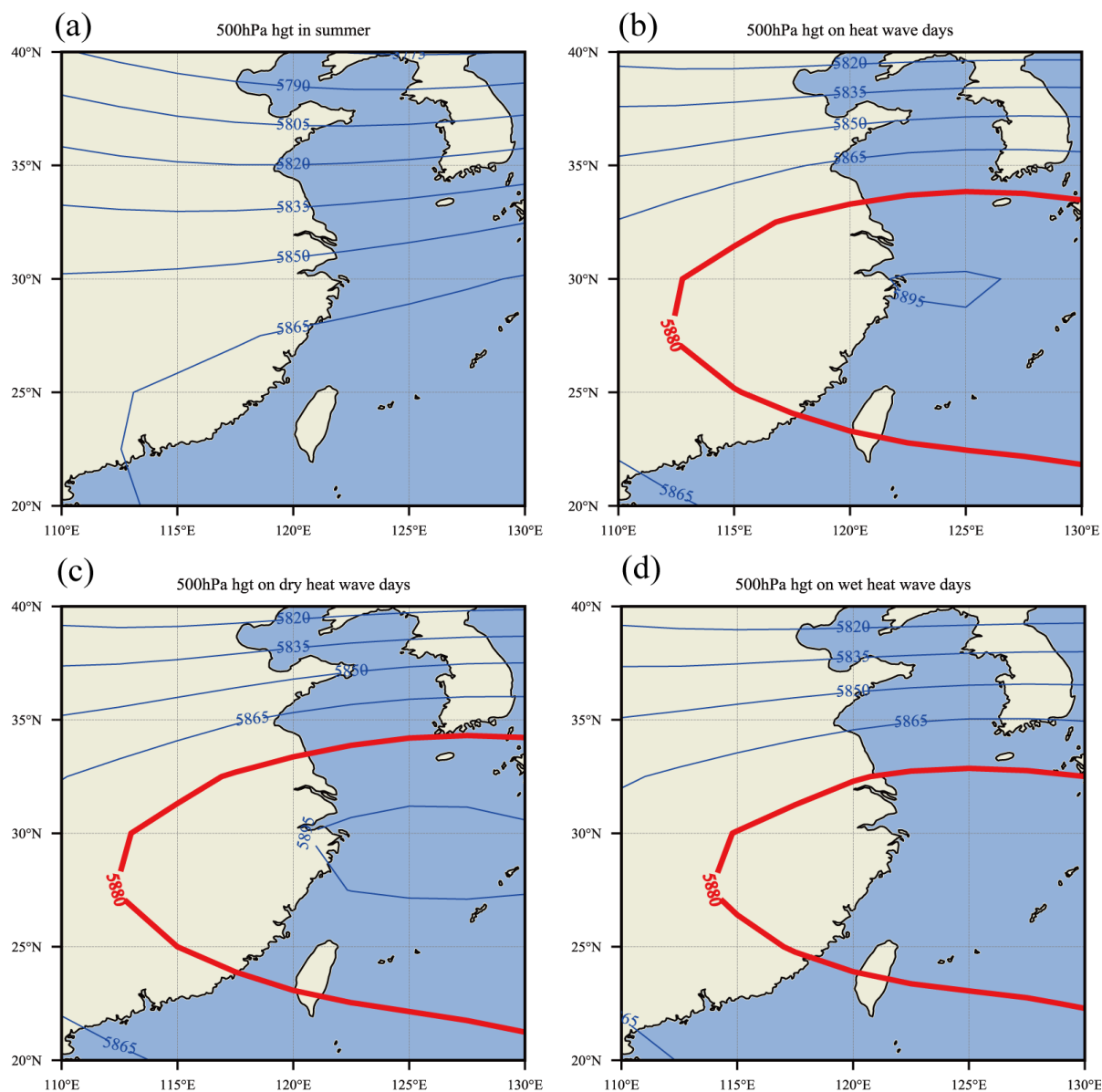


Figure 3. Average potential height of 500 hPa of (a) summer time; (b) heat wave days during summer over the YRD; (c) dry heat wave days during summer over the YRD; (d) wet heat wave days during summer over the YRD from 1973 to 2018 (unit: gpm)

图 3. 1973~2018 年 500 hPa 平均位势高度(a) 夏季; (b) 长三角夏季热浪日; (c) 长三角夏季干热浪日; (d) 长三角夏季湿热浪日(单位: gpm)

3.2. 长三角(干/湿)热浪日的地面污染物浓度特征

臭氧浓度高值受高温、干燥的气象条件驱动。对比 2015~2018 年长三角夏季平均与热浪日平均的地

面臭氧浓度分布能明显地发现热浪时段地面臭氧浓度水平较高(图 4a 与图 4b)。2015~2018 年长三角所有站点夏季地面臭氧平均浓度为 $76.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而热浪日的平均臭氧浓度为 $89.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中干热浪日浓度更高, 为 $91.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 湿热浪日则为 $86.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 高温干燥的气象背景是近地面臭氧浓度升高的有利条件, Zhao and Wang [13]、Lu et al. [14] 的研究也得到类似的结论。长三角干热浪日与湿热浪日臭氧浓度的空间分布有所差异(图 4c 与图 4d), 以太湖为界, 对于长三角干热浪日, 太湖以东的站点近地面臭氧浓度高于太湖以西的站点, 这可能与干热浪期间西太副高中心位于长三角东部(图 3c)有关, 此时长三角东部受副高控制, 天气形势稳定更利于污染物的累积。PM_{2.5} 在不同类型热浪时段的合成结果(图 5)也显示长三角热浪时段近地面 PM_{2.5} 浓度偏高, 长三角东部近地面 PM_{2.5} 浓度在干热浪时段偏高。

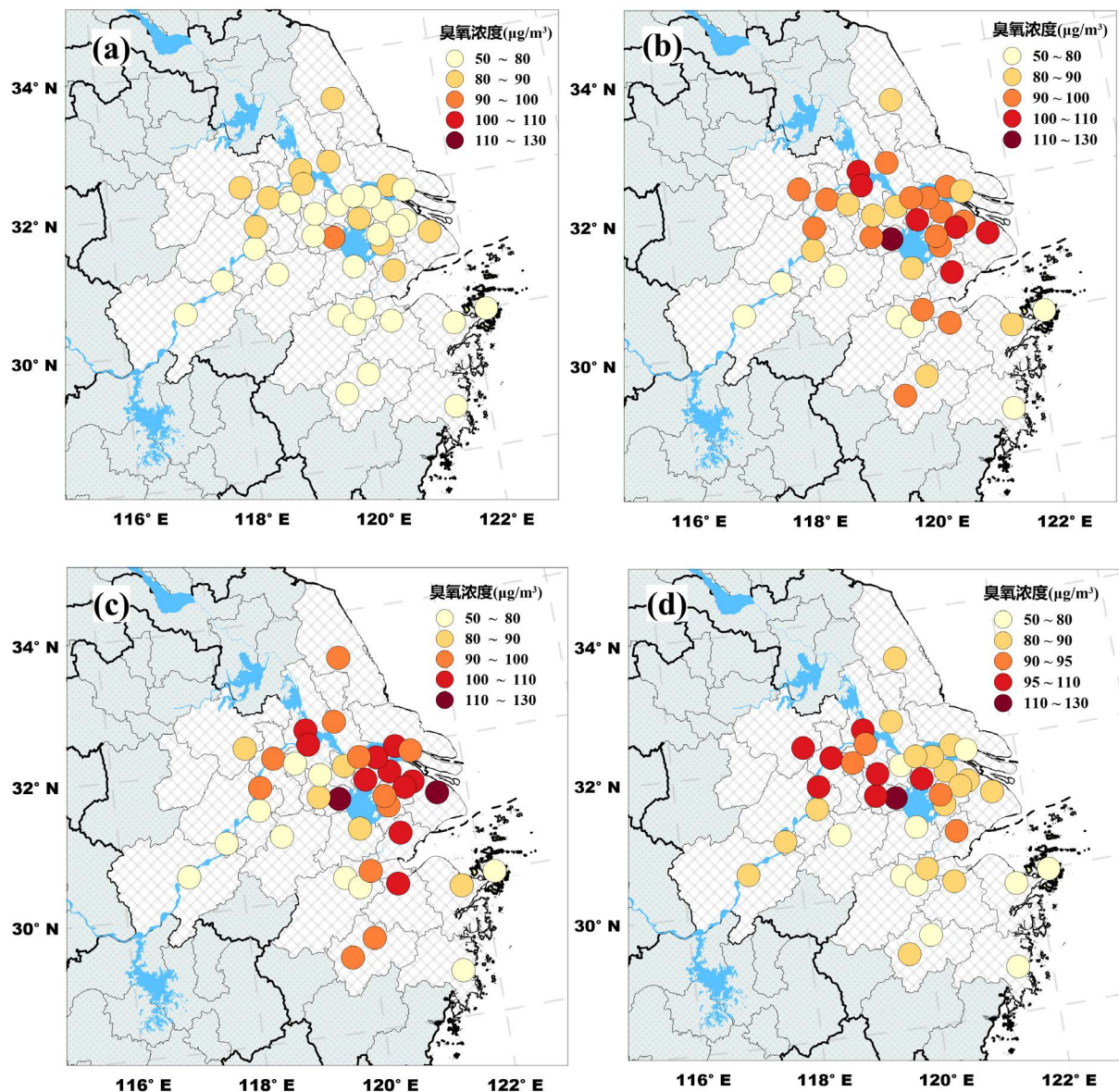


Figure 4. Average near-surface ozone concentration of (a) summer time (b) heat wave days during summer over the YRD (c) dry heat wave days during summer over the YRD (d) wet heat wave days during summer over the YRD from 2015 to 2018 (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

图 4. 2015~2018 年地面平均臭氧浓度(a) 夏季; (b) 长三角夏季热浪日; (c) 长三角夏季干热浪日; (d) 长三角夏季湿热浪日(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

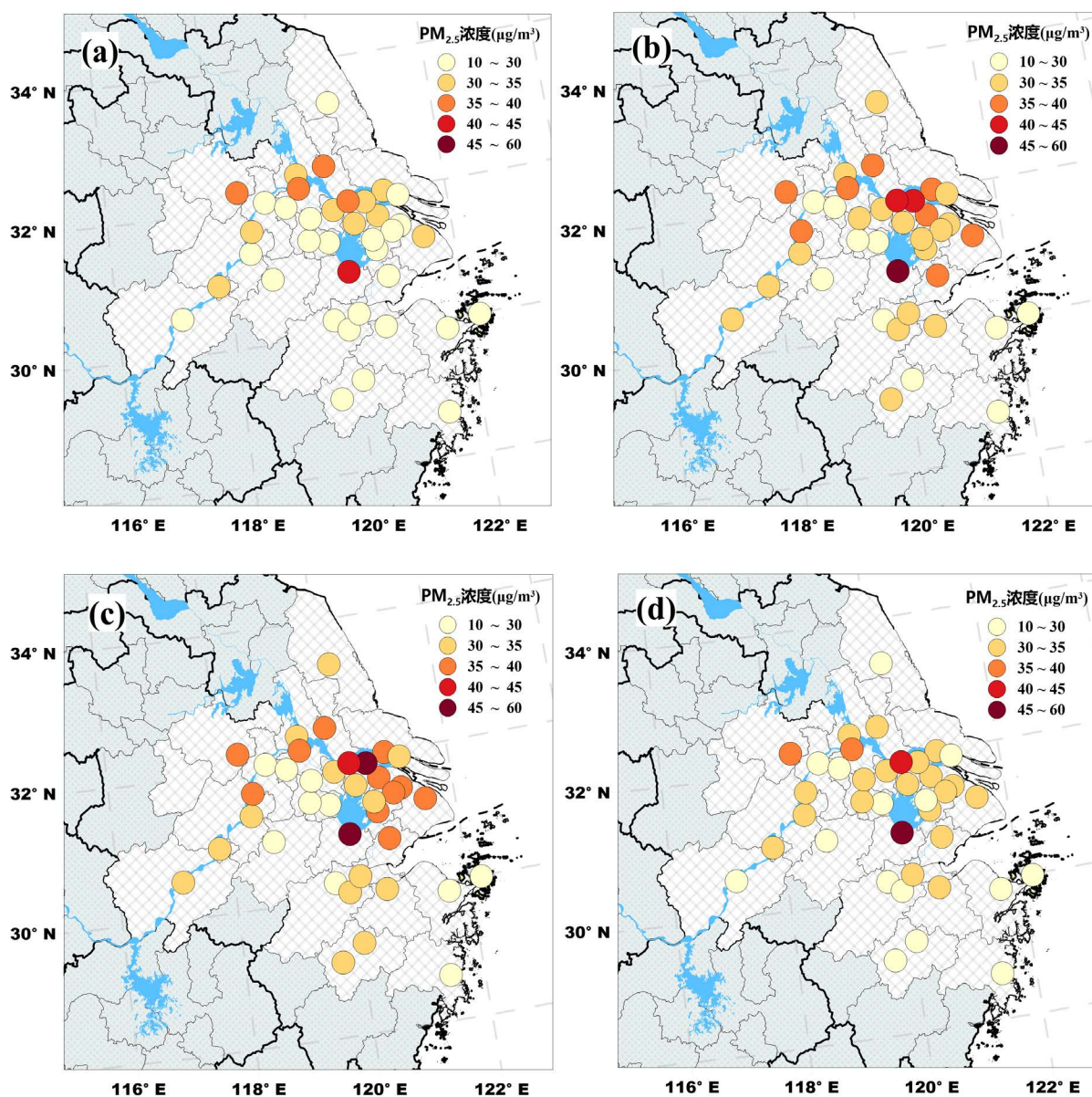


Figure 5. Average near-surface $PM_{2.5}$ concentration of (a) Summer time (b) heat wave days during summer over the YRD (c) dry heat wave days over the YRD during summer (d) wet heat wave days over the YRD during summer from 2015 to 2018 (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

图 5. 2015~2018 年地面平均 $PM_{2.5}$ 浓度 (a) 夏季; (b) 长三角夏季热浪日; (c) 长三角夏季干热浪日; (d) 长三角夏季湿热浪日 (单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4. 长三角两次热浪个例成因分析

挑选长三角地区干/湿热浪个例各一次, 其中干热浪过程为 2017 年 7 月 20 日至 7 月 26 日, 湿热浪过程为 2018 年 8 月 5 日至 8 月 11 日。

4.1. 动力分析

4.1.1. 南亚高压与西太副高

南亚高压作为青藏高原上空对流层上部和平流层底部一个强大而稳定的反气旋系统, 分布流型和西

太副高的进退关系密切, 当南亚高压东伸加强时副高西进, 当南亚高压西退时, 副高也相应东撤。

长三角干热浪个例期间 100 hPa 平均位势高度场及距平场(图 6a)表明, 南亚高压东部和西南部明显偏强, 面积偏大, 整体强度偏强, 正异常区域覆盖了中国东部 20°N~45°N 的大部分区域, 中心位于 30°N, 80°E, 较气候态的位置偏东。500 hPa 位势高度图及距平场(图 6b)显示西太副高中心位置位于中国东部上空, 中心强度为 590 gpm。副高脊线西伸至 105°E, 中国东部 20°N~40°N 范围都处在副高的控制之下, 120°E 的脊线位置稳定在 30°N 左右。此次干热浪过程中西太副高位置相较于常年 1) 偏西: 西伸脊点较 30 年气候态(1980~2010 年, 数据来自 NCEP, 下同)位置(140°E)偏西 35°; 2) 偏北: 副高北界较 30 年气候态位置(30°N)偏北 10°; 3) 强度偏强: 中国东部上空为正距平。

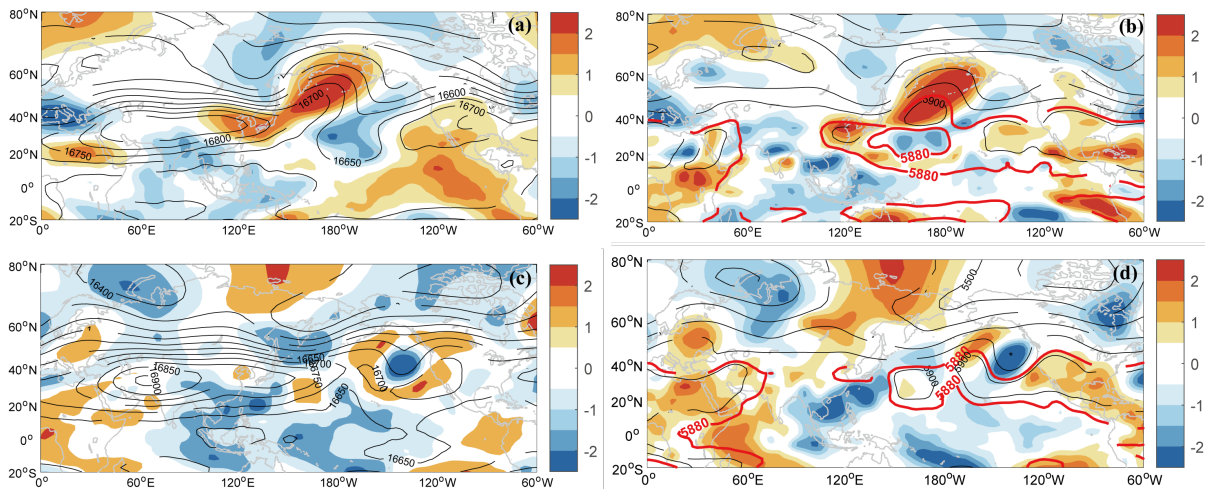
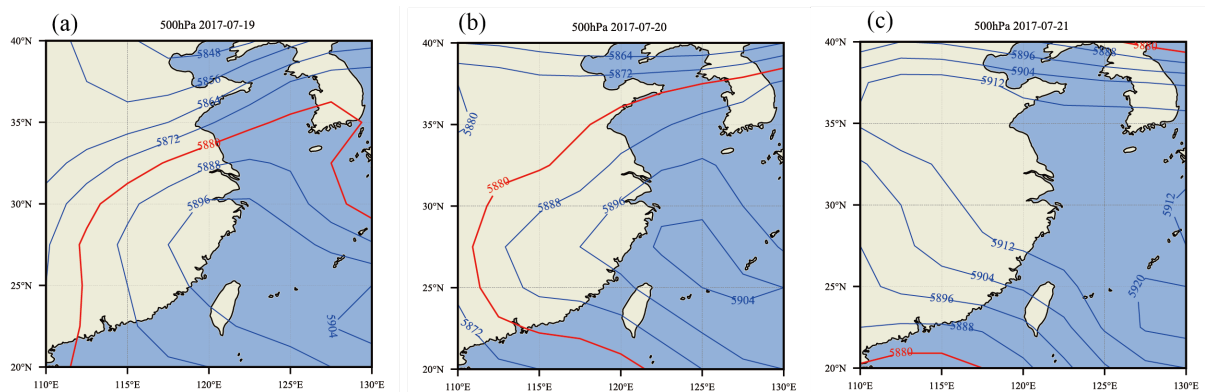


Figure 6. Average geopotential height and its anomaly in (a) DHW, 100 hPa (b) DHW, 500 hPa (c) WHW, 100 hPa (d) WHW, 500 hPa. The shade is the normalized anomaly (unit: gpm)

图 6. 平均位势高度及其异常(a) 干热浪个例, 100 hPa; (b) 干热浪个例, 500 hPa; (c) 湿热浪个例, 100 hPa; (d) 湿热浪个例, 500 hPa, 填色为归一化距平, 气候态取 1980~2010 年同期位势高度(单位: gpm)

从 2017 年 7 月 19 日至 7 月 27 日中国东部上空 500 hPa 位势高度变化图中(图 7)可以观察到西太副高向西移动并逐步控制中国东部的过程。以 500 hPa 位势高度上 588 gpm 包围的高值区作为西太副高控制区, 2017 年 7 月 20 日, 西太副高北至山东半岛南侧, 西至 110°E, 长三角已经处于西太副高控制区下; 7 月 21 日西太副高西伸, 中国东部大部分地区、韩国受到西太副高控制, 长三角上空 500 hPa 位势高度超过 5912 gpm; 7 月 22 日, 西太副高在黄淮和江淮存在一个的闭合高值中心, 中心值超过 5930 gpm, 此高值中心在之后的 4 天(2017 年 7 月 23 日至 27 日)在长三角一带维持, 此热浪期间长三角一直受西太副高影响。



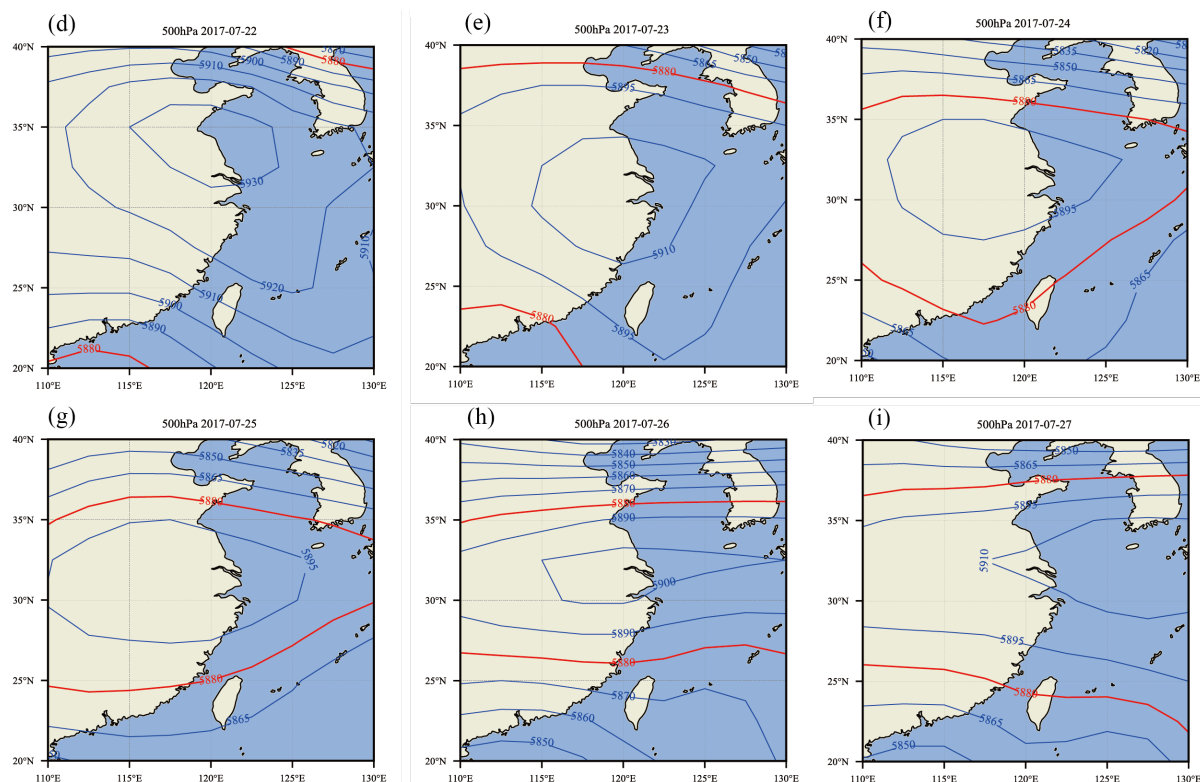


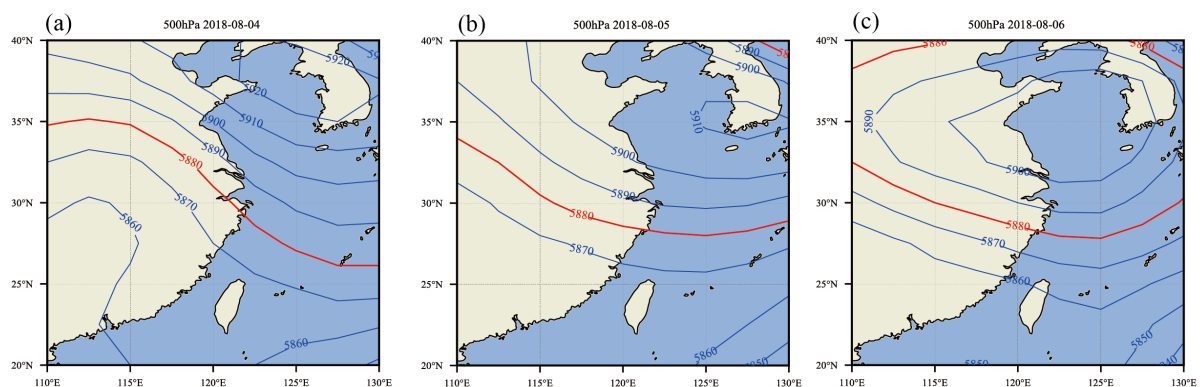
Figure 7. Average daily potential height of 500 hPa during Jul. 19, 2017 to Jul. 27, 2017 (unit: gpm)

图 7. 2017 年 7 月 19 日至 2017 年 7 月 27 日 500 hPa 日平均位势高度(单位: gpm)

长三角湿热浪个例期间南亚高压西部偏强, 东部偏弱, 负异常区域覆盖中国东部 20°N~40°N 的大部分区域, 高压中心控制着中国大部分地区(图 6c)。南亚高压偏东影响着西太副高偏西, 西太副高控制长江中下游地区(图 6d), 中心强度为 588 gpm, 此次湿热浪期间西太副高位置相较常年偏西且强度偏强。长三角上空为 500 hPa 位势高度为正距平区。

与干热浪个例相似, 此次湿热浪期间西太副高也有西伸加强的过程(图 8), 长三角区域受西太副高影响, 但此次西太副高的高值中心位于黄淮和江淮一带, 与干热浪个例相比位置偏北。

干热浪期间 850 hPa 日平均风场(图 9)表明中国东部上空低层流场存在一个反气旋环流。与西太副高相对应, 反气旋环流也有一个自东向西移动的过程, 2017 年 7 月 20 日至 7 月 21 日(图 9b~c), 长三角 850 hPa 受西南气流影响; 7 月 22 日至 24 日(图 9d~f), 随着反气旋向西移动, 长三角位于反气旋系统中心, 风速很小, 这样稳定的环流形势是热浪形成和维持以及近地面污染物累积的有利条件。



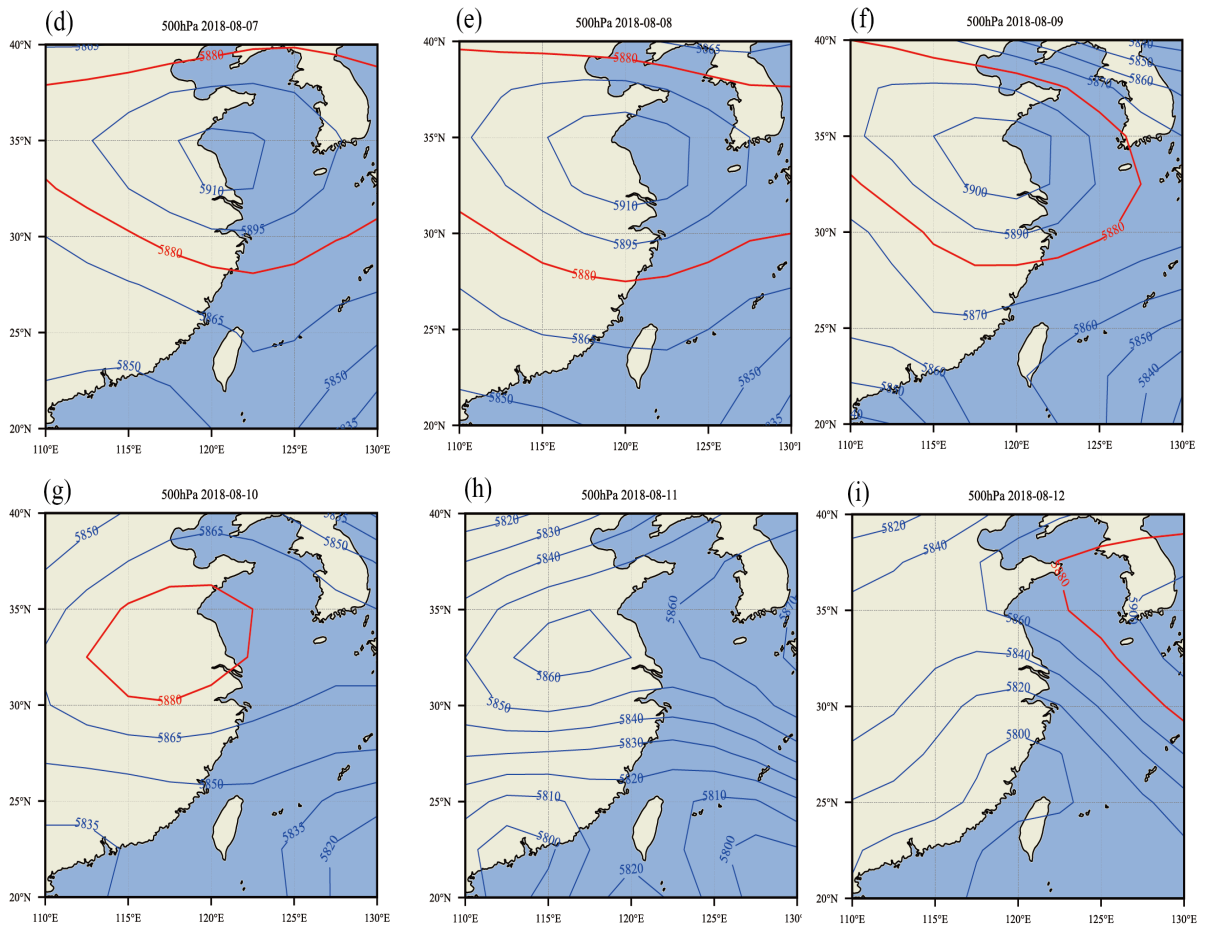
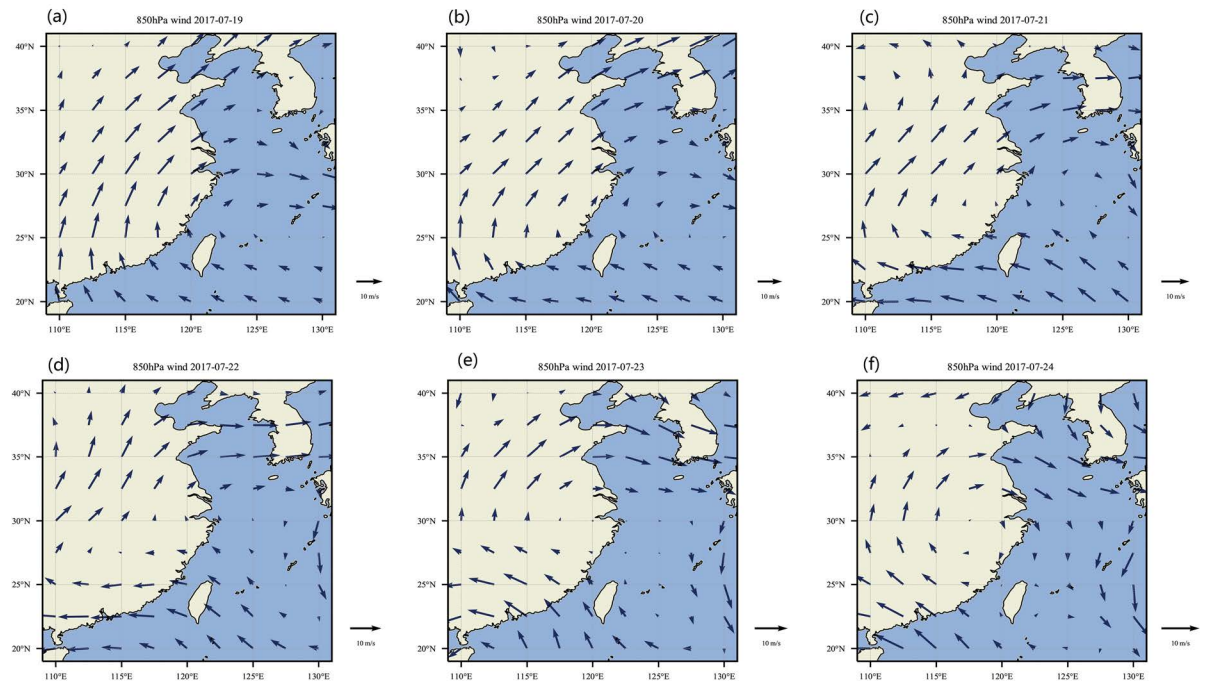


Figure 8. Average daily potential height of 500 hPa during Aug. 4, 2018 to Aug. 12, 2018 (unit: gpm)
图 8. 2018 年 8 月 4 日至 2018 年 8 月 12 日 500 hPa 日平均位势高度(单位: gpm)



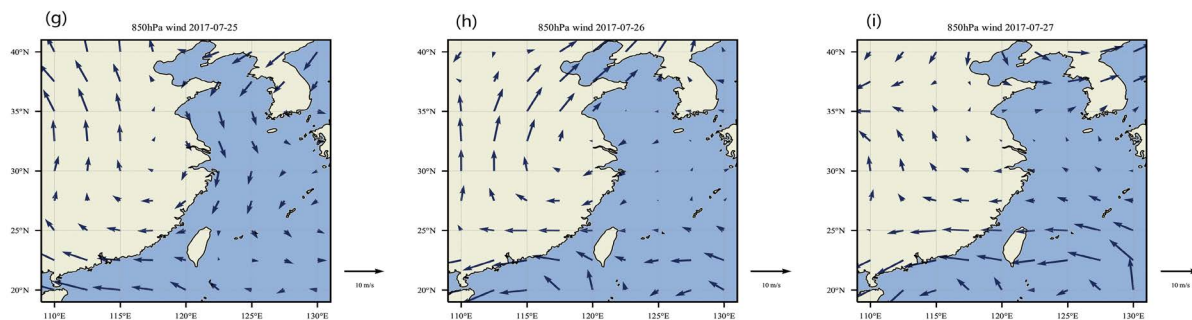


Figure 9. Average daily wind field of 850 hPa during July 19, 2017 to July 27, 2017
图 9. 2017 年 7 月 19 日至 2017 年 7 月 27 日 850 hPa 日平均风场

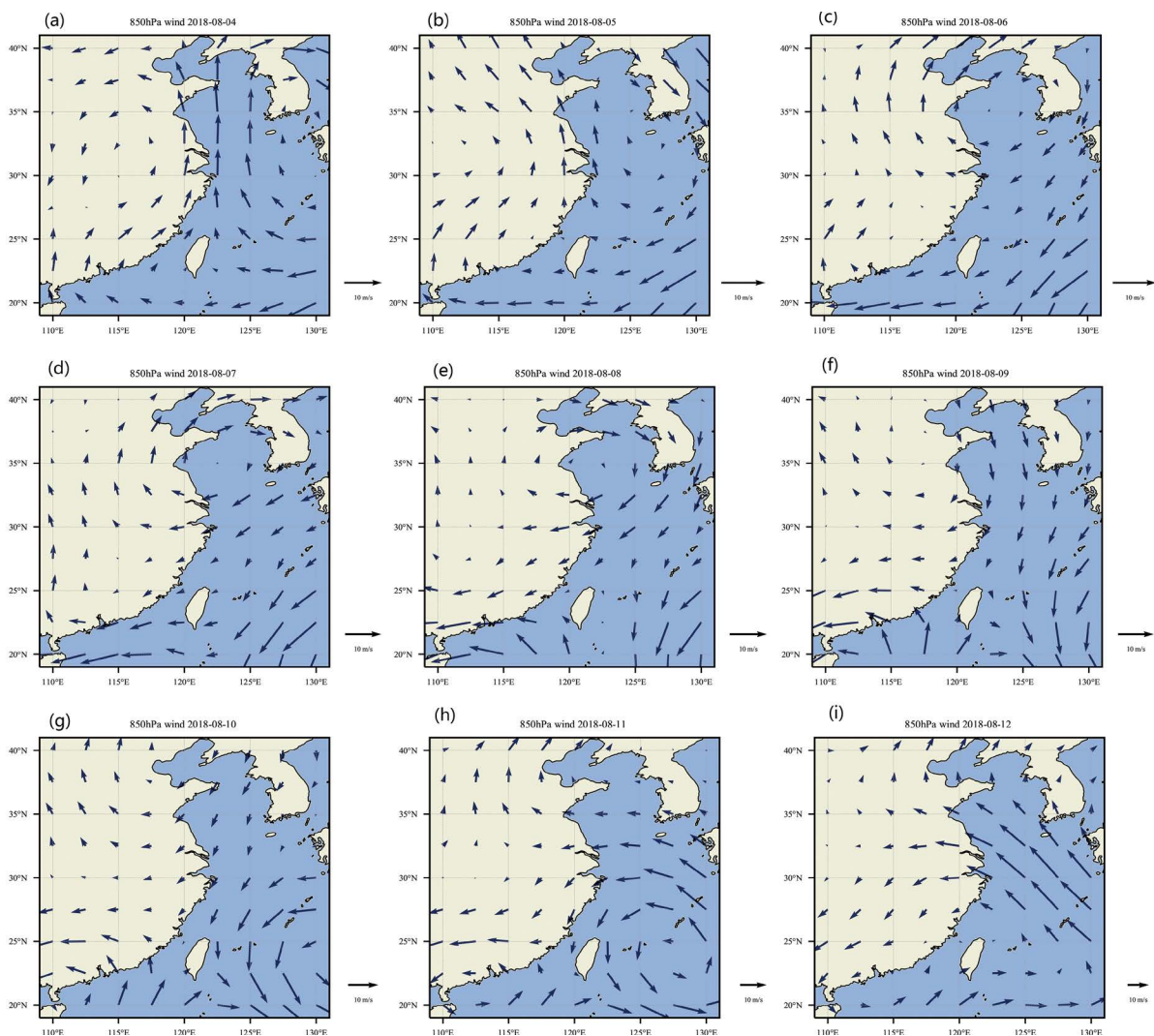


Figure 10. Average daily wind field of 850 hPa during Aug. 4, 2018 to Aug. 12, 2018
图 10. 2018 年 8 月 4 日至 2018 年 8 月 12 日 850 hPa 日平均风场

湿热浪期间 850 hPa 日平均风场(图 10)显示渤海、黄海上空低层流场存在一个反气旋环流, 此反气旋相较于干热浪过程的反气旋位置偏北, 这个反气旋也有一个向西移动的过程, 其中心从黄渤海区域移动至江淮一带, 长三角位于反气旋系统中心的南侧, 受东风影响。

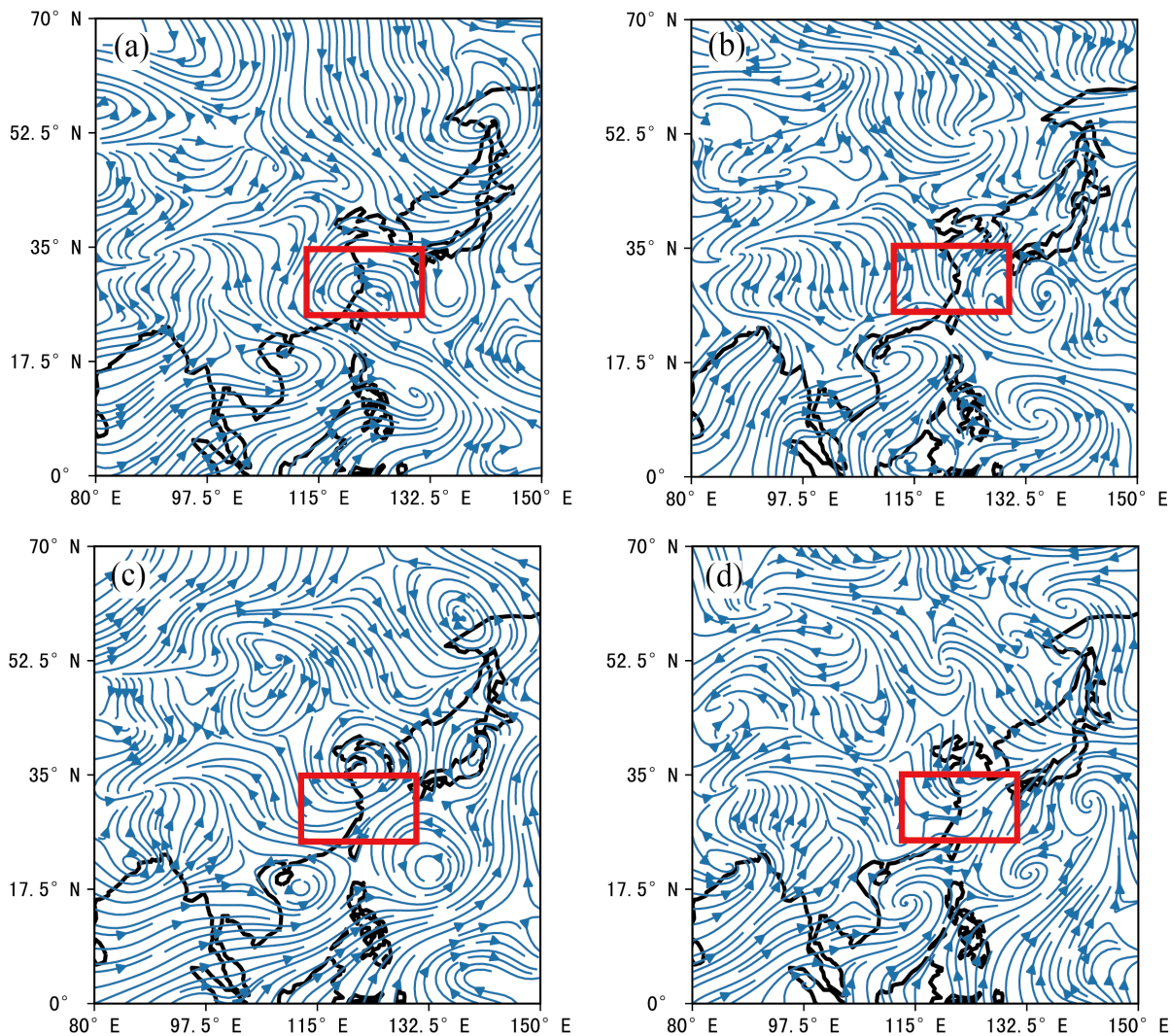


Figure 11. 850 hPa (a) dry heat wave, flow field; (b) dry heat wave, water vapor flux field; (c) wet heat wave, flow field; (d) wet heat wave, water vapor flux field, indicating the direction only

图 11. 850 hPa (a) 干热浪个例, 流场; (b) 干热浪个例, 水汽通量场; (c) 湿热浪个例, 流场; (d) 湿热浪个例, 水汽通量场, 仅标识方向

4.1.2. 低层流场和水平通量场

2017 年 7 月长三角干热浪个例期间, 长三角上空出现较强的反气旋环流(图 11(a)红框内), 使得长三角地区上空的水汽向东北方向大量输出(图 11(b)红框内), 该区域水汽含量减少, 到达地面的太阳短波辐射增加, 这也是高温和干燥天气形成的原因。区别于 2017 年 7 月长三角干热浪过程的流场与水汽输送, 2018 年 8 月长三角湿热浪个例期间, 反气旋环流出现在渤海上空, 由东海自东向西输送的水汽运送至长三角上空, 此次湿热浪期间的平均相对湿度高于 2017 年 7 月干热浪期间的平均相对湿度。

4.2. 热力诊断

根据地表辐射平衡方程:

$$R_n = SE + LE + G \tag{1}$$

$$R_n = R_{sd} - R_{su} + R_{Ld} - R_{Lu} = R_{ns} + R_{nL} \quad (2)$$

对两次热浪天气进行热力诊断。公式(1)(2)中 R_n 为地表净辐射, SE 为感热通量, LE 为潜热通量, G 为土壤热通量, R_{sd} 为地表接收的太阳短波辐射, R_{su} 为地面反射的太阳短波辐射, R_{Ld} 为地表接受大气的长波辐射, R_{Lu} 为地表发射至大气的长波辐射, R_{ns} 为地表净短波辐射, R_{nL} 为地表净长波辐射。

本文使用 ERA5 的月平均地表通量资料分析两次热浪事件所在月份的各地表通量的分布情况。各辐射通量取向上为正, 2017 年 7 月长三角地区地表接收的净短波辐射通量相较于气候态(取 1979 年~2018 年, 数据来自 ERA5, 下同)偏多 20 至 30 W/m^2 , 接收到的太阳短波辐射偏多(图 12a); 地表向上的净长波辐射较气候态偏多 5 至 15 W/m^2 , 近地面大气从地面获得的热量偏多(图 12b)。2017 年 7 月长三角地区地表向上的感热通量和潜热通量较气候态也偏强 10 W/m^2 左右, 部分地区偏强达到 30 W/m^2 (图 12c~d)。近地面大气的主要热源是地面, 增加的太阳短波辐射使地面得到能量, 地表温度升高, 偏多的向上的感热、潜热通量和长波辐射加热近地面的空气的作用更强, 使气温高于平均态。

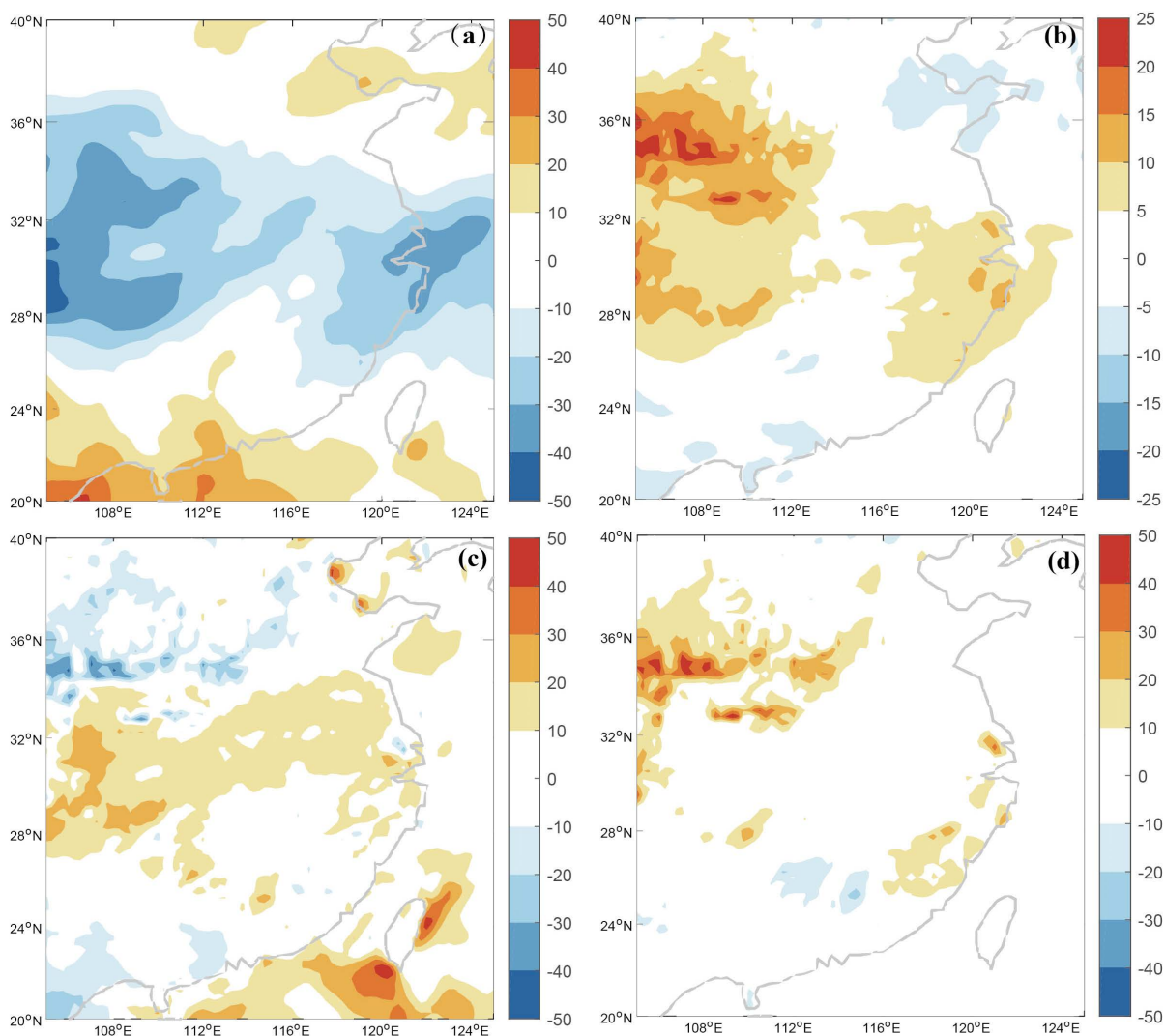


Figure 12. Average (a) solar short-wave radiation; (b) surface upward net long-wave radiation; (c) sensible heat flux; (d) latent heat flux during the dry heat wave of the month, consider the upward direction of the surface as positive direction (unit: W/m^2)

图 12. 干热浪个例当月(a) 太阳短波辐射; (b) 地表向上净长波辐射; (c) 感热通量; (d) 潜热通量平均值, 以地表向上方向为正(单位: W/m^2)

2018 年 8 月长三角地区地表接收的净短波辐射通量相较气候态无明显差异, 此时段接收的太阳短波辐射与往常相似(图 13a); 但地表向上的净长波辐射较气候态偏多 5 W/m^2 , 近地面大气从地面获得的热量略微偏多(图 13b)。2018 年 8 月长三角地区地表向上的感热通量相较气候态也偏强 20 W/m^2 左右(图 13c), 潜热通量相较气候态无明显差异(图 13d), 向上的感热通量和长波辐射加热了近地面的空气, 使近地面气温上升。

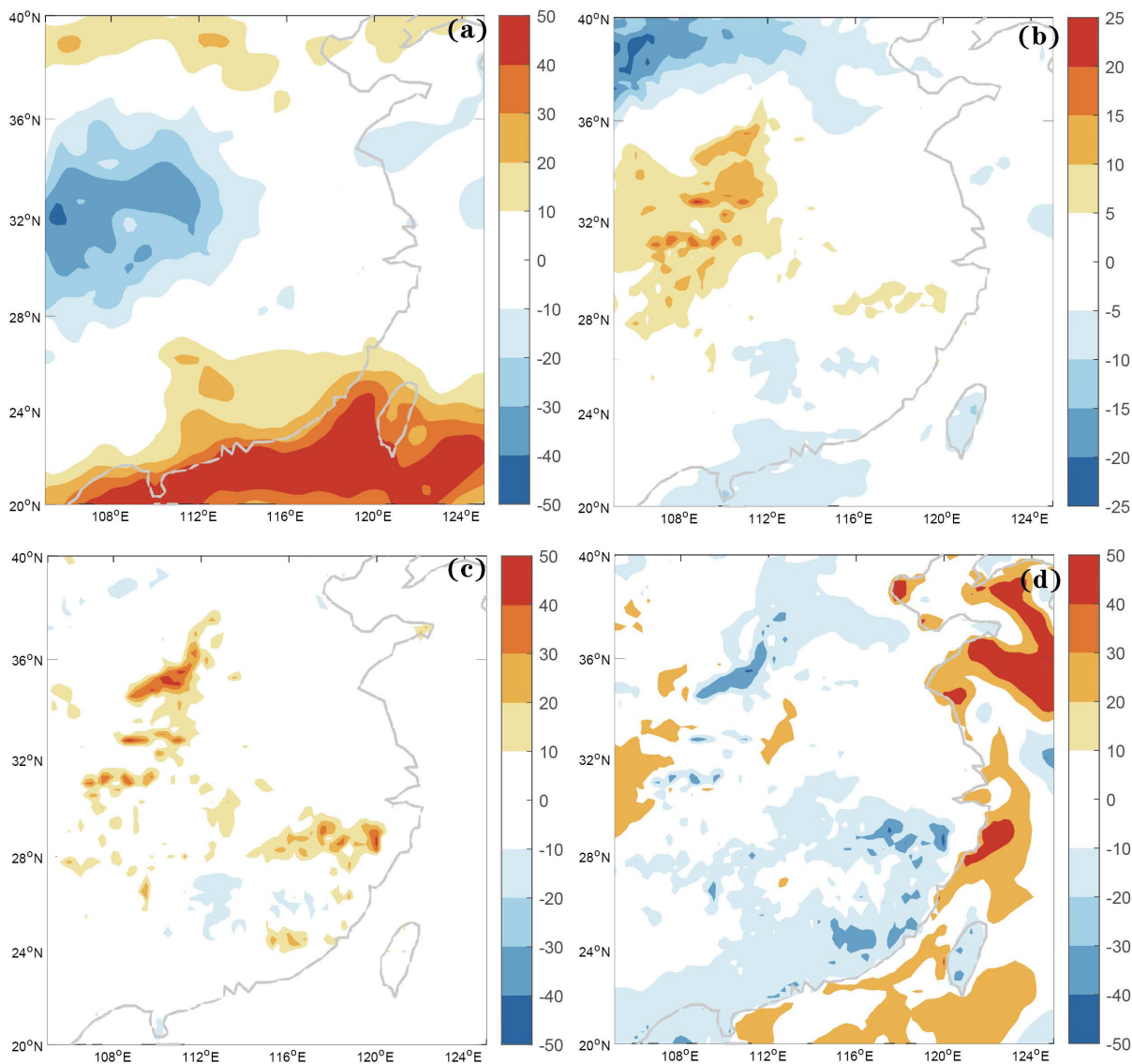


Figure 13. Average of (a) solar short-wave radiation; (b) surface upward net long-wave radiation; (c) sensible heat flux; (d) latent heat flux during the wet heat wave of the month, consider the upward direction of the surface as positive direction (unit: W/m^2)

图 13. 湿热浪个月当 (a) 太阳短波辐射; (b) 地表向上净长波辐射; (c) 感热通量; (d) 潜热通量平均值, 以地表向上方向为正(单位: W/m^2)

5. 长三角两次热浪期间的气象要素及污染物浓度变化

5.1. 气象要素及污染物浓度的时间变化

长三角两次热浪过程及其前后 7 天的气象要素和污染物浓度的时间序列(图 14)表明, 干热浪和湿热浪期间长三角地区出现了大范围高温, 区域平均气温分别为 32.6°C 和 30.3°C 。干热浪期间长三角地区的

相对湿度在 70% 以下, 而湿热浪期间长三角地区的相对湿度在 70% 以上, 这两次长三角的高温过程可认为是较为典型的干热浪过程和湿热浪过程。干热浪期间臭氧浓度与温度同位相变化, 与风速和相对湿度变化反位相变化。气温偏高、相对湿度偏低, 有利于近地面臭氧的生成; 近地面风速偏低, 不利于污染物的水平扩散, 在这些气象条件下干热浪期间近地面臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高。湿热浪期间气象要素的变化趋势与干热浪相似, 近地面臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也偏高。

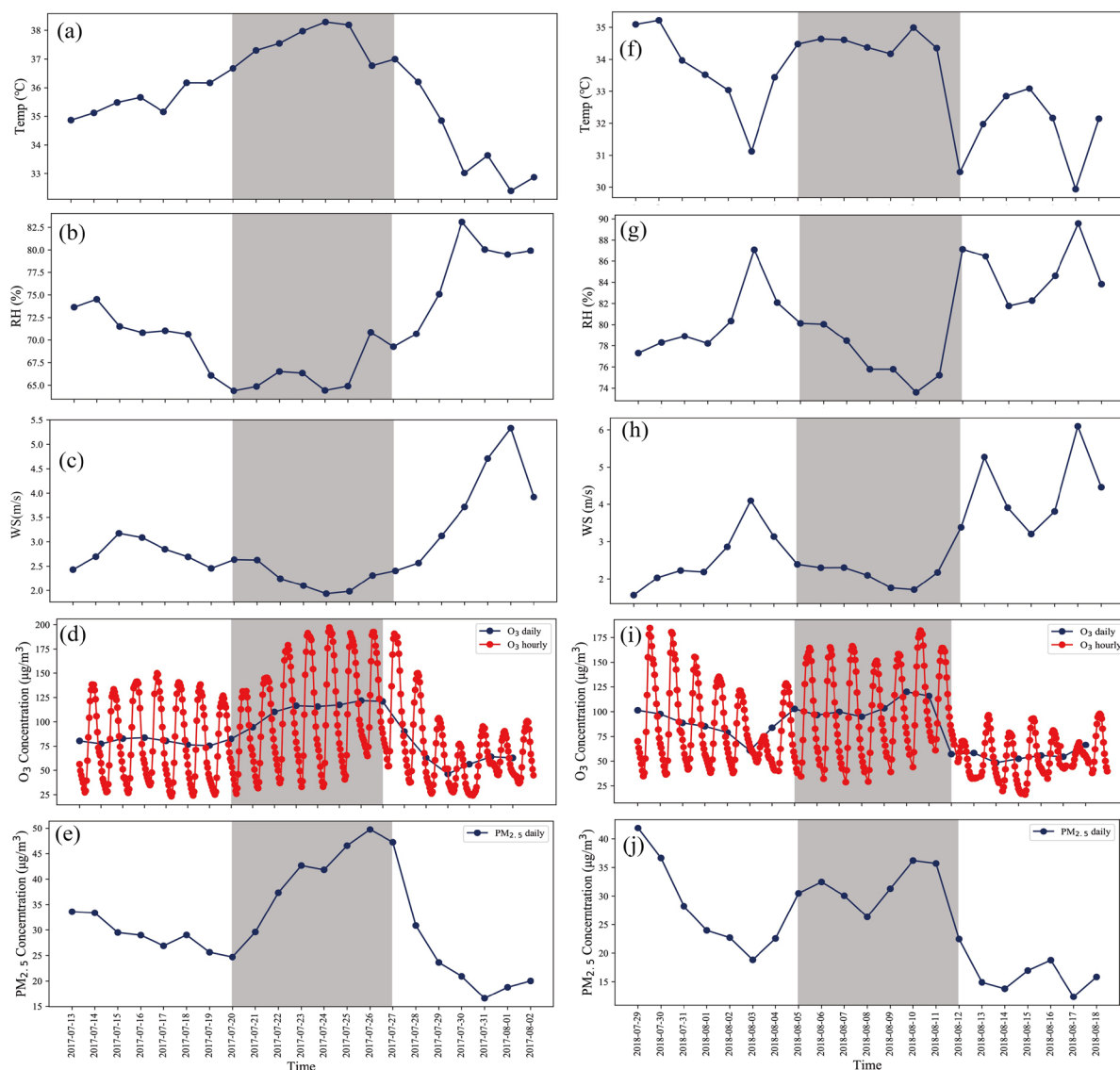


Figure 14. (a) Daily maximum temperature ($^{\circ}\text{C}$); (b) daily average relative humidity (%); (c) daily average wind speed (m/s); (d) hourly average concentration of ozone ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, red line) and daily average concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, blue line); (e) daily average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) during dry heat wave process and 7 days before and after, (f) - (j) are the same as (a) - (e), but for wet heat wave process

图 14. 干热浪期间及其前后 7 天(a) 每日最高气温($^{\circ}\text{C}$); (b) 每日平均相对湿度(%); (c) 每日平均风速(m/s); (d) 臭氧小时平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$, 红线)和日平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$, 蓝线); (e) $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$), (f)~(j)与(a)~(e)相同, 但为湿热浪过程

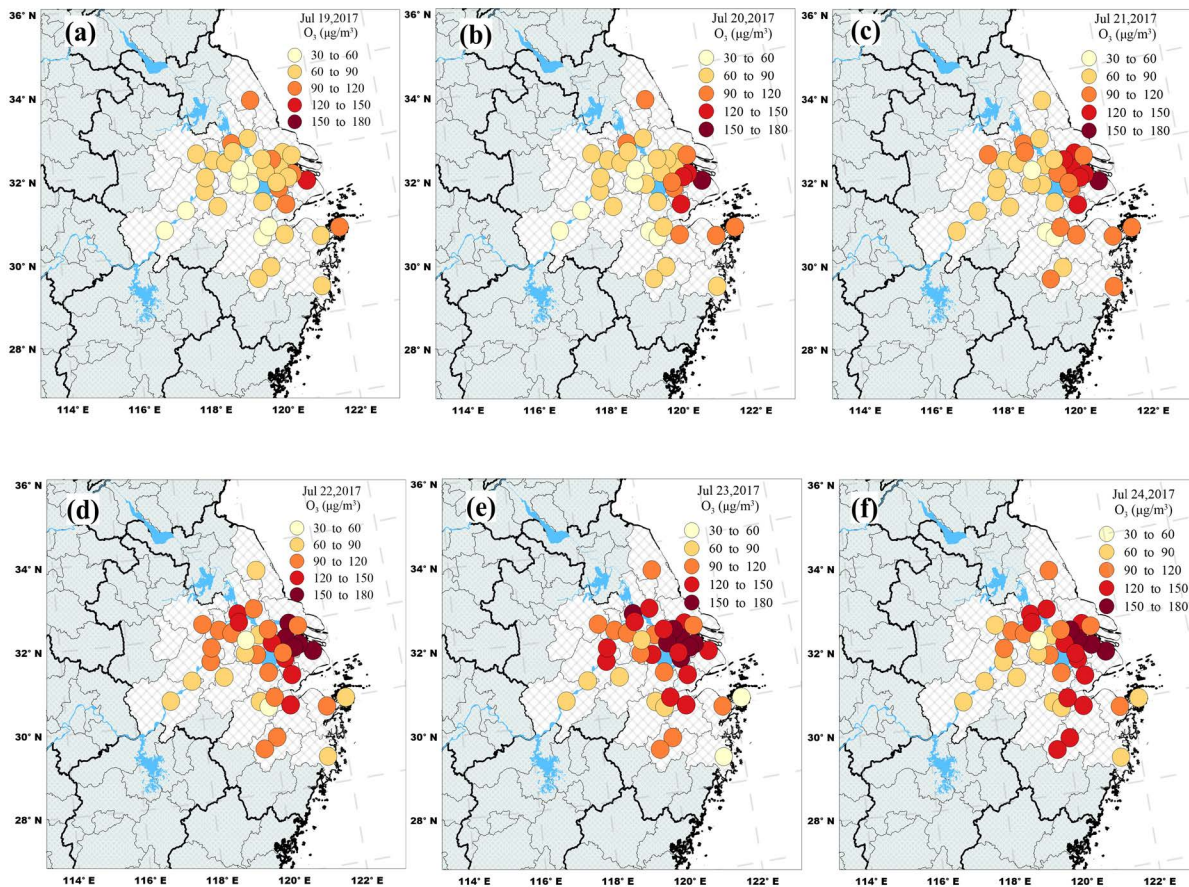
5.2. 长三角两次热浪期间臭氧浓度时空分布

长三角两次热浪期间近地面均出现了臭氧污染, 且臭氧的浓度水平和空间分布与西太副高的位置与强度

相关。图 15~16 分别给出了长三角两次热浪过程及前后各 1 天(每次各 9 天)的地面臭氧浓度空间分布, 长三角干热浪期间近地面平均臭氧浓度为 $108.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2017 年 7 月 19 日至 7 月 21 日, 长三角近地面臭氧浓度逐渐升高, 7 月 22 日至 7 月 26 日, 长三角近地面日臭氧浓度维持在 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 平均浓度为 $116.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 远高于长三角夏季的平均臭氧浓度 $76.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 各站平均每日最高浓度在 $170\sim 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 超出了《环境空气质量标准》[15]的一级浓度限值 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。湿热浪期间近地面平均臭氧浓度为 $104.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 各站平均每日最高浓度在 $145\sim 185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 2018 年 8 月 6 日~7 日、9 日~11 日的各站平均每日最高浓度超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

干热浪期间西太副高的强度与进退影响着长三角近地面臭氧浓度的变化与分布。结合 2017 年 7 月 19 日至 7 月 27 日的 500 hPa 位势高度场(图 7)、850 hPa 风场(图 9)和近地面臭氧浓度(图 15)分析发现, 7 月 19 日至 21 日西太副高中心和 850 hPa 反气旋环流位于太平洋且逐渐向西移动, 长三角近地面臭氧浓度逐渐升高; 7 月 22 日至 26 日西太副高中心和 850 hPa 反气旋环流中心位于长三角上空且逐渐向西移动, 在这种高温、干燥且稳定的天气形势下, 长三角地面出现持续的臭氧污染, 且污染高值区也有自东向西移动的趋势。

湿热浪前后西太副高的位置影响着长三角近地面臭氧浓度的分布。湿热浪过程开始前一(2018 年 8 月 4 日), 长三角处于西太副高边缘, 湿热浪过程结束后一(2018 年 8 月 12 日), 西太副高入海, 长三角不再受副高控制, 这两天对应的长三角近地面平均臭氧浓度值($85.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $42.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)与湿热浪过程相比($104.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)明显偏低。8 月 5 日至 8 月 10 日, 长三角受西太副高控制(图 8), 高值中心与干热浪相比位置偏北, 位于黄淮和江淮一带。850 hPa 的风场(图 10)和水汽通量场(图 11d)显示长三角位于反气旋系统中心的南侧, 受东风影响, 有自东向西的水汽输送。此次湿热浪过程不如 2017 年 7 月下旬的干热浪过程干燥和稳定, 期间长三角同样存在着持续的臭氧污染, 但臭氧浓度水平低于干热浪个例。



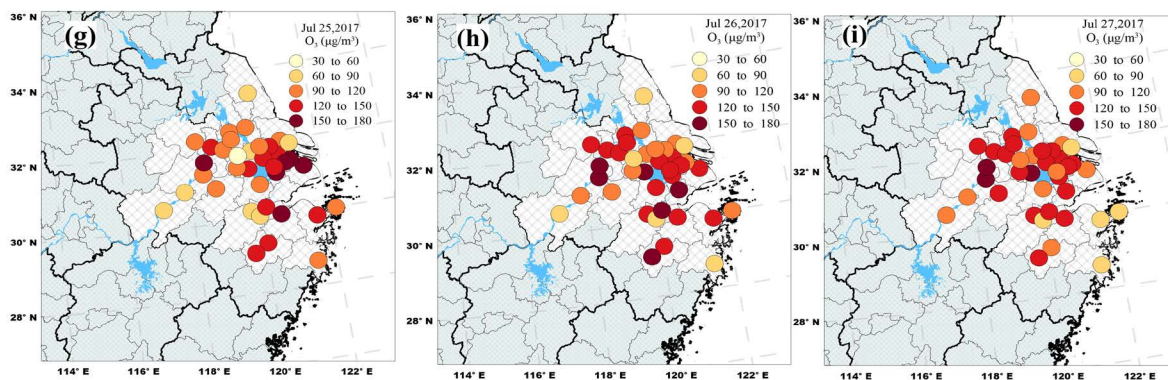


Figure 15. Average daily ozone concentration of YRD sites during Jul. 19, 2017 to Jul. 27, 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
图 15. 2017 年 7 月 19 日至 2017 年 7 月 27 日长三角各站地面日平均臭氧浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

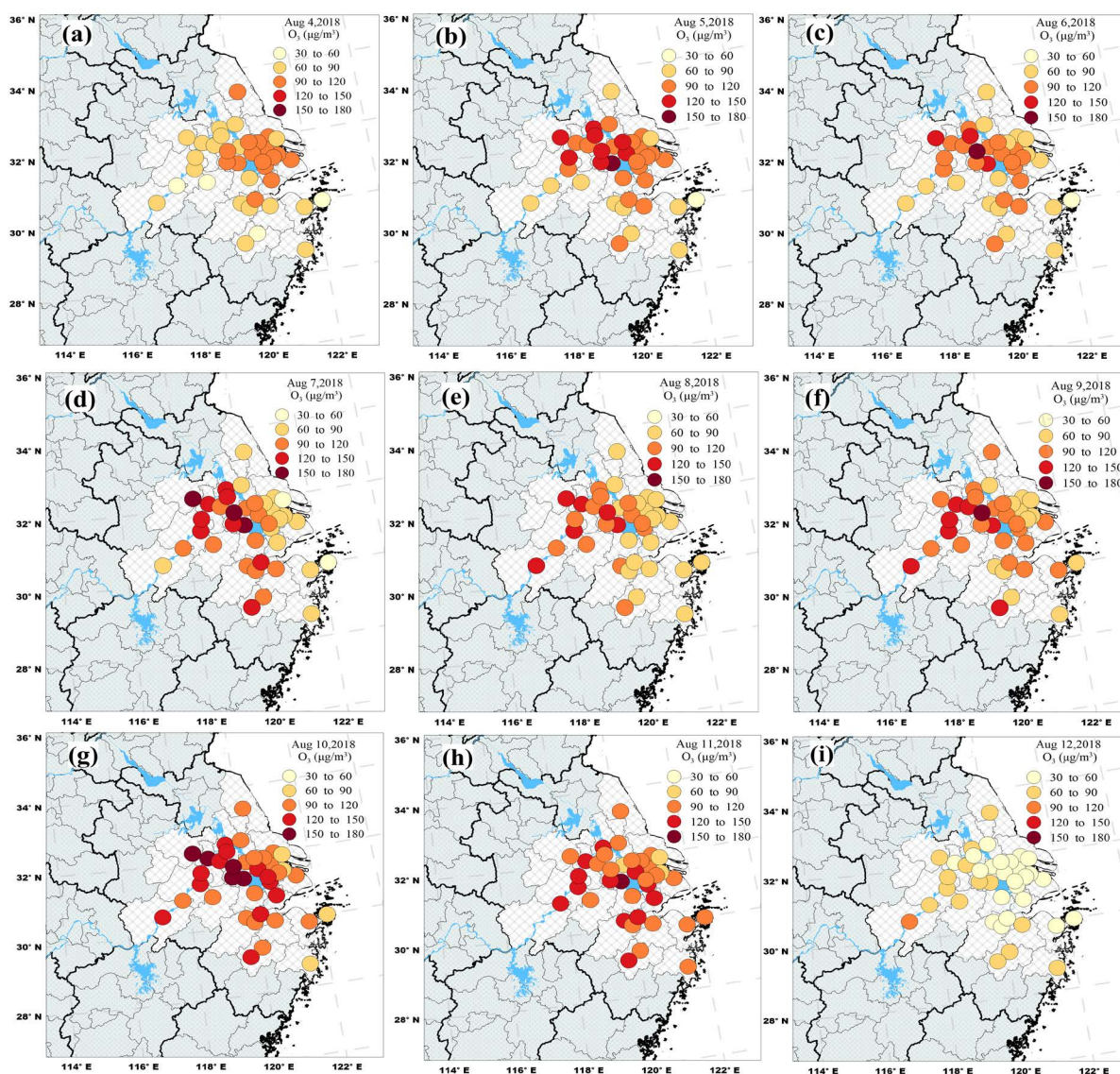


Figure 16. Average daily ozone concentration of YRD sites during Aug. 4, 2018 to Aug. 12, 2018 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
图 16. 2018 年 8 月 4 日至 2018 年 8 月 12 日长三角各站地面日平均臭氧浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

6. 结论

本文从合成统计和个例分析两个角度讨论长三角(干/湿)热浪期间大气环流形势及近地面臭氧浓度的时空分布, 结论如下:

1) 西太副高偏西偏强有利于热浪天气的形成。1973~2018 年长三角地区夏季区域热浪日与夏季平均状态相比西太副高位置偏西(西至 112.5°E)、偏北(北至 33.5°N), 强度偏强, 平均高值中心位于长三角东部东海海域, 中心值超过 5895 gpm。长三角干热浪日期间西太副高更强, 中心强度与长三角热浪日相同但中心范围更大, 西伸脊点和北界位置较长三角热浪日偏西 0.5°和偏北 0.5°; 长三角湿热浪日期间西太副高相对较弱, 西伸脊点和北界位置分别较长三角热浪日偏东 0.5°和偏南 0.5°。

2) 高温干燥的气象背景是近地面臭氧浓度升高的有利条件。2015~2018 年长三角热浪时段地面臭氧浓度水平较高, 热浪日、干热浪日、湿热浪日和夏季平均的臭氧浓度分别为 89.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、91.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、86.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 76.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。长三角干热浪日期间太湖以东站点近地面臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于太湖以西站点, 这可能是因为干热浪期间位于长三角东部上空为西太副高中心, 天气形势稳定更利于污染物的累积。

3) 2017 年 7 月下旬、2018 年 8 月上旬长三角两次热浪个例期间西太副高异常偏强且西伸明显, 长江中下游地区长时间受西太副高控制, 异常增强的西太副高带来大范围的下沉运动, 使得大气绝热和非绝热加热异常增强。干热浪个例中偏多的太阳短波辐射使地面获得更多能量、地表升温幅度更大, 偏多的感热、潜热通量和长波辐射使得近地面气温偏高而出现热浪天气。湿热浪个例中偏多的感热通量和长波辐射使近地面气温偏高。

4) 长三角干热浪个例期间(2017 年 7 月 20 日至 7 月 26 日), 500 hPa 西太副高和 850 hPa 反气旋系统中心位于长三角上空, 这种高温、干燥的稳定环流形势是热浪形成和维持以及地面污染物形成和累积的有利条件。对该区域典型湿热浪个例期间(2018 年 8 月 5 日至 8 月 11 日)环流形势的分析表明, 长三角上空在该过程中受西太副高控制, 但 500 hPa 西太副高和 850 hPa 反气旋系统中心出现在渤海上空, 较干热浪个例位置明显偏北, 长三角上空有显著的源于东海海域自东向西输送的水汽, 这种环流形势有利于湿热浪过程的形成。此次湿热浪个例期间也出现了近地面的臭氧污染, 但相对于干热浪天气, 较低的气温和较高的相对湿度使得湿热浪过程臭氧形成条件不如干热浪天气更有利, 导致湿热浪过程长三角臭氧污染浓度水平低于干热浪个例。

基金项目

国家重点研发计划重点专项(2017YFC1404200, 2017YFC1404100); 山东省重点研发计划(2019GSF111066)。

参考文献

- [1] Chen, X.S., Wang, Z.F., Li, J., *et al.* (2018) Simulation on Different Response Characteristics of Aerosol Particle Number Concentration and Mass Concentration to Emission Changes over Mainland China. *Science of the Total Environment*, **643**, 692-703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.181>
- [2] Lu, X., Hong, J.Y., Zhang, L., *et al.* (2018) Severe Surface Ozone Pollution in China: A Global Perspective. *Environmental Science & Technology Letters*, **5**, 487-494. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00366>
- [3] Gao, J., Wang, T., Ding, A.J., *et al.* (2005) Observational Study of Ozone and Carbon Monoxide at the Summit of Mount Tai (1534 m a.s.l.) in Central-Eastern China. *Atmospheric Environmental*, **39**, 4779-4791. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.030>
- [4] Ding, A.J., Fu, C.B., Yang, X.Q., *et al.* (2013) Ozone and Fine Particle in the Western Yangtze River Delta: An Overview of 1yr Data at the SORPES Station. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 5813-5830. <https://doi.org/10.5194/acp-13-5813-2013>
- [5] Papanastasiou, D.K., Melas, D. and Kambezidis, H.D. (2015) Air Quality and Thermal Comfort Levels under Extreme

- Hot Weather. *Atmospheric Research*, **152**, 4-13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.002>
- [6] Tressol, M., *et al.* (2008) Air Pollution during the 2003 European Heat Wave as Seen by MOZAIC Airlines. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, 2133-2150. <https://doi.org/10.5194/acp-8-2133-2008>
- [7] Vautard, R., Honore, C., Beekmann, M., *et al.* (2005) Simulation of Ozone during the August 2003 Heat Wave and Emission Control Scenarios. *Atmospheric Environment*, **39**, 2957-2967. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.039>
- [8] Khiem, M., Ooka, R., Huang, H. and Hayami, H. (2011) A Numerical Study of Summer Ozone Concentration over the Kanto Area of Japan Using the MM5/CMAQ Model. *Journal of Environmental Sciences*, **23**, 236-246. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60398-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60398-1)
- [9] Li, R.X. and Sun, J.Q. (2017) Interdecadal Variability of the Large-Scale Extreme Hot Event Frequency over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Basin and Its Related Atmospheric Patterns. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **11**, 67-70. <https://doi.org/10.1080/16742834.2017.1335580>
- [10] 魏挪巍, 巩远发, 苗青, 邓锐捷. 2013年长江中下游地区高温热浪及可能成因[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(4): 400-407.
- [11] 夏扬. 2013年长江中下游地区夏季极端高温过程分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [12] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 169-179.
- [13] Zhao, Z. and Wang, Y. (2017) Influence of the West Pacific Subtropical High on Surface Ozone Daily Variability in Summer Time over Eastern China. *Atmospheric Environmental*, **170**, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.024>
- [14] Lu, X., Zhang, L., Chen, Y.F., *et al.* (2019) Exploring 2016-2017 Surface Ozone Pollution over China: Source Contributions and Meteorological Influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 8339-8361. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8339-2019>
- [15] 环境保护部. GB 3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.