

中国极端不利气象条件的长期演变及特征研究

宋玉强¹, 张轶雯², 邵 旻³

¹大连市气象台, 辽宁 大连

²天津智慧泉科技发展有限公司, 天津

³南京师范大学环境学院, 江苏 南京

Email: 812970150@qq.com

收稿日期: 2021年8月24日; 录用日期: 2021年9月20日; 发布日期: 2021年9月27日

摘 要

本文利用1960~2019年的全球气候再分析数据对中国各地区典型极端不利气象条件(逆温、大气静稳和热浪)的气候演变过程进行分析。结果表明, 中国各地区极端不利气象条件发生概率均显著增长, 并具有显著的季节性和空间性特征。其中, 逆温、大气静稳和热浪发生频率在1990~2019年较1960~1989年平均升高 $16.3 \pm 2.2\%$ 、 $16.5 \pm 1.0\%$ 、 $69.9 \pm 4.8\%$ 。逆温频率的增加主要位于中国南部和内蒙古地区, 气候变化导致的高空蒸散增加和近地面蒸发增加是这一变化的重要原因。大气静稳和热浪频率的增加主要位于京津冀和中国北部地区。大气静稳发生频率的增加主要受削弱的东亚季风和城市化影响。热浪发生频率增加最明显, 主要受气候变化、城市化和工业发展影响。并且, 不同定义下热浪的持续时间在近30年都有所增加, 全国平均增加0.35天。不同定义下热浪强度的演变还体现了冬暖夏冷、北暖南冷的特征。本文旨在通过研究为预测未来极端不利气象条件对空气质量的影响提供基础和依据。

关键词

极端不利气象条件, 逆温, 大气静稳, 热浪

Long-Term Evolution and Characteristics of Extreme Air Pollution Meteorological Events in China

Yuqiang Song¹, Yiwen Zhang², Min Shao³

¹Dalian Meteorological Station, Dalian Liaoning

²Wisdom Spring Tech Ltd., Tianjin

³School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Email: 812970150@qq.com

Received: Aug. 24th, 2021; accepted: Sep. 20th, 2021; published: Sep. 27th, 2021

Abstract

Based on NCEP/NCAR reanalysis data from 1960 to 2019, the climate evolution of extreme air pollution meteorological events (temperature inversion, atmospheric static stability and heat wave) under different definitions and in different regions of China are analyzed in this article. The results show that there is an obvious increasing trend of extreme air pollution meteorological events in all regions of China, and there are obvious seasonal and spatial differences. From 1990 to 2019, the frequency of temperature inversion, atmospheric static stability and heat wave increased by $16.3 \pm 2.2\%$, $16.5 \pm 1.0\%$ and $69.9 \pm 4.8\%$ from 1960 to 1989. The increased frequency of temperature inversion is mainly in southern China and Inner Mongolia. The increase of upper air evapotranspiration and surface evaporation caused by climate change are the important reasons for this change. The increased frequency of atmospheric static stability and heat wave is mainly in Beijing, Tianjin, Hebei and northern China. The former is mainly affected by the weakened East Asian monsoon and urbanization. The latter increases most obviously, which is mainly affected by climate change, urbanization and industrial development. Moreover, the duration of heat wave under different definitions has increased in the past 30 years, with an average increase of 0.35 days in the whole country. The evolution of different definitions of heat wave intensity also reflects the characteristics of warm winter, cold summer, warm north and cold south. This study provides the foundation and basis for the potential impact of extreme air pollution meteorological events on air quality in the future.

Keywords

Extreme Air Pollution Meteorological Conditions, Temperature Inversion, Atmospheric Static Stability, Heat Wave

Copyright © 2021 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

21 世纪初, 中国面临着以 $PM_{2.5}$ (空气动力学直径小于 2.5 微米的细颗粒物) 为主的大气污染问题[1] [2]。中国 74 个主要城市的年平均 $PM_{2.5}$ 浓度达到了世界气象组织空气质量参考值的 7 倍[3]。大气污染通常是由于大量的人为源排放和不利于污染物扩散的气象条件形成的[4] [5]。自 2013 年后, 中国人为源排放在各项措施下已得到有效控制, 但重污染事件仍然存在, 表明近年来极端不利气象条件在形成重污染过程中起到了更多的作用[6] [7]。Ji *et al.* [8]通过数值模型和固定的源清单计算了人为源排放和气象条件对近 10 年来中国东部地区空气质量改善的相对贡献, 发现气象条件在近 10 年的空气质量演变中起到了约 30%的作用, 并且占比随时间有增加的趋势。

大气污染通常是由于大量的人为排放和不利的天气条件同时作用而产生的。促进极端大气污染事件形成的天气条件可被称之为极端不利天气条件。极端不利天气条件主要包括逆温、静稳、热浪等天气条件。逆温事件可在对流层底形成一个稳定并且相对孤立的大气层, 从而将污染物隔离在对流层底层而无法扩散[9]。当人为排放量较大(例如京津冀地区), 并且有逆温存在时, 极端大气污染会更容易形成[10]; 大气静稳则具有近地面和高空风速较低的特征, 并且很少伴有降水[11]。较低的风速和较少的降水不利于污染物的扩散和湿沉降过程[12] [13], 从而形成极端污染事件; 热浪是一种由于气候变化而产生的极端天气条件, 世界气象组织至今对于热浪没有标准的定义。热浪伴随的持续高温对当地的空气质量、人类健

康以及生态环境可造成较大的负面影响[14]。研究表明,热浪会对臭氧的形成速率以及形成机制产生直接的影响[15] [16]。例如, Pu *et al.* [17]发现热浪可使长三角地区的臭氧平均浓度上升 12 ppb。综上所述,极端不利气象条件对空气质量的影响不容忽视,因此针对其长时间尺度演变及特征的研究具有重要意义。

本文旨在基于长时间的再分析资料,针对中国不同地区展开各类极端污染不利气象条件的研究。深入了解各类极端污染不利气象条件的发生频率、影响因素、强度等变化特征。为进一步研究其对中国各地区空气质量的影响提供科学依据。

2. 资料及区域划分

为研究长时间尺度中国地区的极端不利气象条件的演变及特征,采用美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)发布的自 1960 年至 2019 年共 60 年的再分析资料进行分析。该资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间分辨率为 6 小时(<https://www.esrl.noaa.gov/psd>)。所有基于 NCEP/NCAR 的结果均已通过 95%置信度检验。

研究区域如图 1 所示,将中国 31 个省、市按照各地气候特征划分为 7 个大区域,分别为东部、北部、东北部、西北部、西南部、中部、以及南部地区。其中,北部地区中的京津冀地区是中国最大的三个经济发展区之一,同时也是污染最严重的的区域之一。东部地区和南部地区以长三角和珠三角发展区最受关注,且均为沿海区域。东北地区较其他区域更冷更干燥,而西北及中部地区由于地理位置和复杂的地形,气象要素常常伴随较大的日变化。西南地区则主要以高原为主。

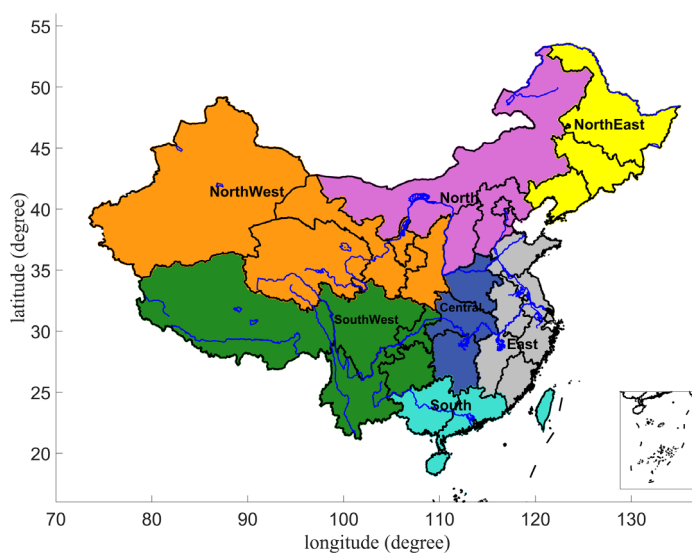


Figure 1. The region of this research

图 1. 研究区域

3. 极端不利气象条件定义

由于各类极端不利气象条件没有统一标准的定义,这里我们将对其进行定义,并研究不同定义下极端污染不利气象条件的区别。

在对流层,气温垂直分布通常随高度增加而降低,但在一定条件下,对流层中也会出现气温随高度增加而上升的现象,或者地面上随高度的增加。逆温通常是指在 800 hPa 高度以下,上层温度比下层温度至少高出 0.1 K 的现象。

大气静稳的常用定义有: 1) 基于美国国家气候数据中心对静稳天气的定义,即当某地 10 米高度风

速、500 hPa 高度风速以及降水量均至少比该地各要素的气候态(1961 年到 1990 年)小 20%时, 则定义该地发生了静稳天气(这里记为 AS1); 2) 基于 Horton *et al.* [18]对静稳天气的定义, 即当某地日平均 10 米高度风速、日平均 500 hPa 高度风速、以及日累计降水量分别小于 $3.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 1 mm 时, 则定义该地当日为静稳天气(这里记为 AS2)。

热浪的常用定义包括: 1) 某地日最高温度较该地气候态(1961 年到 1990 年)高出至少 5 K 并且持续 2 天以上(这里记为 HW1); 2) 中国一般将日最高气温超过 35°C 并且连续 3 天以上称之为热浪(这里记为 HW2)。

4. 结果与讨论

4.1. 逆温

图 2 分别为逆温在 1960~1989 年(第一时段)内的年平均发生频率(图 2(a))、逆温在 1990~2019 年(第二时段)内较第一时段的变化率(图 2(b))以及逆温在最近 60 年内增长趋势的季节分布(图 2(c)~(f))。由图 2(a)可见, 我国东北部、东部以及中部地区逆温发生频率相对较高。而中国第二时段较第一时段逆温发生频率平均升高了 $16.3 \pm 2.2\%$, 由图 2(b)可看出, 西北地区的的增长率相对最高, 达到 $30.0 \pm 5.9\%$, 而在逆温发生频率较高的东北部、东部地区以及京津冀地区, 逆温的发生频率并没有明显的增长, 并且在某些区域出现略微的减少。由图 2(c)~(f)可见, 逆温在最近 60 年的增长趋势存在明显的季节性变化特征。其中, 春夏两季逆温整体呈增长趋势, 并且春季较为明显。而秋冬两季开始存在减少趋势, 冬季逆温的增长趋势存在明显的区域分布特征, 东北部、京津冀等地区出现明显的下降趋势, 而中国南方以及内蒙古和新疆则出现明显增长趋势。

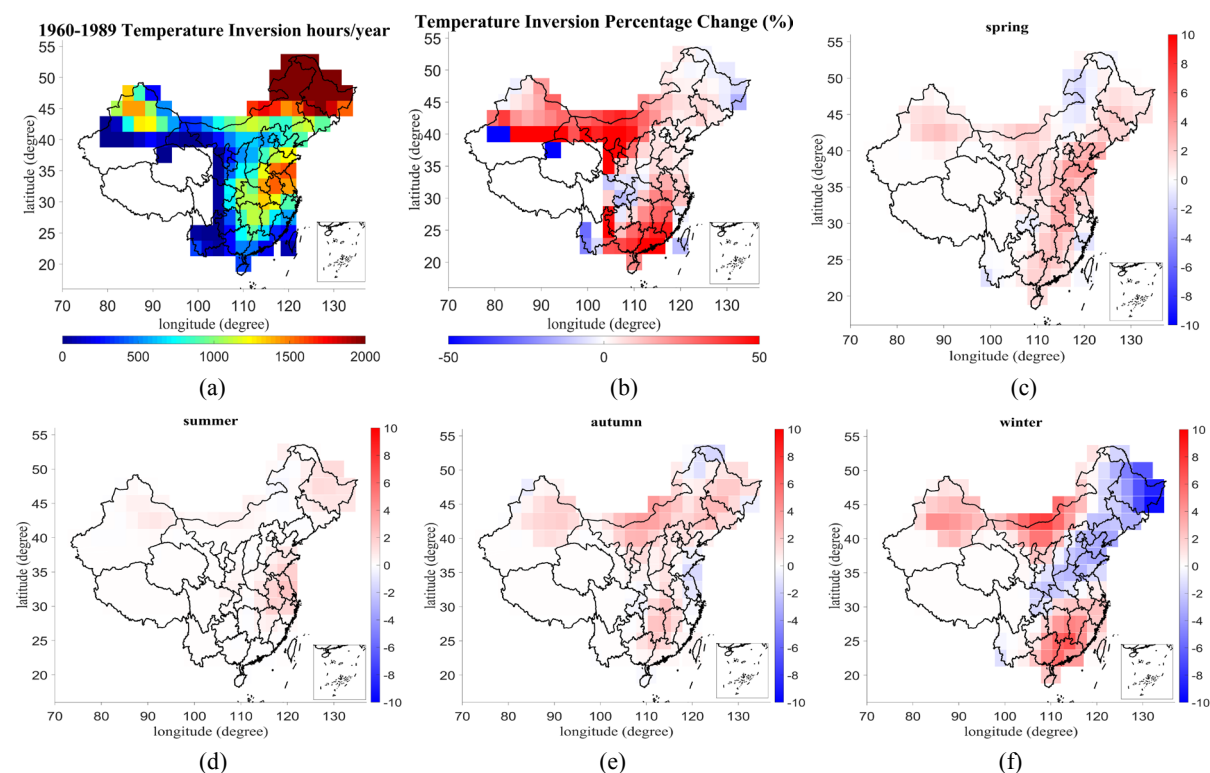


Figure 2. The annual average frequency of inversion (a), the temperature inversion percentage changes (b) and the seasonal distribution of inversion growth trend (c)~(f)

图 2. 逆温年平均发生频率(a), 逆温年平均变化百分比(b), 逆温增长趋势的季节分布((c)~(f))

气候变化带来的全球增温会加强蒸散效应，并在对流层上部释放出更多的潜热，尤其是在热带及中纬度地区，从而使得大气温度递减率减少[19]，导致我国南部地区逆温增加。而近地面的蒸发效应则会起到相反的作用。图3显示了我国近地面蒸发率第二时段较第一时段的差值。如图3(a)所示，NCEP/NCAR的再分析资料显示出我国第二时段近地面蒸发率较第一时段整体上升，尤其是东北部和北部地区。其中，京津冀地区近地面年平均蒸发率的增长达到了约 $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，而内蒙古以及四川盆地则存在下降的近地面蒸发率。如图3(b)~(e)所示，各季节的近地面蒸发率显示东北部、北部地区有增加趋势，而内蒙古、四川等地呈下降趋势。结合图2，可见春夏两季虽然近地面蒸发率有上升趋势，但由于气候变化导致的蒸散加强起到了主导作用，导致了我国逆温发生频率的整体上升。而秋冬两季，由于太阳直射点逐渐南移，气温下降导致蒸散效应减弱，此时地面蒸发起到了主导作用，从而导致了这些地区逆温发生频率的下降，这种特征在东北部及北部地区表现尤为明显。

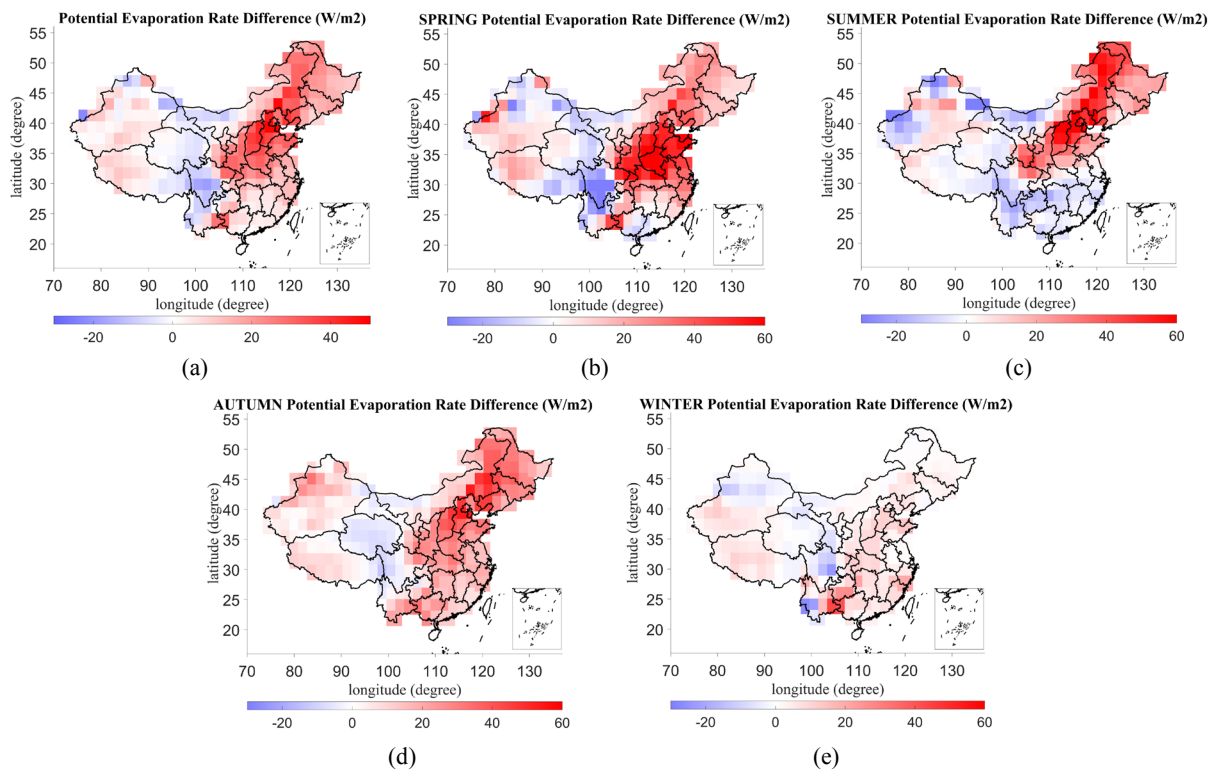


Figure 3. Difference of surface evaporation rate between the second period and the first period (The Annual Average (a), Spring (b), Summer (c), Autumn (d), Winter (e))

图3. 近地面蒸发率第二时段较第一时段的差值(年平均(a)、春季(b)、夏季(c)、秋季(d)、冬季(e))

4.2. 大气静稳

图4显示了AS1和AS2在第一时段内的年平均发生频率(图4(a)、图4(c))以及分别在第二时段内较第一时段的变化率(图4(b)、图4(d))。由图4(a)、图4(c)可见，不同定义下的大气静稳天气的发生频率有较大区别。AS1发生频率较高的区域位于青藏高原、新疆盆地及内蒙古部分地区，发生频率均超过60天/年。而其他区域则无明显差异，发生频率均在40天/年左右。而AS2发生频率较高的区域则位于新疆、内蒙古部分地区和陕西南部地区，发生频率可达80天/年，新疆区域甚至超过100天/年。而其他区域则存在较大差异，发生频率在0~40天/年不等。由图4(b)、图4(d)可见，两种大气静稳定义计算出的结果都显示中国地区第二时段大气静稳发生频率较第一时段有明显增高，AS2较AS1有更高的发生频率变化率。AS1和

AS2 发生频率变化率的全国年平均值分别为 $11.7 \pm 0.6\%$ 和 $20.4 \pm 1.3\%$ 。AS1 和 AS2 定义的大气静稳结果均显示北部地区的增幅最大, 分别达到了 $14.4 \pm 1.3\%$ 和 $34.3 \pm 2.8\%$ 。其次为中部地区, 增幅分别达到了 $14.3 \pm 1.9\%$ 和 $28.6 \pm 3.5\%$ 。图 5 显示了 AS1 和 AS2 在 1960~2019 年 60 年内各季节的变化趋势分布。结果显示, 两种定义的大气静稳都存在明显的季节性差异。夏季的增加趋势最明显, 其中以北部地区最显著。春秋两季则主要集中在北部、西北和西南地区, 而东部、东北、中部和南部地区的变化趋势较小, 部分地区有减少趋势。冬季大气静稳发生频率则多为减少趋势, 尤其在西北部、东北部和内蒙古地区最明显。

大气静稳发生频率的变化主要与定义大气静稳的三个要素有关, 即 10 米高度风速、500 hPa 高度风速和降水。图 6 为 10 米高度风速、500 hPa 高度风速和日累计降水量两个时段的年均差值以及季节性变化特征, 由图 6(a)~(c) 可见, 三者均呈现减弱的趋势, 全国年平均 10 米高度风速、500 hPa 高度风速以及日降水量分别下降 $0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.99 mm 。其中, 10 米高度风速全国呈整体下降趋势, 500 hPa 高度风速主要在 30°N 至 45°N 之间下降明显, 而日降水量则主要在东北部、北部及中部地区下降明显, 南部地区有上升趋势。三个要素的整体下降与气候变化以及人为因素密切相关。由图 6(d)、图 6(g)、图 6(j)、图 6(m) 所示, 10 米高度风速的减少主要在春、夏季节, 减少较明显区域主要集中在京津冀地区, 这可能与中国近几十年来大力发展的城市建设相关[20]。由图 6(e)、图 6(h)、图 6(k)、图 6(n) 所示, 500 hPa 高度风速四季均有削弱趋势, 春、夏、秋三季节主要位于中纬度地区, 而冬季则南部地区也有明显减弱, 这可能是由削弱的东亚季风造成的[21]。由图 6(f)、图 6(i)、图 6(l)、图 6(o) 所示, 日降水量的减少主要发生在春夏两季。

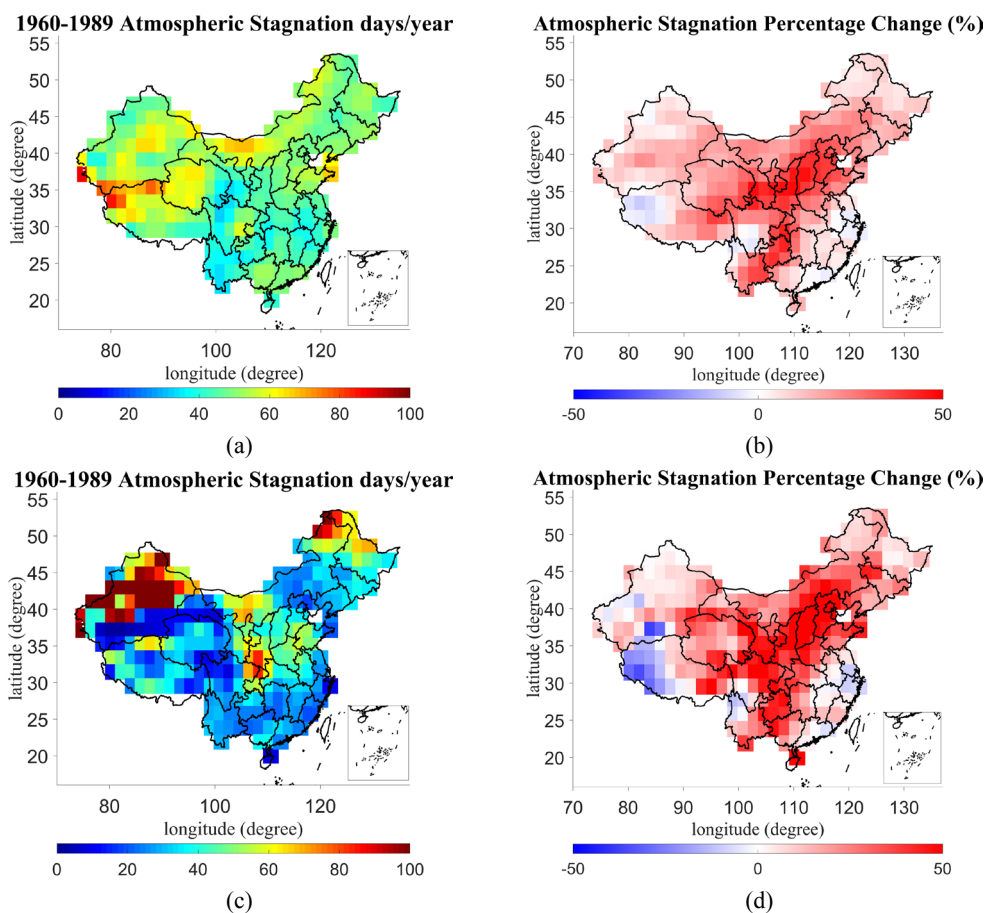


Figure 4. The annual average frequency of AS1 and AS2 in the first period ((a), (c)) and the change rate of the second period compared with the first period (b), (d)

图 4. AS1 和 AS2 在第一时段内的年平均发生频率(a)、(c)以及第二时段较第一时段的变化率(b)、(d)

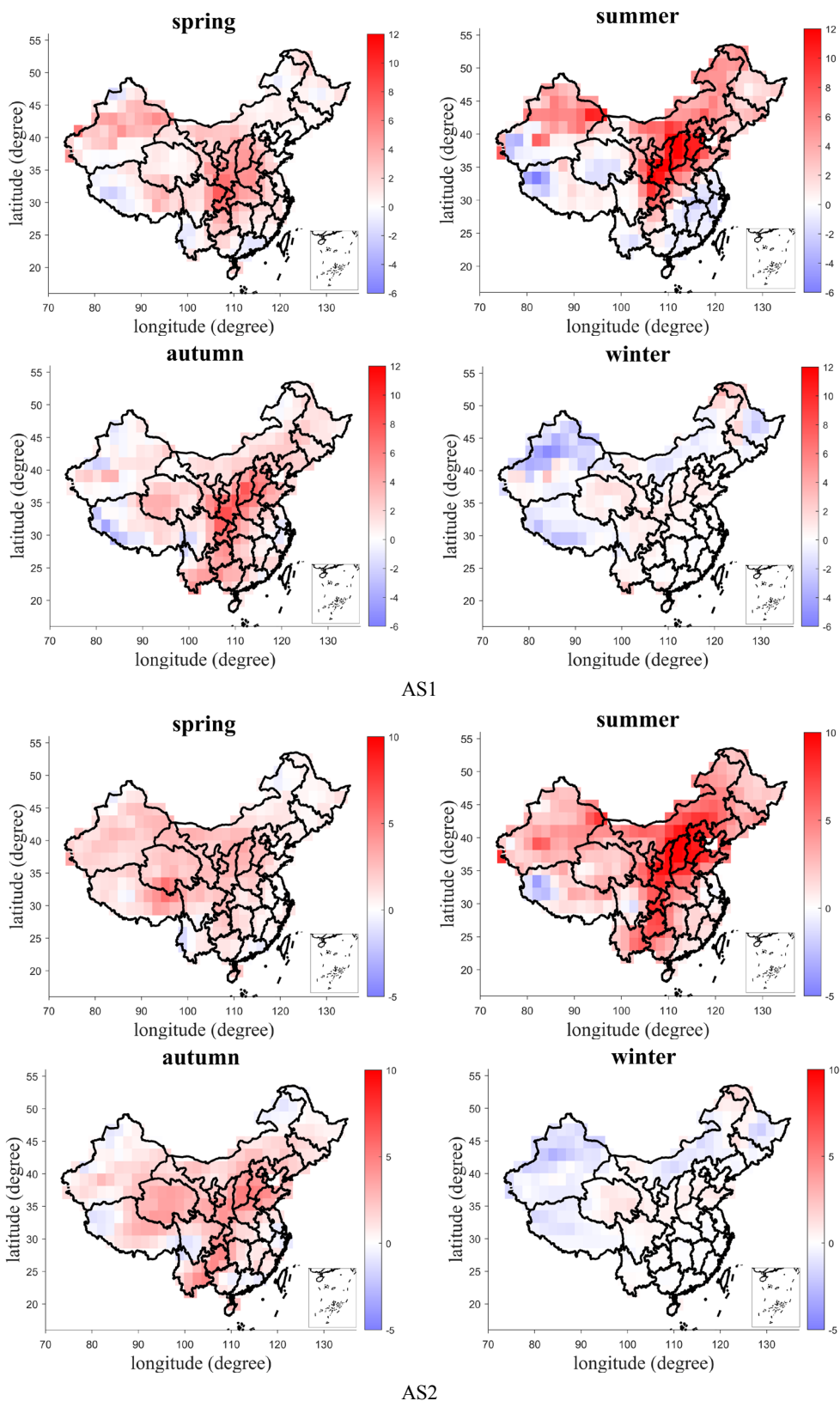
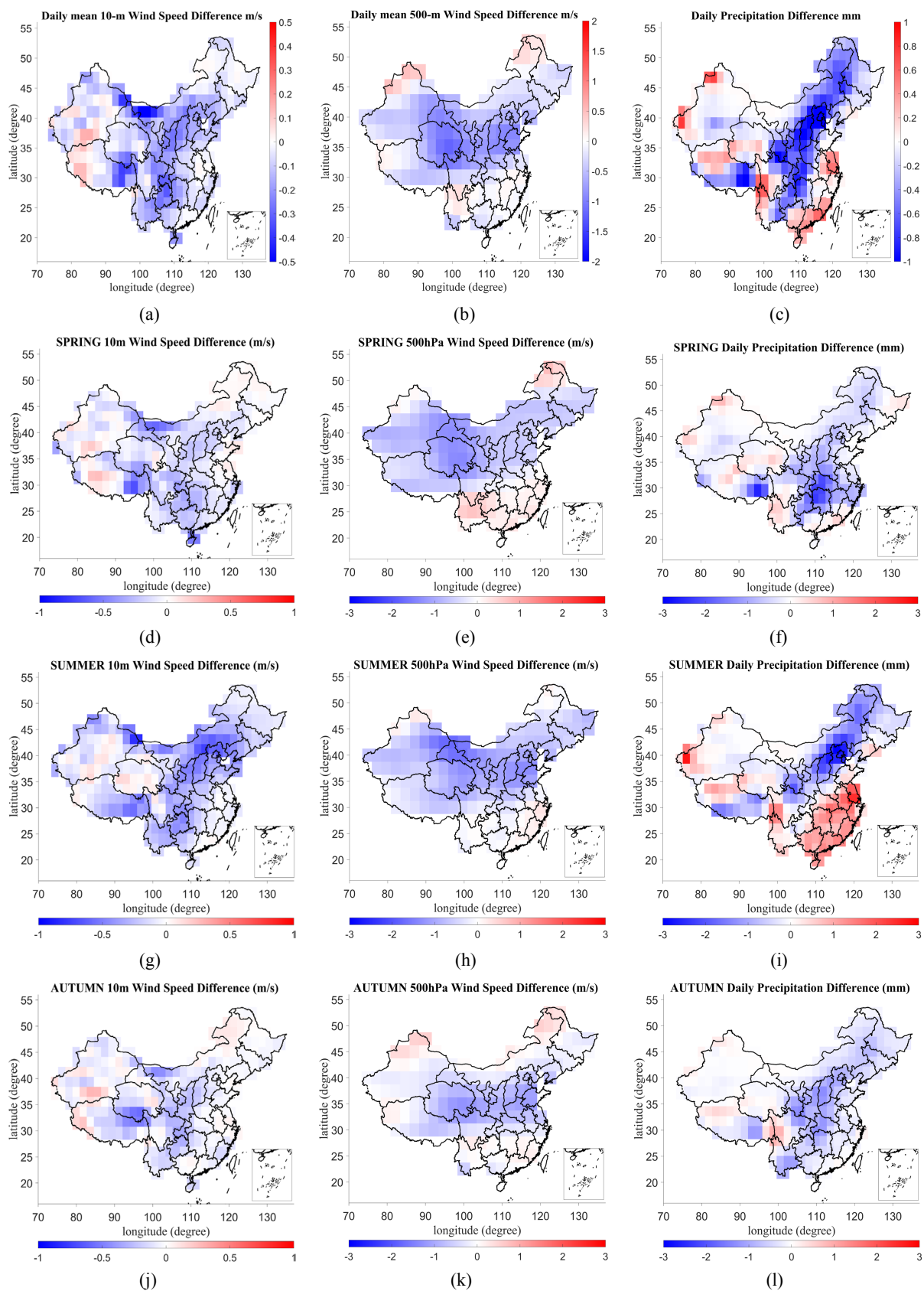


Figure 5. The seasonal distribution of AS1 and AS2
图 5. AS1 和 AS2 各季节的变化趋势分布



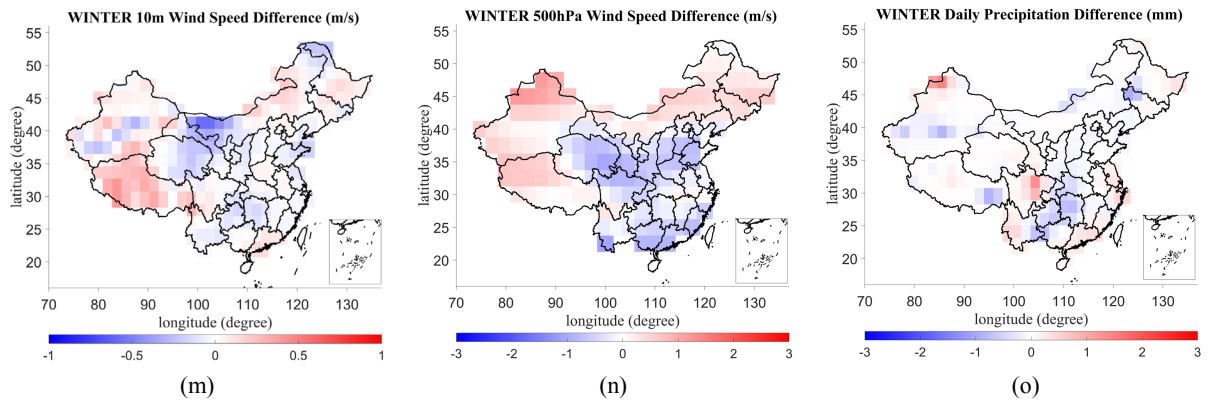
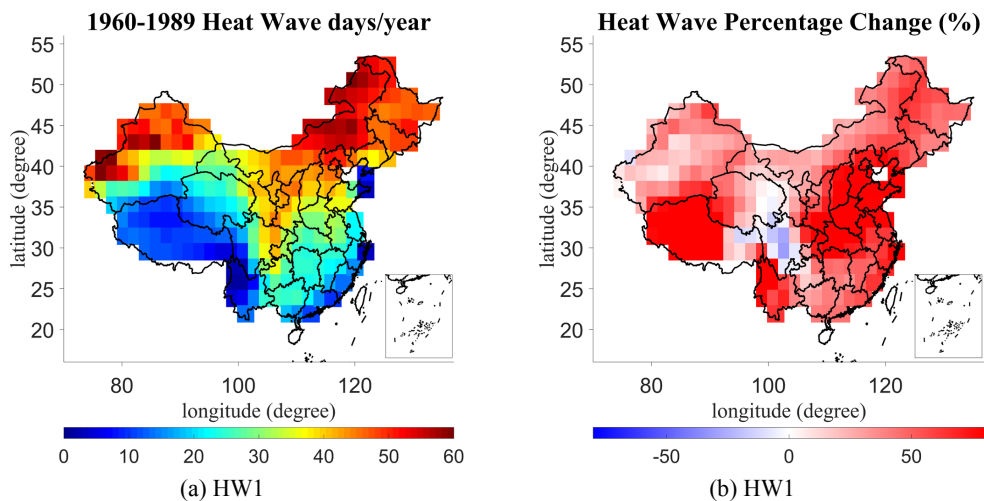


Figure 6. The annual difference between two periods and seasonal variation of the wind speed at 10 m (The Annual Average (a), Spring (d), Summer (g), Autumn (j), Winter (m)), the wind at 500 hPa (The Annual Average (b), Spring (e), Summer (h), Autumn (k), Winter (n)) and daily accumulated precipitation (The Annual Average (c), Spring (f), Summer (i), Autumn (l), Winter (o))

图 6. 10 米高度风速(年平均(a)、春季(d)、夏季(g)、秋季(j)、冬季(m))、500 hPa 高度风速(年平均(b)、春季(e)、夏季(h)、秋季(k)、冬季(n))和日累计降水量(年平均(c)、春季(f)、夏季(i)、秋季(l)、冬季(o))两个时段内的年均差值以及季节性变化

4.3. 热浪

图 7 显示了 HW1 和 HW2 在第一时段内中国各地的发生频率(图 7(a)、图 7(c))以及第二时段相对于第一时段的变化率(图 7(b)、图 7(d))。如图 7(a)所示,北部、东北部和西北部地区的 HW1 发生频率较高,最高可超过 60 天/年。中国南部、中部和东部地区 HW1 的发生频率较少,约在 20~30 天/年。图 7(c)显示我国北部和西北地区 HW2 的发生频率较高,而其他区域发生频率较低。而 HW2 的发生频率远低于 HW1 的发生频率,这是由于两者的定义不同,HW2 主要发生于高温季节(夏季)。而 HW1 和 HW2 在第二时段都体现出较第一时段的发生频率有明显增加。中国 HW1 的年均发生频率增加了 $53.9 \pm 2.9\%$, HW2 增加了 $85.9 \pm 6.6\%$ 。HW1 和 HW2 在京津冀、中部地区增加最明显,其中 HW1 在这些区域发生频率的增加超过了 90%, HW2 在这些区域的增加超过了 200%。图 8 为 HW1 和 HW2 近第二时段较第一时段各个季节发生频率的变化率,可以看出,HW1 于春、秋季在中国东部、中部的发生频率增长较多,夏季在京津冀地区增长较多,冬季则主要在青藏高原地区增长较多。HW2 则主要发生于夏季,春季较少,秋、冬季节几乎没有 HW2 的发生。HW2 的发生频率同样在夏季增长较多,主要位于北部和东北地区,春季则主要位于京津冀地区。除了气候变化等自然因素可导致热浪的发生频率增加,人为因素也不可忽略。中国热浪增



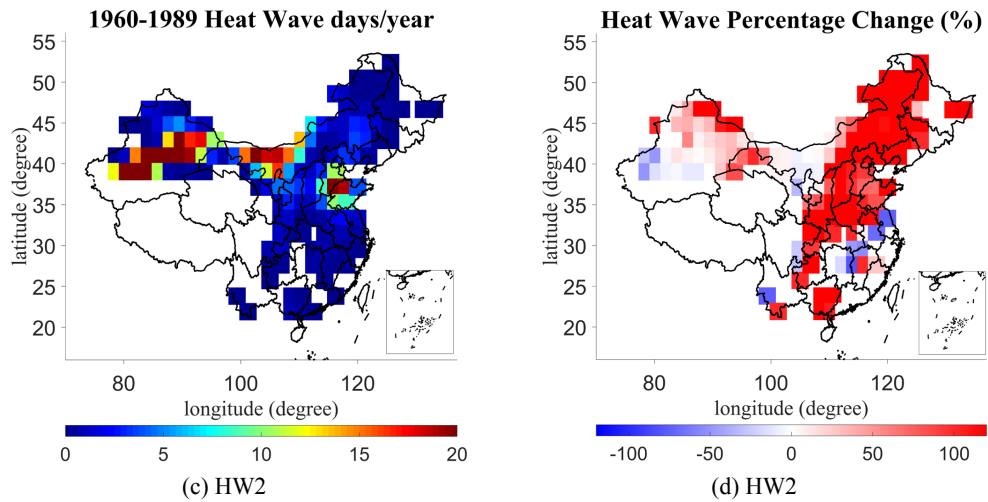
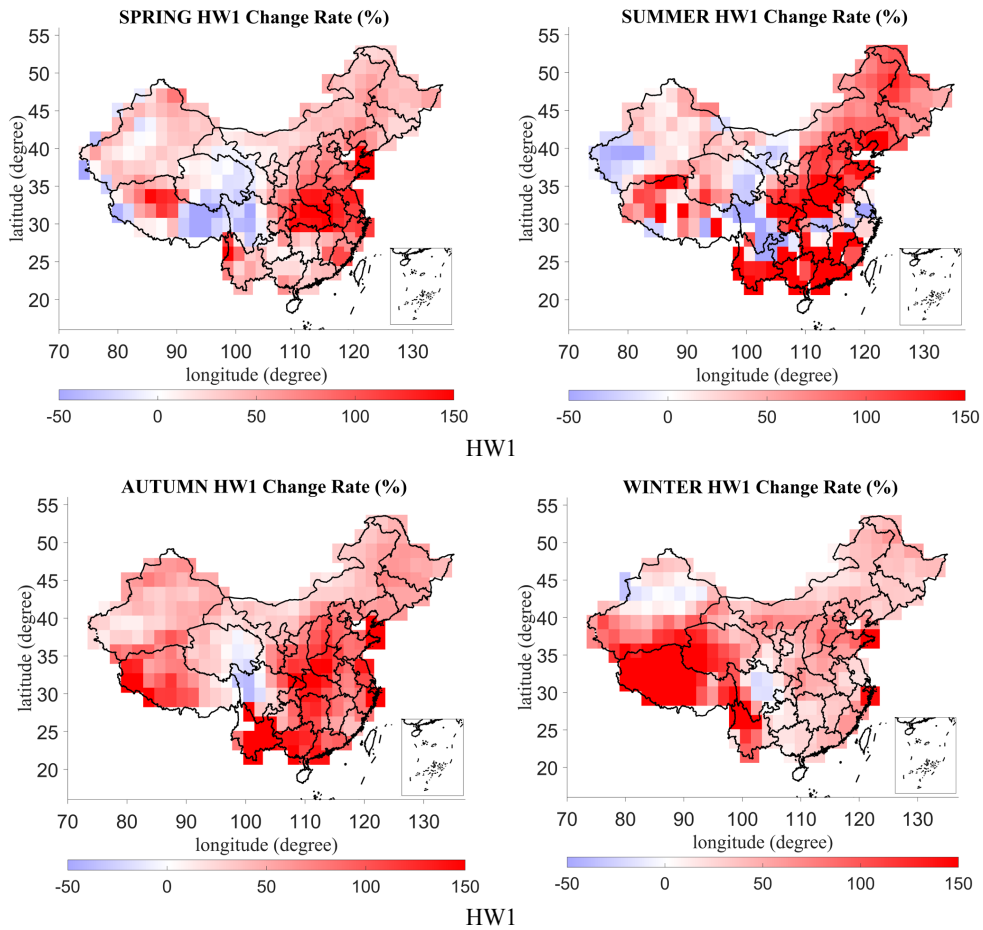


Figure 7. The frequency of HW1 and HW2 in the first period (a), (c) and the change rate of the second period relative to the first period (b), (d)

图 7. HW1 和 HW2 在第一时段内中国各地的发生频率(a)、(c)以及第二时段相对于第一时段的变化率(b)、(d)

加最明显的区域位于京津冀地区，这与该地区的城市发展、工业发展等有密切联系。城市的发展可导致明显的城市热岛效应，从而增加城市中心热浪发生的频率；工业发展则需要大量的化石燃料，化石燃料燃烧释放的热量、大气气溶胶污染导致的更多红外光被吸收等因素都可能导致更高频率的热浪的发生[7] [22]。



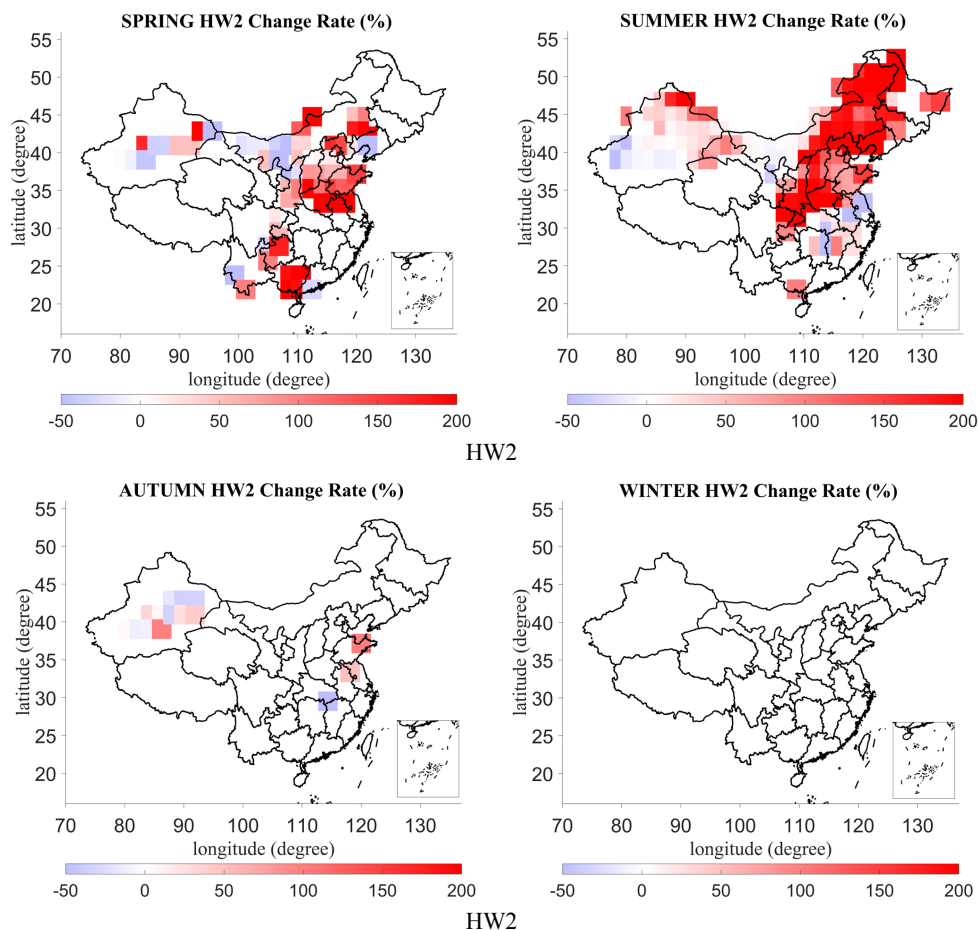


Figure 8. The change rate of HW1 (From left to right, it is spring, summer, autumn and winter) and HW2 (From left to right, it is spring, summer, autumn and winter) frequency in different seasons

图 8. HW1 (从左至右依次为春季、夏季、秋季、冬季)和 HW2 各个季节发生频率的变化率(从左至右依次为春季、夏季、秋季、冬季)

图 9(a)、图 9(c)显示了 HW1 和 HW2 在两时段内平均持续时间的差异分布。由图 9(a)所示, 中国近 30 年 HW1 的持续时间普遍延长, 平均延长 0.34 天。HW1 持续时间延长最多的是位于西藏南部地区, HW1 最高可延长 3 天以上, 平原地区在京津冀和中部地区有较明显的延长, 平均延长 0.40 天。HW1 的持续时间在南部地区以及四川省则显示略微的缩短, 平均缩短约 0.20 天。HW2 的持续时间延长相对更显著(图 9(c)), 全国平均延长 0.35 天。HW2 持续时间延长的区域主要位于黑龙江省北段, 最高可延长约 7 天。HW2 持续时间延长的地区主要集中在中国北部地区, 尤其是京津冀地区, 平均延长可达 0.75 天, 南部地区、中部地区和部分新疆地区有持续时间缩短的趋势, 平均缩短 0.55 天。图 9(b)、图 9(d)显示了 HW1 和 HW2 在两段时间内平均最高气温的距平分布。如图 9(b)所示, 105°E 以东地区 HW1 普遍有增温现象, 而西部地区普遍有降温现象。中国 HW1 最高气温平均升高 0.39 K, 最高升高 5.1 K, 最多降低 3.8 K。105°E 以东(包括中国北部、东北部、东部、中部和南部地区) HW1 最高气温平均升高 1.42 K, 中国西部地区(包括西北和西南地区) HW1 最高气温平均降低 1.19 K。HW2 的温度变化相对较小(图 9(d)), 全国平均最高气温上升 0.08 K, 京津冀地区和东部地区为 HW2 主要最高气温升高区域, HW2 最高气温平均升高 0.42 K。中国南方有部分地区 HW2 最高气温有明显下降趋势, 平均下降 0.54 K。

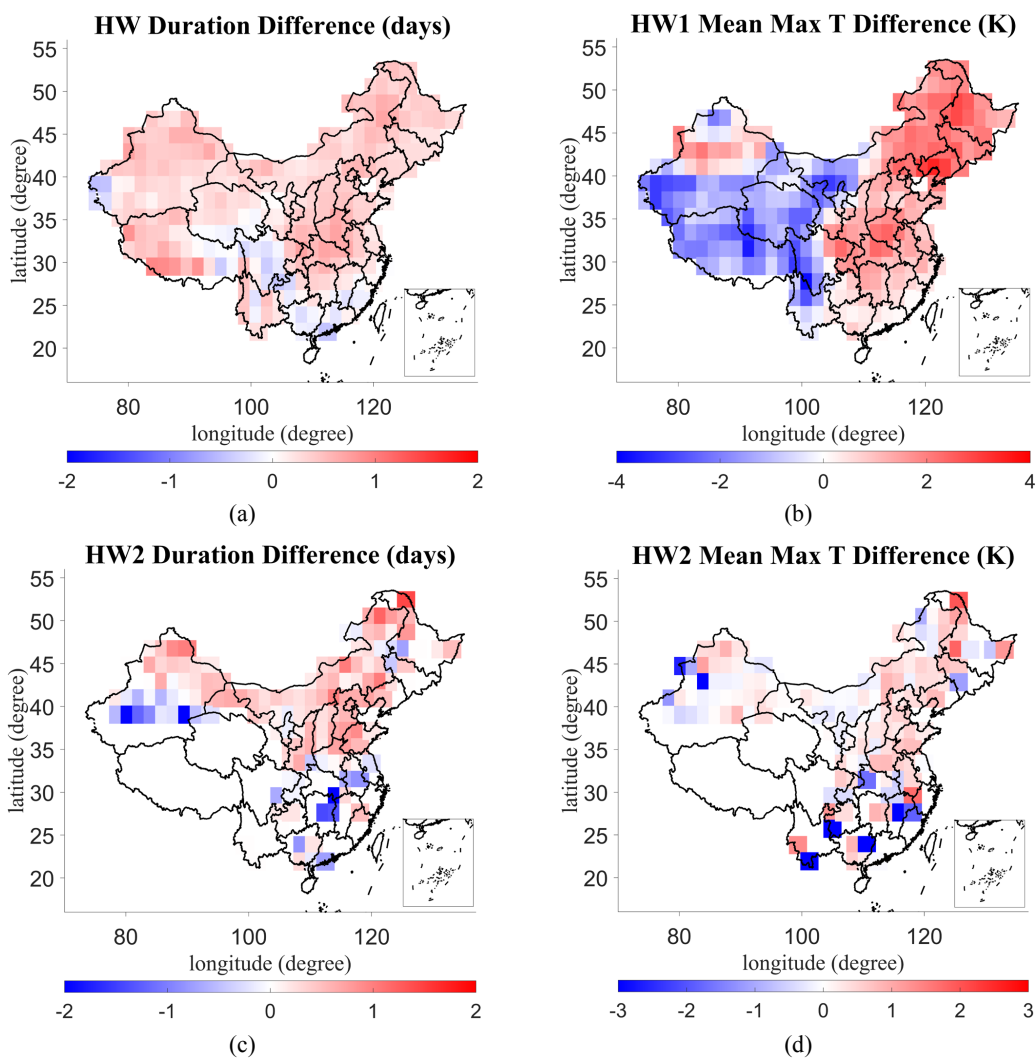


Figure 9. The difference distribution of the average duration of HW1 and HW2 between two periods (a), (c), and the anomalies of the average maximum temperature of HW1 and HW2 between the two periods (b), (d)

图 9. HW1 和 HW2 在两时段内平均持续时间的差异分布(a)、(c), HW1 和 HW2 在两段时间内平均最高气温的距平分布(b)、(d)

5. 总结

本文利用 NCEP/NCAR 气候再分析数据, 针对中国地区不同定义下的极端不利气象条件(逆温、大气静稳和热浪)近 60 年的演变特征及可能原因进行了分析, 为分析未来极端不利气象条件对空气质量潜在的影响提供了基础和依据。结果表明, 不同定义下的极端不利气象条件的演变趋势存在较强的相似性。各极端不利气象条件都显示了明显的增加趋势并且具有较明显的季节性差异, 其中, 大气静稳和热浪在京津冀地区增加明显, 说明大气静稳和热浪与城市化建设有较强关联。而逆温的增加则主要由气候变化等影响。各极端不利气象条件具体结论如下:

1) 逆温的发生频率主要受气候变化带来的加强的蒸散效应影响, 其次受近地面蒸发率影响。中国南部地区逆温频率的增加主要由加强的蒸散效应导致, 而内蒙古地区逆温频率的增加则主要由降低的近地面蒸发率导致。北部及东北地区由于两者作用相互抵消, 逆温发生频率未发生明显变化。

2) 大气静稳主要发生在新疆、内蒙和京津冀地区。北部和中部地区有明显增加趋势, 且增加趋势主

要在春、夏、秋三个季节。大气静稳发生频率的增高主要受削弱的东亚季风、减少的降水以及城市建设导致的近地面风速减弱影响。

3) 热浪主要发生在北部、新疆和东北部地区,尤其在京津冀地区最为显著。北部和东北部地区有明显的增加趋势。热浪的增加主要受气候变化和人为因素(城市建设、工业发展等)影响。热浪在不同定义下都表现出持续时间有所延长的特征。HW1 的定义下显示中国热浪的最高温度存在以 105°E 为界限的明显差异。105°E 以东主要表现为增温,以西主要表现为降温。而在 HW2 的定义下主要表现了轻微的南北差异,北方多增温南方多降温。

本研究尚有一些不足之处。首先,使用的 NCEP/NCAR 气候再分析数据时空分辨率较低,在拥有较大地形差异的中国会存在一定的不确定性。其次,极端不利气象条件的定义暂未考虑人类健康、空气质量等因素,仅从其物理化学特征进行了定义。

参考文献

- [1] Chan, C.K. and Yao, X. (2008) Air Pollution in Mega Cities in China. *Atmospheric Environment*, **42**, 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>
- [2] Wang, S.X., Zhao, B., Cai, S.Y., Klimont, Z., Nielsen, C.P., Morikawa, T., *et al.* (2014) Emission Trends and Mitigation Options for Air Pollutants in East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 6571-6603. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6571-2014>
- [3] Hu, J., Wang, Y., Qi, Y. and Zhang, H. (2014) Spatial and Temporal Variability of PM_{2.5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Environment*, **95**, 598-609. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.019>
- [4] Wang, P., Guo, H., Hu, J., Harsha Kota, S., Ying, Q. and Zhang, H. (2019) Responses of PM_{2.5} and O₃ Concentrations to Changes of Meteorology and Emissions in China. *Science of the Total Environment*, **662**, 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.227>
- [5] Zhang, X., Xu, X., Ding, Y., Liu, Y., Zhang, H., Wang, Y., *et al.* (2019) The Impact of Meteorological Changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} Mass Reduction in Key Regions in China. *Science China Earth Sciences*, **62**, 1885-1902. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9343-3>
- [6] Wang, H., Zhang, X., Peng, Y., Liu, H., Zhang, M., Zhang, M., *et al.* (2018) The Contributions to the Explosive Growth of PM_{2.5} Mass Due to Aerosols-Radiation Feedback and Further Decrease in Turbulent Diffusion during a Red-Alert Heavy Haze in Beijing-Tianjin-Hebei in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 17717-17733. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17717-2018>
- [7] Zhong, J., Zhang, X., Wang, Y., Sun, J., Zhang, Y., Wang, J., *et al.* (2017) Relative Contributions of Boundary-Layer Meteorological Factors to the Explosive Growth of PM_{2.5} during the Red-Alert Heavy Pollution Episodes in Beijing in December 2016. *Journal of Meteorological Research*, **31**, 809-819. <https://doi.org/10.1007/s13351-017-7088-0>
- [8] Ji, H., Shao, M. and Wang, Q. (2020) Contribution of Meteorological Conditions to Inter-Annual Variations in Air Quality during the Past Decade in Eastern China. *Aerosol and Air Quality Research*, **20**, 2249-2259. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.12.0624>
- [9] Julie, W., Denis, C. and Pavlos, K. (2010) Topographic and Spatial Impacts of Temperature Inversions on Air Quality Using Mobile Air Pollution Surveys. *Science of the Total Environment*, **408**, 5086-5096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.020>
- [10] Han, S.Q., Hao, T.Y., Zhang, Y.F., Liu, J.-L., Li, P.-Y., Cai, Z.-Y., *et al.* (2018) Vertical Observation and Analysis on Rapid Formation and Evolutionary Mechanisms of a Prolonged Haze Episode over Central-Eastern China. *Science of the Total Environment*, **616-617**, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.278>
- [11] Garrido-Perez, J.M., Ordonez, C., Garcia-Herrera, R. and Barriopedro, D. (2018) Air Stagnation in Europe: Spatiotemporal Variability and Impact on Air Quality. *Science of the Total Environment*, **645**, 1238-1252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.238>
- [12] Dawson, J.P., Bloomer, B.J., Winner, D.A. and Weaver, C.P. (2014) Understanding the Meteorological Drivers of U.S. Particulate Matter Concentrations in a Changing Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95**, 521-532. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00181.1>
- [13] Leibensperger, E.M., Mickley, L.J. and Jacob, D.J. (2008) Sensitivity of US Air Quality to Mid-Latitude Cyclone Frequency and Implications of 1980-2006 Climate Change. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, 7075-7086.

- <https://doi.org/10.5194/acp-8-7075-2008>
- [14] Robinson, P.J. (2001) On the Definition of a Heat Wave. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **40**, 762-775. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C0762:OTDOAH%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C0762:OTDOAH%3E2.0.CO;2)
- [15] Solberg, S., Hov, O., Sovde, A., Isaksen, I.S.A., Coddeville, P., De Backer, H., *et al.* (2008) European Surface Ozone in the Extreme Summer 2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, Article ID: D07307. <https://doi.org/10.1029/2007JD009098>
- [16] Steiner, A.L., Davis, A.J., Sillman, S., Owen, R.C., Michalak, A.M. and Fiore, A.M. (2010) Observed Suppression of Ozone Formation at Extremely High Temperatures due to Chemical and Biophysical Feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 19685-19690. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008336107>
- [17] Pu, X., Wang, T.J., Huang, X., Melas, D., Zanis, P., Papanastasiou, D.K., *et al.* (2017) Enhanced Surface Ozone during the Heat Wave of 2013 in Yangtze River Delta Region, China. *Science of the Total Environment*, **603-604**, 807-816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.056>
- [18] Horton, D.E., Harshvardhan and Diffenbaugh, N.S. (2016) Response of Air Stagnation Frequency to Anthropogenically Enhanced Radiative Forcing. *Environmental Research Letters*, **7**, Article ID: 044034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044034>
- [19] Hou, P. and Wu, S. (2016) Long-Term Changes in Extreme Air Pollution Meteorology and the Implications for Air Quality. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 23792. <https://doi.org/10.1038/srep23792>
- [20] Liu, J.K., Gao, Z.Q., Wang, L.L., Li, Y.B. and Gao, C.Y. (2017) The Impact of Urbanization on Wind Speed and Surface Aerodynamic Characteristics in Beijing during 1991-2011. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **130**, 311-324. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0519-8>
- [21] Chen, H.P. and Wang, H.J. (2015) Haze Days in North China and the Associated Atmospheric Circulations Based on Daily Visibility Data from 1960 to 2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**, 5895-5909. <https://doi.org/10.1002/2015JD023225>
- [22] Zhuang, B.L., Wang, T., Liu, J., Che, H., Han, Y., Fu, Y., *et al.* (2018) The Optical Properties, Physical Properties and Direct Radiative Forcing of Urban Columnar Aerosols in the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 1419-1436. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1419-2018>