1961~2017年中国地区热浪的结构变化

安宁¹, 左志燕^{2,3*}

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

2. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438;

3. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

* 通讯作者, E-mail: zuozhy@fudan.edu.cn

收稿日期: 2020-11-14; 收修改稿日期: 2021-03-03; 接受日期: 2021-04-23; 网络版发表日期: 2021-07-19

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFA0601502)和国家自然科学基金项目(批准号: 41822503、41375092)资助

摘要 尽管现有研究中普遍存在人为区分白天和夜间极端高温的做法,但实际上它们并不是完全独立的,可能同步或连续发生.考虑到它们的潜在先后顺序,本研究把连续的白天或夜间极端高温过程认定为一次完整的热浪过程,并研究1961~2017年间中国地区热浪过程中白天和夜间极端高温的发生率及发生次序的变化.结果表明,82%的热浪为既包含白天也包含夜间极端高温的复合型热浪,仅7%(11%)为只包含白天(夜间)极端高温的纯白天型(夜间型)热浪.复合型热浪过程中,白天高温常常领先夜间高温一天或几天出现,这符合热浪过程中气象和辐射条件的变化,比如逐日增加的云量和近地面空气湿度以及减少的太阳辐射.1961~2017年,复合型热浪数量增幅最大,呈0.44次每十年的显著趋势.纯白天型热浪的变化趋势不显著,为0.00次每十年;而纯夜间型热浪显著增加,趋势为0.09次每十年.复合型热浪过程中夜间极端高温出现得更早结束得更晚,并且昼夜同步极端高温天的天数增加显著,趋势为0.20天每十年.特别地,城市相对于乡村地区受到愈加频繁且持续时间越来越长的复合型热浪影响,昼夜同步极端高温天天数也越来越多,而这种白天到夜间持续性的热浪过程有着更严重的影响.本研究为研究人员选择合适的热浪指数提供了指导和依据.

关键词 热浪, 昼夜同步, 城市化, 气象条件

1 引言

近几十年来,极端温度的变化反映了日益显著的全球气候变暖现象(Alexander等, 2006).从20世纪中期开始,在大部分陆地地区日最高温和最低温的极端值都显著增加(Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013),并且在所谓的全球变暖停滞期增加也未停止(Seneviratne等, 2014).与此同时,热浪即

持续性的极端高温天气,其频率和持续时间在世界范围内都呈现出增加的趋势(IPCC, 2013).热浪造成的伤亡人数急剧增加(World Meteorological Organization (WMO), 2013),并且对生态系统和基础设施资产构成威胁,造成巨大的经济损失(Klinenberg, 2003; Ciais等, 2005; Ruthrof等, 2018; 朴世龙等, 2019),当前已成为公众关注的重要问题之一.

尽管已有大量的研究,热浪的定义并未形成统一

中文引用格式: 安宁, 左志燕. 2021. 1961~2017年中国地区热浪的结构变化. 中国科学: 地球科学, 51(8): 1214~1226, doi: 10.1360/N072020-0380

英文引用格式: An N, Zuo Z. 2021. Changing structures of summertime heatwaves over China during 1961~2017. Science China Earth Sciences, 64(8): 1242~1253, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9776-3>

的标准. 很多研究仅使用单一变量来定义热浪, 比如日最高温, 通常出现在白天午后, 或者日最低温, 通常出现在凌晨时段(Bador等, 2017; You等, 2017; Oswald, 2018; Ren等, 2020). 最近的一些研究使用双变量, 即连续多天日最高温和日最低温都高于既定阈值来定义热浪(Kuglitsch等, 2010; Chen和Li, 2017; Freychet等, 2017). 一些研究进一步限制白天极端高温和夜间极端高温出现存在一定顺序(Cowan等, 2014; Oswald和Rood, 2014), 比如Cowan等(2014)要求白天极端高温至少连续出现三天, 而极端夜间高温在第二天和第三天出现. 鉴于以上多样的热浪定义, 我们检验了中国地区气象台站观测到的热浪过程. 以北京市为例(图1), 有的热浪过程只包含白天极端高温(图1a), 有的热浪过程只包含夜间极端高温(图1b), 而有的热浪过程既包含白天也包含夜间极端高温, 并且白天和夜间高温出现存在一定的时次顺序(图1c和1d). 因此, 并不存在一个能适用于所有热浪的定义. 人为地使用不同定义提取热浪过程可能得到不同的结论.

在描述热浪过程时, 分别定量描述白天和夜间极端高温是更为精确且有实际意义的(Gershunov等, 2009). 白天极端高温可能造成中暑并加剧地表臭氧污染(Filleul等, 2006; Gosling等, 2009; Pu等, 2017). 夜间极端高温使人们身体无法在夜间得到恢复, 可能造成失眠和温度调节异常(Le Tertre等, 2006; Gosling等, 2009; Fischer和Schär, 2010). 也有研究发现, 夜间高温可能造成农作物的减产(Bahuguna等, 2017). 既有白天也有夜间极端高温的热浪事件的危害可能更大(Nairn和Fawcett, 2013; Wang等, 2020), 历史上最具破坏性的热浪事件都既有白天也有夜间极端高温, 比如1995年的芝加哥热浪(Kunkel等, 1996)、2003年的欧洲热浪(Trigo等, 2005)以及2010年的俄罗斯热浪(Barriopedro等, 2011).

白天和夜间极端高温间的关系既不一致也不互斥. 造成白天和夜间高温的物理机制与陆气相互作用和气象条件有关. 一方面, 白天积累在边界层内的热量, 可以通过残留层保存至夜间, 所以白天高温可以持续至夜间(Chen和Lu, 2014; Miralles等, 2014). 城市下垫面如沥青、混凝土等, 白天吸收太阳辐射, 夜间以长波辐射的形式缓慢释放. 该过程使得城市地区相对于乡村维持更高的夜间温度, 并被称为城市热岛效应(Oke, 1982). 另一方面, 在干燥的气象条件下, 常常云

图1 北京地区的热浪观测个例(台站编码: 54511)

红色实线和点划线分别为日最高温和其90th分位数的时间序列, 蓝色实线和点划线分别为日最低温和其90th分位数的时间序列. (a)~(d)分别为1962年6月12日至7月12日、2004年7月1日至8月1日、2009年8月1日至9月1日和2010年7月1日至8月1日时间段. 热浪过程由阴影表示

量少(太阳向下短波辐射增强)且有下沉运动(绝热增温), 白天温度较高, 但夜间辐射冷却作用也较强, 因而夜间温度较低. 在湿润的气象条件下, 较强的向下长波辐射造成夜间温度较高, 而白天由于增加的云量和反照率, 温度较低(Gershunov等, 2009; Bumbaco等, 2013; Hong等, 2018). 因此, 白天和夜间极端高温可能同时出现, 也有可能独立出现.

不同于以往的研究, 在一个既定的定义下研究热浪的频次、持续时间和强度, 本研究更关注热浪结构, 也就是热浪过程中白天和夜间极端高温的发生率和配置结构的变化. 我们定义一个完整的热浪过程为连续的白天或夜间极端高温过程, 并考虑了三个主要问题: (1) 1961~2017年中国热浪过程中白天和夜间高温的发生率是否发生了变化? (2) 在既发生白天也发生夜间极端高温的复合型热浪中, 白天和夜间极端高温更容易同步发生, 还是有一定的先后顺序? (3) 城市化和气象条件的变化怎样影响热浪的结构?

2 数据与方法

本研究主要关注夏季(6~8月)的热浪过程. 我们使用了约2400台站的2m日最高温、日最低温、低云量、总云量、太阳辐射和6h定时观测(北京时0200、

0800、1400、2000)的气温、气压和相对湿度数据. 6h定时观测数据用于计算日平均比湿(q). 所有数据来源于中国气象局国家气象信息中心. 这些数据是当前最新版本, 并通过了严格的监督和质量控制(Cao等, 2016), 包括等纠正可疑和错误的的数据、异常值检测和一致性检查(内部、时间和空间).

除了上述的数据质量控制过程, 该数据集并未校正由非气候因素造成的数据不一致问题, 比如站点迁移、自动化仪器更换以及观测规范改变等. 依据Cao等(2016), 站点迁移是造成温度数据出现突变点的主要因素. 因此, 本文还限制了其他条件来选择站点(Chen和Li, 2017): (1) 保留1961~2017年间站点迁移在20km且垂直高度位移在50m以内的站点; (2) 保留有充足日最高温、日最低温观测的站点, 即日最高温和日最低温在1961~2017年每年的缺测值均小于5%(4天); (3) 保留有充足低云量、总云量、太阳辐射和比湿的日数据的站点, 即年缺测值小于11%(10天)的年份不少于50年. 由于本研究的热浪过程由日最高温和日最低温判定, 因此它们标准比其他变量更为严格. 不满足上述条件的站点予以剔除. 经过以上步骤, 共筛选出1051个站点满足条件的站点. 筛选站点在中国东南部更密集, 而在中国西北部以及东北北部较稀疏(图2). 在青藏高原基本上没有满足条件的站点, 但由于青藏高原海拔较高且人口稀少, 这里一般很少发生有影响力的高温热浪事件, 故不是本研究的重点.

为了研究城市化作用, 我们将筛选的1051个站点分为城市和乡村站点. 划分依据美国国防气象卫星计划(DMSP)/运行线扫描系统(OLS)的卫星夜间灯光数据2013的版本(DMSP, 2013). 该数据空间分辨率为30角秒, 数值为0~63的整数, 数值越大表示灯光指数越强. 过去的研究在中国地区大多使用15~30的数值作为阈值来划分城乡站点(Cao等, 2009; Tan, 2015; Ye等, 2018; Wang等, 2019). 为了使研究覆盖更多的面积且保证每个 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点内既包含城市也包含乡村站, 本研究将阈值设为25. 划分的896个城市和155个乡村站点位置如图2所示.

本研究中, 极端白天(夜间)高温被定义为日最高温(日最低温)超过了长期气候态的90th分位值, 依据气候变化与监测指数专家团队(ETCCDI, 详见http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)的定义, 表示为TX90p/TN90p. 从6月1日至8月31日的每一天, 其日

图2 1051个站点的空间分布图和划分的 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点
蓝点, 155个郊区站点; 红点, 896个城市站点

最高温/日最低温的90th分位阈值由1961~1990年的30年, 该天前7天(共15天)的窗口, 即 $15 \times 30 = 450$ 个样本量的样本确定(Chen和Zhai, 2017). 本研究将一个完整的热浪过程定义为超过3天的连续白天或夜间极端高温. 要求热浪过程中出现白天或夜间极端高温是因为观测事实显示白天或夜间极端高温并不是完全同步出现(图1c和1d). 热浪的持续时间为完整的热浪过程所包含的天数.

我们定义了三种类型的热浪: (1) 纯白天型热浪, 该热浪的完整过程中只包含白天极端高温; (2) 纯夜间型热浪, 该热浪的完整过程中只包含夜间极端高温; (3) 复合型热浪, 该热浪的完整过程中既包含白天也包含夜间极端高温.

从健康卫生学角度看, 白天高温紧接着后续夜间高温, 比白天高温但后续夜间凉爽对人体健康更有危害, 因为人们无法在夜间得到充分的恢复(Murage等, 2017). 因此我们继续定义了三种高温天(Chen和Zhai, 2017): (1) 独立白天极端高温天(只有白天热), 一天中白天温度超过90th分位阈值但后续夜间温度未超过90th分位阈值; (2) 独立夜间极端高温天(只有夜间热), 一天中白天温度未超过90th分位阈值但后续夜间温度超过90th分位阈值; (3) 昼夜同步极端高温天(白天夜间均热), 一天中白天温度超过90th分位阈值且后续夜间温度也超过90th分位阈值.

很明显, 纯白天型热浪只含有独立白天极端高温天, 而纯夜间型热浪只含有独立夜间极端高温天. 只有复合型热浪可能含有这三种高温天. 因此本研究主要分析复合型热浪中这三种高温天数量的变化.

其他的变量, 比如太阳辐射、低云量、总云量和比湿, 主要用于解释辐射与气象条件的影响. 太阳辐射数据基于观测的日照时数数据. 通过Yang等(2001)开发的混合模型计算得到. 据国家信息中心, 基于日照时数的太阳辐射数据与仪器观测的太阳辐射数据相比, 有着 $0.0117 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 的平均绝对偏差和 $2.44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 的均方根误差(Liu和Ren, 2016). 本研究使用日照时数计算的太阳辐射是因为太阳辐射的仪器观测在中国地区站点稀疏, 且存在着由仪器更换和灵敏度漂移等带来的不均一性问题(He等, 2018). 低云量和总云量由观测员在世界气象组织规定指导下人工观测(WMO, 1974). 使用该数据是因为在研究时间段内没有其他可以替代的仪器云观测, 并且该套人工观测云量数据已经被用到研究中并成功地解释一些长期的气候变化(Xue等, 2019). 中国地区人工测云在2013年后随着自动气象站的建设而逐渐停止. 因此, 本研究对低云量和总云量的分析都截至到2013年.

我们对所有变量(日最高温、日最低温、比湿、低云量、总云量和太阳辐射), 将夏季(6月1日到8月31日)每天的数值减去该天在1961~1990对应天(共30天)的平均值, 得到每个变量每天的距平值. 为了减少空间不均一性的影响, 对于一个特定的变量, 其全国平均值由以下步骤计算得到: 首先将每个 $5^\circ \times 5^\circ$ 格点内站点数值进行平均, 然后计算36个有效格点的面积加权平均

值得到全国平均. 城市和乡村的全国平均值分别来源于 $5^\circ \times 5^\circ$ 格点内的城市站和乡村站. 本研究使用最小二乘法拟合线性趋势, 用双尾 t 检验线性趋势的显著性, 显著水平为0.05.

3 结果与分析

3.1 三种热浪的特征与趋势

图3显示了三种热浪夏季的平均出现频次和持续时间. 很明显, 复合型热浪相比于纯白天型热浪和纯夜间型热浪有着更多的频次和更长的持续时间. 每年夏季, 中国地区平均发生2.2次复合型热浪, 占了所有热浪频次的82%; 而纯白天型热浪平均发生0.2次, 纯夜间型热浪平均发生0.3次, 分别占了所有热浪频次的7%和11%. 复合型热浪的平均持续时间为4.8天, 而纯白天型和纯夜间型热浪的持续时间均为3.5天. 这些结果说明大部分热浪均表现为有白天极端高温也有夜间极端高温, 而单纯只有一种高温的热浪事实上是较少发生的. 这可能与在白天积累的热量可以通过边界层作用保留至夜间有关. 除此之外, 纯白天和夜间型热浪较短的持续时间说明这两种热浪也不如复合型热浪影响强.

1961~2017年中国地区整体上纯白天型热浪频次并没有显著的变化趋势(0.00次每十年), 尽管极少部分

图3 1961~2017年夏季(6~8月)中国地区三种热浪的平均数量(次)和平均持续时间(天)

(a), (d) 纯白天型热浪; (b), (e) 纯夜间型热浪; (c), (f) 复合型热浪

地区有显著变化趋势(图4a)。纯夜间型热浪在大部分地区都显著增加, 全国整体有着0.09次每十年的变化趋势(图4b)。复合型热浪的数量增加最为明显, 为0.44次每十年, 且在绝大部分地区均显著(图4c)。城市和乡村的纯白天热浪数量变化趋势相反, 虽然在两种类型的地区都没有通过显著性检验(图4d)。城市地区的降低趋势可能是因为城市热岛效应在夜间更为显著, 所以城市地区更不容易发生没有夜间高温的热浪事件。对于纯夜间型热浪(图4e), 城市地区的增加趋势(0.09次每十年)比乡村地区略高(0.08次每十年)。而对于复合型热浪, 城乡差异最为明显。城市地区增加趋势为0.46次每十年而乡村地区增加趋势为0.35次每十年(图4f)。

对于热浪持续时间(图5a~5c), 纯白天型热浪总体变化趋势不显著(0.00天每十年), 而纯夜间型热浪以0.09天每十年的速度增加, 复合型热浪增加趋势最大, 为0.31天每十年。城市和乡村地区纯白天型热浪持续时间同样有着反向但均不显著的趋势(图5d)。如图5e所示, 纯夜间型热浪的持续时间在城市略低但增加趋势(0.09天每十年)高于乡村(0.07天每十年)。复合型热浪持续时间在城市地区增加趋势(0.31天每十年)远大于乡村地区(0.27天每十年)。以上分析表明, 既有白天

高温又有夜间高温的复合型热浪是热浪最主要的类型, 且在1961~2017年间其数量和持续时间都经历了最快速的增长。在20世纪60年代, 每年夏季平均发生1.5次复合型热浪。而到了21世纪10年代, 复合型热浪增长至3.4次, 并且在城市地区(3.5次)明显比乡村地区(3.0次)多。因此, 后面的分析中我们着重关注复合型热浪的结构和变化特征。

3.2 复合型热浪的结构特征

这一部分我们主要分析了复合型热浪中白天和夜间极端高温的发生次序。如图1c和1d所示, TX90p和TN90p可能不完全在同样的日期出现。热浪期间第一个TX90p比第一个TN90p滞后天数, 即第一个TX90p的发生日期减去第一个TN90p的发生日期, 其统计结果如图6a和6c所示。同样的, 热浪期间最后一个TX90p比最后一个TN90p滞后天数的统计结果如图6b和6d所示。图6a和6b为TX90p滞后TN90p天数平均值的空间分布。可以看到, 在全国大部分地区, TN90p基本滞后于TX90p出现, 除了最南端的 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 网格。在中国东部的部分地区, 第一个TN90p并没有明显地滞后于第一个TX90p(图6a)。在中国西北部地区, TN90p可能滞后于TX90p两天出现。TN90p滞后于TX90p的天数在中国西

图4 1961~2017年中国地区热浪数量的十年趋势(次每十年)的空间分布((a)~(c))以及热浪数量在城市(红色)和乡村(蓝色)地区的时间序列((d)~(f))

(a), (d) 纯白天型热浪; (b), (e) 纯夜间型热浪; (c), (f) 复合型热浪。 (a)~(c)中符号“+”表示该 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点的趋势通过了95%置信区间的双尾 t 检验。 (d)~(f)中的文字表示城市和乡村地区的趋势, 相应的显著性检验列于括号内

图 5 1961~2017年中国地区热浪持续时间十年趋势(天每十年)的空间分布((a)~(c))以及浪持续时间变化在城市(红色)和乡村(蓝色)地区的时间序列((d)~(f))

(a), (d) 纯白天型热浪; (b), (e) 纯夜间型热浪; (c), (f) 复合型热浪. (a)~(c)中符号“+”表示该 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点的趋势通过了95%置信区间的双尾 t 检验. (d)~(f)中的文字表示城市和乡村地区的趋势, 相应的显著性检验列于括号内

图 6 复合型热浪中TX90p滞后TN90p天数(TX90p发生日期-TN90p发生日期)的空间特征((a), (b))和频率分布((c), (d))

(a), (c) 复合型热浪中第一个TX90p滞后于第一个TN90p天数的统计结果; (b), (d) 复合型热浪中最后一个TX90p滞后于最后一个TN90p天数的统计结果

北部比东南部更大。

图6c展示了在城市和乡村, 第一个TX90p较第一个TN90p滞后天数的频率分布图。可以看到, TX90p出

现在TN90p前的概率(56%)要大于TX90p出现在TN90p之后的概率(26%)。当TX90p滞后TN90p为-1天时也就是TX90p领先TN90p一天出现的频率最大, 为27%。可

能原因是白天积累在边界层中的热量可以通过边界层作用保留至夜间,造成更多的昼夜同步极端高温.对于热浪期间最后一个TX90p和最后一个TN90p,也是TX90p结束早于TN90p的频率(56%)要大于TX90p结束晚于TN90p的频率(18%),且频率分布在TX90p早于TN90p 1天时最大(35%).

城市和乡村的频率分布基本一致,仅有少量差异.热浪期间第一个TX90p滞后TN90p时间为正时,城市地区的分布频率比乡村地区略高(图6c),而当最后一个TX90p滞后TN90p时间为负时,城市地区的分布频率比乡村地区略高(图6d).这表明城市地区比乡村地区TN90p开始时间较早而结束时间较晚.这一现象是合理的,因为城市地区通常夜间温度较高.然而城市热岛效应和边界层过程无法解释TN90p滞后于TX90p多天以上的频率依然较高的现象(图6c和6d).

为了解释上述现象,我们展示了复合热浪期间气象和辐射条件,如日最高温、日最低温、比湿、低云量、总云量和太阳辐射距平的演变(图7),其中所有变量都对不同持续时间的热浪过程(3~9天)做了平均.可以看到,在整个热浪过程,日最高温距平在热浪早期有所上升,而在后期有所下降,而日最低温距平在整个热浪过程一致增加并在后期维持在高值.这可以被气象和辐射条件(图7c~7f)所解释.热浪前期云量较少所以

白天太阳辐射较强,因此日最高温有所增加,到了后期白天太阳辐射减小因此日最高温有所下降(图7d~7f).热浪后期,增加的云量和近地面水汽(如图7c中的比湿)加强了向下长波辐射,造成日最低温在后期较高.因此,TN90p可能滞后TX90p好几天出现,就像图1c中所例子.TN90p滞后于TX90p在中国西北地区时间更长,可能原因是近地面水汽和云量在西北地区均低于东南地区(Dai, 2006; Jin等, 2009),所以水汽和云的长波辐射效应在热浪早期不强.

我们也计算了当热浪过程中TX90p滞后于TN90p出现时,对应的气象和辐射条件的演变(图8).平均来说,只有18%的复合型热浪其第一个和最后一个TX90p均分别滞后于第一个和最后一个TN90p.相对于图7,图8中的各变量的日变化波动更大,这可能是由于相对较少的样本量造成.然而依然可以明显地看到,图8中各变量的演变与图7相反.在整个热浪过程中,比湿、低云量和总云量均有所降低,而太阳辐射有所增加,因而造成日最高温在后期较高而日最低温在前期较高.以上结果说明气象和辐射条件,对热浪中TX90p和TN90p的出现有明显的调节作用.需要注意的是,由于单次事件中气团活动以及云量变化有其特殊性,每个特定热浪事件,其各个变量的变化并不完全与图7所示的普遍状况一致.

图7 1961~2013年间中国地区日最高温距平(a)、日最低温距平(b)、比湿距平(c)、低云量距平(d)、总云量距平(e)、太阳辐射距平(f)在不同持续时间(从3~9天)的热浪过程中的日变化

图 8 与图7相同但仅限于TX90p滞后于TN90p的复合型热浪

3.3 复合型热浪结构的变化

第一个TX90p与TN90p滞后时间的趋势与最后一个TX90p与TN90p滞后时间的变化趋势在1961~2017年是相反的(图9). 第一个TX90p与TN90p滞后时间的趋势在除西南部分地区外大部分中国地区是正的(图9a). 城市地区的趋势(0.08天每十年)要大于乡村地区(0.0天每十年), 且均显著(图9c). 最后一个TX90p与TN90p滞后时间的趋势在中国大部分地区是负的, 且城市(-0.08天每十年)和乡村(-0.09天每十年)差别不大. 这一结果说明, 在1961~2017年复合型热浪中, 夜间高温开始出现的时间越来越早且结束时间越来越晚, 说明热浪更容易在夜间出现.

在复合型热浪中, 三种高温天的个数的变化如图10所示. 平均来说, 整个复合型热浪过程包含1.4天的独立白天极端高温天, 1.6天的独立夜间极端高温天和1.9天的昼夜同步极端高温天. 三种高温天的个数有一定空间差异性(图10a~10c), 比如独立夜间高温个数在东南地区比西北地区高. 在1961~2017年复合热浪中独立白天极端高温天的个数变得越来越少(图10d), 趋势为-0.04天每十年($p=0.03$), 但在乡村趋势不显著(图10d). 复合热浪中独立夜间极端高温天的个数在全国范围内有所增加, 趋势显著为0.15天每十年, 且城乡差别不大, 分别为0.15天每十年和0.14天每十年(图10e和

10h). 在绝大部分地区, 复合热浪中昼夜同步极端高温天增加显著, 全国平均趋势为0.20天每十年, 且城市地区的趋势(0.20天每十年)远大于乡村地区(0.14天每十年). 在20世纪60年代, 复合型热浪中平均有1.6天的同步昼夜高温天, 而到了21世纪10年代, 则平均有2.5天. 这些结果与图9所示结果是一致的, 说明热浪期间发生了更多的夜间高温, 独立白天极端高温天被独立夜间极端高温天和昼夜同步高温天所替代.

4 讨论

本研究中城市和乡村分析是由 $5^\circ \times 5^\circ$ 格点内的城乡站点数据得到的. 该网格较为粗糙, 主要为了囊括更多的站点, 从而覆盖更多的研究区域. 为了检验研究结果是否依赖于划分方法, 本研究对格点精度进行了敏感性实验, 使用更细的网格比如 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (网络版附图S1~S3, <http://earthcn.scichina.com>)和 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格(图S4~S6). 越精细的网格, 越难满足网格内既有城市又有乡村站点(附图S1和S4). 虽然不同的实验结果其数值和趋势有所差别, 但是差距很小且不会影响本文的主要结论(附图S2、S3、S5和S6), 比如复合型热浪和纯夜间型热浪在1961~2017年增长显著, 而纯白天型热浪变化趋势不显著; 城市地区复合型热浪和昼夜同

图9 复合型热浪中TX90p滞后TN90p天数(TX90p发生日期-TN90p发生日期)的十年趋势空间分布((a), (b))及时间序列((c), (d))

(a), (c) 复合型热浪中第一个TX90p滞后于第一个TN90p趋势的统计结果; (b), (d) 复合型热浪中最后一个TX90p滞后于最后一个TN90p趋势的统计结果. (a), (b) 符号“+”表示该 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点的趋势通过了95%置信区间的双尾 t 检验; (c), (d)中的文字表示城市和乡村地区的趋势, 相应的显著性检验列于括号内

图10 1961~2017年中国地区复合型热浪中独立白天极端高温天(最左列)、独立夜间极端高温天(中间列)和昼夜同步极端高温天(最右列)的平均个数((a)~(c))、十年趋势((d)~(f))和时间序列((g)~(i))

(d)~(f)中符号“+”表示该 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格点的趋势通过了95%置信区间的双尾 t 检验, (g)~(i)中的文字表示城市和乡村地区的趋势, 相应的显著性检验列于括号内

步极端高温天数增加趋势远大于乡村地区。

本研究目的并不是为了给出一个标准的热浪定义, 而是为了给相关研究人员在选择热浪定义时提供一个参考, 并了解不同的定义的限制性。比如, 如果使用基于TX的定义的热浪, 研究人员应注意除了热浪在数量和持续时间上的变化, 白天高温更多地伴随着夜间高温一同出现, 这种同步昼夜高温对人体健康影响更严重。除此之外, 基于TX提取和基于TN提取的热浪时间可能不同(比如热浪的前期和后期), 且对应着不同的辐射和气象条件。使用不同的热浪定义应了解其带来的潜在影响。

本研究发现辐射和气象条件对白天和夜间高温的出现影响很大。在整个热浪事件演变过程中, 云量和近地面水汽常常有所增加, 造成白天高温领先于夜间高温。单个个例分析指出增加的水汽可能来源于局地蒸发以及水汽平流输送(An等, 2020)。未来的研究将考虑到陆-气相互作用和大气环流在热浪演变过程中的相关机制。在过去几十年, 太阳辐射整体上呈显著降低的趋势(图11a), 近地面比湿在中国西北和东北部呈显著增加的趋势(图11b), 低云量在除华北外的中国大部分地区呈显著增加的趋势(图11c)。根据Xue等(2019), 华北地区总云量(图11d)显著增加以及增加的气溶胶浓度可能是华北地区太阳辐射减少的主要原因。这种整体上增加的近地面湿度和低云量, 以及降低的太阳

辐射的长期趋势有助于发生更多的暖夜事件而抑制暖日事件的发生。这可能可以解释在全球变暖背景下, 中国纯夜间型热浪以及独立夜间极端高温天显著增加, 而纯白天型热浪没有显著增加趋势。

本研究的一个不足之处是虽然给出了结果的空间分布, 但是研究还是更主要关注全国性的特征。未来的研究中将会考虑不同区域热浪结构的变化及相关物理机制。另一个不足之处是, 本文没有量化有多少热量可以通过边界层过程从白天积累到夜间。假定边界层过程保持热量的能力不变, 那么白天温度升高, 夜间温度可以预计也会升高, 因此可能造成增加的昼夜同步极端高温天。我们计算了复合型热浪中昼夜同步极端高温天天数不同时, 对应的平均日最高温和日最低温距平(图12)。可以明显地看到, 有着更高温度的热浪(即热浪强度更高), 其出现昼夜同步极端高温天的天数也越多。但是由于这种边界层过程目前还没有被很深入地了解, 需要根据观测实验和陆-气模式模拟来进行进一步的分析。

5 结论

现有研究中对热浪的定义差别非常大, 这对于公开探讨气候变化和趋势带来了一些困扰。不同于以往的研究基于一个既定热浪定义来分析长期气候趋势,

图 11 1961~2017年夏季(a)太阳辐射距平十年趋势和(b)比湿距平十年趋势的空间分布, 以及1961~2013年夏季(c)低云量距平十年趋势和(d)总云量距平十年趋势的空间分布

符号‘+’代表该5°×5°格点趋势通过了95%置信区间的显著性检验

图 12 1961~2017年中国地区复合型热浪中昼夜同步极端高温天的个数与热浪期间日最高温和日最低温距平平均值的关系

本文主要研究了热浪中白天和夜间极端高温的配置和结构在过去几十年发生的变化。一个完整的热浪过程被定义为连续发生的白天或夜间极端高温。研究发现,相较于纯白天型热浪以及纯夜间型热浪,复合型热浪是近几十年来最主要的热浪类型。气象和辐射条件可以调节白天极端高温和夜间极端高温在热浪过程中出现的时间。由于云量和近地面水汽在热浪事件的演变过程中常常在前期较低,后期有所增加,因此白天极端高温经常领先于夜间极端高温出现。

在1961~2017年研究时间段内,热浪变得越来越容易在夜间发生,均呈明显增加的趋势。在复合型热浪过程中,夜间极端高温发生得越来越早并且结束得越来越晚。独立白天极端高温天越来越多地被昼夜同步极端高温天和独立夜间极端高温天所代替。城市与乡村纯夜间型热浪以及独立夜间极端高温天的增长趋势差异很小,而城市化主要造成了复合型热浪以及昼夜同步极端高温天的增长,因此城市化加剧了昼夜高温的耦合。

了解过去的热浪特征有助于预测未来的变化。随着全球气温的持续上升和城市化进程的扩大,可以预测,未来有着更多昼夜同步极端高温天的复合型热浪必然会增加。

致谢 感谢中国气象科学研究院的陈阳副研究员对论文提出的宝贵建议。

参考文献

- 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. *中国科学: 地球科学*, 49: 1321–1334
- An N, Dou J, González-Cruz J E, Bornstein R D, Miao S, Li L. 2020. An observational case study of synergies between an intense heat wave and the urban heat island in Beijing. *J Appl Meteorol Climatol*, 59: 605–620
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, Caesar J, Gleason B, Klein Tank A M G, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson D B, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre J L. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res*, 111: D05109
- Bador M, Terray L, Boé J, Somot S, Alias A, Gibelin A L, Dubuisson B. 2017. Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. *Environ Res Lett*, 12: 074025
- Bahuguna R N, Solis C A, Shi W, Jagadish K S V. 2017. Post-flowering night respiration and altered sink activity account for high night temperature-induced grain yield and quality loss in rice (*Oryza sativa* L.). *Physiol Plant*, 159: 59–73
- Barriopedro D, Fischer E M, Luterbacher J, Trigo R M, García-Herrera R. 2011. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332: 220–224
- Bumbaco K A, Dello K D, Bond N A. 2013. History of Pacific Northwest heat waves: Synoptic pattern and trends. *J Appl Meteorol Climatol*, 52: 1618–1631
- Cao L, Zhu Y, Tang G, Yuan F, Yan Z. 2016. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations. *Int J Climatol*, 36: 4384–4392
- Cao X, Chen J, Imura H, Higashi O. 2009. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOT VGT data. *Remote Sens Environ*, 113: 2205–2209
- Chen R, Lu R. 2014. Dry tropical nights and wet extreme heat in Beijing: Atypical configurations between high temperature and humidity. *Mon Weather Rev*, 142: 1792–1802
- Chen Y, Li Y. 2017. An inter-comparison of three heat wave types in China during 1961–2010: Observed basic features and linear trends. *Sci Rep*, 7: 45619
- Chen Y, Zhai P. 2017. Revisiting summertime hot extremes in China during 1961–2015: Overlooked compound extremes and significant changes. *Geophys Res Lett*, 44: 5096–5103
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V, Aubinet

- M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437: 529–533
- Cowan T, Purich A, Perkins S, Pezza A, Bosch G, Sadler K. 2014. More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century. *J Clim*, 27: 5851–5871
- Dai A. 2006. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *J Clim*, 19: 3589–3606
- DMSP. 2013. Operational linescan system (DMSP/OLS)
- Filleul L, Cassadou S, Médina S, Fabres P, Lefranc A, Eilstein D, Le Tertre A, Pascal L, Chardon B, Blanchard M, Declercq C, Jusot J F, Prouvost H, Ledrans M. 2006. The relation between temperature, ozone, and mortality in nine french cities during the heat wave of 2003. *Environ Health Perspect*, 114: 1344–1347
- Fischer E M, Schär C. 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat Geosci*, 3: 398–403
- Freychet N, Tett S, Wang J, Hegerl G. 2017. Summer heat waves over Eastern China: Dynamical processes and trend attribution. *Environ Res Lett*, 12: 024015
- Gershunov A, Cayan D R, Iacobellis S F. 2009. The great 2006 heat wave over California and Nevada: Signal of an increasing trend. *J Clim*, 22: 6181–6203
- Gosling S N, Lowe J A, McGregor G R, Pelling M, Malamud B D. 2009. Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: A critical review of the literature. *Clim Change*, 92: 299–341
- He Y, Wang K, Zhou C, Wild M. 2018. A revisit of global dimming and brightening based on the sunshine duration. *Geophys Res Lett*, 45: 4281–4289
- Hong J S, Yeh S W, Seo K H. 2018. Diagnosing physical mechanisms leading to pure heat waves versus pure tropical nights over the Korean Peninsula. *J Geophys Res Atmos*, 123: 7149–7160
- IPCC. 2013. Climate Change 2013. The physical science basis. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 1535
- Jin X, Wu T, Li L, Shi C. 2009. Cloudiness characteristics over Southeast Asia from satellite FY-2C and their comparison to three other cloud data sets. *J Geophys Res*, 114: D17207
- Klinenberg E. 2003. Review of heat wave: Social autopsy of disaster in Chicago. *N Engl J Med*, 348: 666–667
- Kuglitsch F G, Toreti A, Xoplaki E, Della-Marta P M, Zerefos C S, Türkeş M, Luterbacher J. 2010. Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. *Geophys Res Lett*, 37: L04802
- Kunkel K E, Changnon S A, Reinke B C, Arritt R W. 1996. The July 1995 heat wave in the Midwest: A climatic perspective and critical weather factors. *Bull Am Meteorol Soc*, 77: 1507–1518
- Le Tertre A, Lefranc A, Eilstein D, Declercq C, Medina S, Blanchard M, Chardon B, Fabre P, Filleul L, Jusot J F, Pascal L, Prouvost H, Cassadou S, Ledrans M. 2006. Impact of the 2003 heatwave on all-cause mortality in 9 French cities. *Epidemiology*, 17: 75–79
- Liu N, Ren Z. 2016. Data specification on the China national stations' estimated surface total solar radiation dataset V1.0. National Meteorological Information Center
- Miralles D G, Teuling A J, van Heerwaarden C C, Vilà-Guerau de Arellano J. 2014. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nat Geosci*, 7: 345–349
- Murage P, Hajat S, Kovats R S. 2017. Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in London. *Environ Epidemiol*, 1: 1
- Nairn J, Fawcett R J. 2013. Defining heatwaves: Heatwave defined as a heat impact event servicing all community and business sectors in Australia. CAWCR Technical Report No. 060
- Oke T R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc*, 108: 1–24
- Oswald E M. 2018. An analysis of the prevalence of heat waves in the United States between 1948 and 2015. *J Appl Meteorol Climatol*, 57: 1535–1549
- Oswald E M, Rood R B. 2014. A trend analysis of the 1930–2010 extreme heat events in the continental United States. *J Appl Meteorol Climatol*, 53: 565–582
- Pu X, Wang T J, Huang X, Melas D, Zanis P, Papanastasiou D K, Poupkou A. 2017. Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China. *Sci Total Environ*, 603–604: 807–816
- Ren L, Wang D, An N, Ding S, Yang K, Freychet N, Tett S F B, Dong B, Lott F C. 2020. Anthropogenic influences on the persistent night-time heat wave in summer 2018 over northeast china. *Bull Am Meteorol Soc*, 101: S83–S88
- Ruthrof K X, Breshears D D, Fontaine J B, Froend R H, Matusick G, Kala J, Miller B P, Mitchell P J, Wilson S K, van Keulen M, Enright N J, Law D J, Wernberg T, Hardy G E S J. 2018. Subcontinental heat wave triggers terrestrial and marine, multi-taxa responses. *Sci Rep*, 8: 13094

- Seneviratne S I, Donat M G, Mueller B, Alexander L V. 2014. No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nat Clim Change*, 4: 161–163
- Tan M. 2015. Urban growth and rural transition in China based on DMSP/OLS nighttime light data. *Sustainability*, 7: 8768–8781
- Trigo R M, Garia-Herrera R, Diaz J, Trigo I, Valente M. 2005. How exceptional was the early August 2003 heatwave in France? *Geophys Res Lett*, 32: L10701
- Wang J, Chen Y, Tett S F B, Yan Z, Zhai P, Feng J, Xia J. 2020. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nat Commun*, 11: 528
- Wang L, Li W, Wang P, Liu X, Yang F, Qu J J. 2019. Spatiotemporal characterization of the urban sprawl and its impacts on urban island in China with DMSP/OLS and MODIS measurements. *Theor Appl Climatol*, 138: 293–303
- WMO. 1974. Manual on codes. WMO Publ. 306, Vol: 348. Available at <https://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes/Manualon-Codes.html#Codes>, last accessed July 8th, 2019
- WMO. 2013. The Global Climate 2001–2010: A decade of climate extremes—Summary report. WMO-No. 1119: 20. Available at http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1119_en.pdf, last accessed July 8th, 2019
- Xue W, Guo J, Zhang Y, Zhou S, Wang Y, Miao Y, Liu L, Xu H, Li J, Chen D, Liu H. 2019. Declining diurnal temperature range in the North China Plain related to environmental changes. *Clim Dyn*, 52: 6109–6119
- Yang K, Huang G W, Tamai N. 2001. A hybrid model for estimating global solar radiation. *Sol Energy*, 70: 13–22
- Ye H, Huang Z, Huang L, Lin L, Luo M. 2018. Effects of urbanization on increasing heat risks in South China. *Int J Climatol*, 38: 5551–5562
- You Q, Jiang Z, Kong L, Wu Z, Bao Y, Kang S, Pepin N. 2017. A comparison of heat wave climatologies and trends in China based on multiple definitions. *Clim Dyn*, 48: 3975–3989

(责任编辑: 黄建平)