

张曦, 黎鑫. 2017. 湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因 [J]. 气候与环境研究, 22 (6): 747–756. Zhang Xi, Li Xin. 2017. Spatial-temporal characteristics and causes of summer heat waves in Hunan Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (6): 747–756, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17025.

湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因

张曦¹ 黎鑫^{1,2}

¹ 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 利用1960~2014年夏季(6~8月)湖南省77个气象站逐日最高气温资料, 对该地区高温热浪的时空分布特征进行分析研究。研究表明: 湖南省大部分地区常年遭受高温热浪袭击, 年均发生1.53次, 部分地区年均出现2次以上。高频次、高强度的高温热浪主要集中于湘中偏东(衡阳盆地一带)地区, 株洲、长沙、益阳等地为次大值区, 湘西地区高温热浪的发生频次及强度则低于全省平均值。近年来, 湖南高温热浪的影响范围不断扩大, 炎热程度不断增强。近55年高温热浪频次及强度具有显著的阶段性特征, 20世纪80年代以前呈减少(减弱)趋势, 此后呈增多(增强)趋势, 21世纪以来高温热浪增多增强尤其明显。对一次持续时间长、影响范围广的极端高温热浪过程研究发现: 南亚高压东伸扩展, 西太副高异常偏西、偏北且稳定少动, 下沉运动强盛等条件的配合有利于湖南省持续性高温的发生。

关键词 湖南省 高温热浪 频次 强度 成因

文章编号 1006-9585 (2017) 06-0747-10

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17025

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

ZHANG Xi¹ and LI Xin^{1,2}

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A comprehensive understanding of heatwaves is of great importance for making scientifically-based emergency plans to reduce their consequent disastrous impacts. Based on daily maximum temperature observations in summer over Hunan Province during 1960–2014, the spatial and temporal distribution characteristics of heatwaves and the possible synoptic causes are discussed. The major conclusions are as follows. High occurrence frequency and intensity of heatwaves are commonly observed in eastern Hunan (near Hengyang Basin), while heat waves are less frequent and with weak intensity in western Hunan. The areas affected by heatwaves are expanding and the intensity of heat waves is also enhancing, whereas the spatial difference in heatwaves has narrowed. The heatwave frequency (intensity) displays obvious stage changes, which decreased (weakened) before 1980s but turned to increase (strengthen) since the 1990s. After entering the 21st century, more frequent and stronger heatwaves take place. The analysis of a heat wave event with

收稿日期 2017-02-18; 网络预出版日期 2017-07-13

作者简介 张曦, 男, 1991年出生, 硕士研究生, 主要从事极端天气、海气相互作用研究。E-mail: zhangxi@mail.iap.ac.cn

通讯作者 黎鑫, E-mail: oceanloverli@163.com

资助项目 国家自然科学基金 41605051、41490642

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grants 41605051 and 41490642)

extremely high temperature showed that a stable and strong western subtropical high with its position shifting westward and northward, eastward extending South Asian high, and strong and persistent downdrafts are all favorable for the occurrence of high temperature in Hunan.

Keywords Hunan Province, Heat wave, Frequency, Intensity, Cause

1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告预测 2016~2035 年全球平均地表温度可能比 1986~2005 年升高 0.3~0.7 °C, 且增幅在 21 世纪末 (2081~2100 年) 可达 0.3~4.8 °C (秦大河等, 2014; 巢清尘等, 2014)。与此同时, 中国近百年 (1906~2005 年) 年平均气温呈上升趋势, 增幅为 0.78±0.27 °C (唐国利等, 2009), 同时全国大部分地区无霜期延长 (宁晓菊等, 2015)。在气候变暖背景下, 全球高温热浪的发生更为频繁, 热浪强度明显增强。2003 年高温热浪袭击整个欧洲, 在高温热浪的高峰期间, 法国与高温事件有关的死亡率高达 54% (Martello and Giacchi, 2010)。2015 年 5 月, 高温热浪横扫大半个印度, 分别给南印安德拉省、泰伦加纳省造成 551、199 人死亡。2016 年, 伴随着 El Niño 的来袭, 全球极端高温事件频发, 高温强度刷新多项历史记录。有研究指出, 高温热浪对人体健康具有极大危害, 可引发诸如热痉挛、热衰竭和热射病等热相关疾病, 甚至导致死亡 (Koppe et al., 2004; 徐金芳等, 2009)。许遐祯等 (2011) 利用 1951~2009 年南京市夏季气象资料及逐日死亡数据, 探讨了高温热浪对人体健康的影响, 发现高温热浪对婴幼儿 (0~5 岁) 及高龄人群 (50~80 岁) 更具危害性。此外, 持续高温对夏季用电负荷造成巨大压力, 容易造成电起火事件。

鉴于高温热浪对人体健康及生命财产具有重大隐患, 国内外许多学者已开展对高温热浪的研究。Kuglitsch et al. (2010) 对 1961~2006 年地中海东部区域的研究及 Green et al. (2016) 对 2013 年夏季英国地区的研究结果均表明: 近年来, 高温热浪的发生频次与强度均呈增多 (强) 趋势。一方面, 全球气候变暖使得气温整体升高, 导致高温热浪更易发生; 另一方面, 城市热岛效应可加剧高温热浪程度, 导致更高的极端最高气温和更长的热浪持续时间的出现 (谈建国等, 2008; 肖嗣荣等, 2010)。Keellings and Waylen (2015) 利用 HSM 模型框架, 实证了 ENSO 和北大西洋长周期年代际振荡

(AMO) 对热浪频次、强度、持续时间的影响, 研究结果表明 El Niño-南方涛动现象 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 对佛罗里达州热浪的空间分布格局有显著性影响。Brabson and Palutikof (2002) 在研究英格兰极端温度演变情况时发现, 无论冬季和夏季, 极端气温的发生都与低层大气环流的改变有关。王倩云等 (2016) 对欧洲地区夏季热浪的研究指出, 阻塞位置对高温热浪的发生有重要的影响。叶殿秀等 (2013) 利用 1961~2010 年夏季中国 753 个站逐日最高气温资料, 对我国高温热浪的时空分布进行研究, 发现大部分地区高温热浪频次和强度呈增多、增强的趋势, 但各地区的变化幅度存在差异。其他一些学者的研究也表明, 在全球气候变暖的背景下中国不少地区的高温热浪有愈演愈烈的趋势, 比如江浙沪、鲁西南、四川盆地、京津冀、上海以及湖南省等地区 (杨辉和李崇银, 2005; 史军等, 2009; 陈敏等, 2013; 窦坤等, 2015; 李双双等, 2015; 李琪等, 2016; 朱歆炜等, 2016)。

而关于高温热浪的成因方面, 北半球夏季副高异常偏强、西太副高异常偏西、印缅槽异常偏弱, 是造成高温热浪偏强的重要原因 (覃卫坚和李耀先, 2011; 陈敏等, 2013)。谈建国等 (2008) 对我国高温热浪分布形态的成因进行了研究, 指出华北地区高温天气出现一般与大陆暖脊控制下的大陆变性高压型和副热带高压控制下的副热带高压相关; 而华南地区高温天气出现一般与副热带高压和热带气旋相联系; 内陆和西北地区由于地形地势, 阻挡了印度洋, 大西洋的暖湿气流, 当其上空受大陆暖高压或西伸强大的副热带高压控制时, 天气晴好, 加上持续的日照增温而形成高温天气。此外, 另有一些学者认为, 南亚高压与我国的高温热浪天气之间也有着较为密切的关系。(程炳岩等, 2010; 张志薇等, 2011; 张玛等, 2011)。

湖南省 (24°38'N~30°8'N, 108°47'E~114°15'E) 位于青藏高原南缘下游、长江中游以南地区, 地理位置特殊。其东、南、西三面环山, 北部以洞庭湖为中心, 呈一朝北开口的不对称马蹄形盆地, 中部地区丘陵遍布 (图 1)。复杂的地形地貌加之深居内陆、远离海洋, 使得湖南的亚热带季风湿润气候具

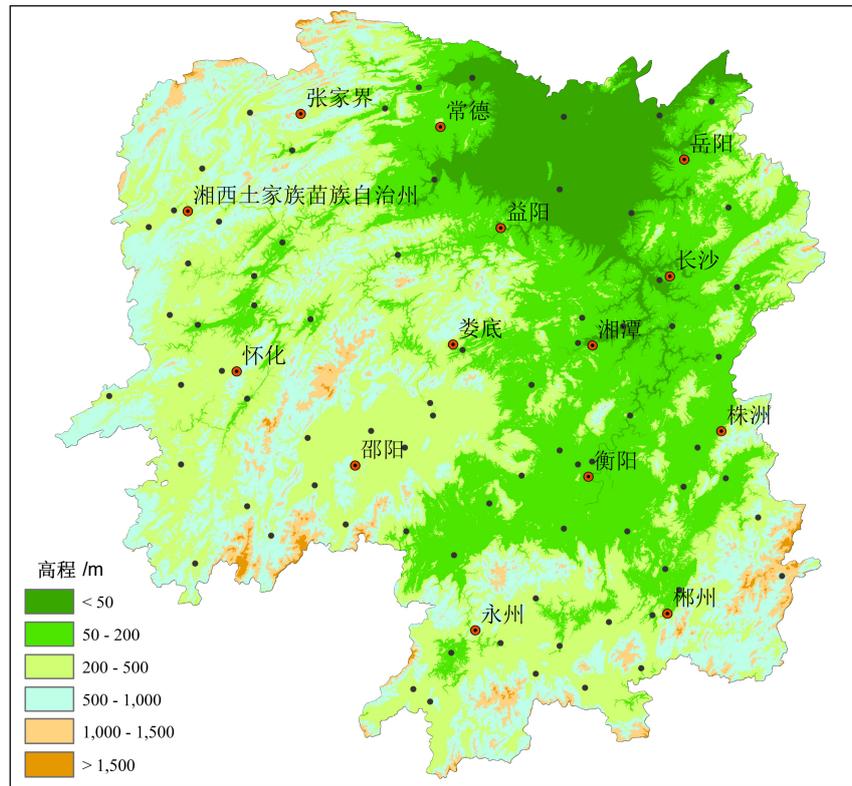


图 1 湖南省地形及气象站点分布
Fig. 1 Geographic map and distribution of meteorological stations in Hunan Province

有大陆性特点，在盛夏常出现连晴高温、酷暑干旱的天气，对工农业影响较大，对人体健康也有重大的威胁（张剑明，2008；黄卓禹等，2015）；且湖南省的极端最高气温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上天数等高温指标值在全国范围内十分突出。因此，分析湖南地区在气候变暖背景下的局地响应，是一个很有现实意义的研究课题。本文利用 1960~2014 年夏季（6~8 月）湖南省 77 个站点逐日最高气温资料，对湖南省高温热浪的时空分布特征进行研究，并从天气学的个例研究讨论了高温热浪的成因，研究结论可以给相关决策部门科学制定应急预案、积极防御高温热浪提供科学的指导依据。

2 资料与方法

本文所用资料包括：1) 中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>[2017-01-30]) 提供的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)，从中选取 1960~2014 年湖南省 77 个地面气象站 (图 1) 夏季 (6~8 月) 逐日最高气温资料。为保证数

据质量，对原数据进行了质量检验和控制，保证了数据的可靠性。2) NCEP/NCAR 提供的 1960~2014 年逐日 500 hPa 和 100 hPa 高度场、850 hPa 垂直速度场等全球再分析资料数据，网格水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)，该资料用于分析大气环流场的配置。

根据中国气象局规定：日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个高温日，将高温日持续 5 d 及以上记为一次高温热浪过程（肖嗣荣等，2010；陈敏等，2013；叶殿秀等，2013；李琪等，2016）。本文亦采用该标准作为高温日和高温热浪事件判别依据，并从高温热浪发生频次、高温热浪日数及高温有效积温 (Effective Accumulated High Temperature, EAHT) 等 3 个方面进行讨论。需要说明的是，高温热浪频次指的是高温热浪的发生次数，而高温热浪日数代表的是高温热浪的持续时间，如湖南 2003 年 7 月 13 日至 8 月 10 日爆发了一次高温热浪过程，共持续 29 d，高温日数记为 29。有效积温原本是农业学或生态学的概念，但陈敏等 (2013) 提出将 EAHT 作为衡量高温热浪强度的一项重要指标，它反映的

是高温热浪期间，每日最高气温与 35 °C 阈值之差的累积和。EAHT 值越大，反映高温热浪造成的炎热程度越重，高温危害越大。

3 湖南省高温热浪的时空分布特征

3.1 空间分布特征

图 2 给出近 55 年湖南省平均夏季高温热浪频次、日数及高温有效积温的空间分布，可以看出，湖南 55 a 平均夏季高温热浪频次、高温热浪日数及高温有效积温的空间分布形态较为类似。总体而言，高值中心均位于湘中偏东（衡阳盆地一带），株洲、长沙、益阳等地是次大值区，而湘西地区为全省的最低值区。等值线的分布形势呈现出自衡阳盆地向南、西、北三面递减的趋势，这与湖南的地

理地形有关。

图 2a 可以看出，湖南省高温热浪事件发生频繁，但各站之间具有明显的差异。发生频次范围为 0（桂东）~3.11/a（安仁），换言之，桂东地区近 55 年没有发生过高温热浪，而安仁地区夏季平均每年出现 3.11 次高温热浪，全省平均值为 1.53/a。湘中偏东地区高温热浪出现频次较高，基本都在年均 2 次以上；湘北、湘西、湘南等地大多数站点年均高温热浪在 1 次或 1 次以下。77 个台站中，年均高温热浪频次在 2 次以上的有 19 个站，1~2 次之间的有 36 个站，其余 22 个站年均发生频次小于 1，年均 1.49 次/站。也就是说，湖南 25% 的地区每年有 2 次以上的高温热浪过程，47% 的地区年年都会遭受 1 次高温热浪袭击，部分地区平均 1.5~3.3 a 才出现一次热浪（仅桂东站未发生过高温热浪）。

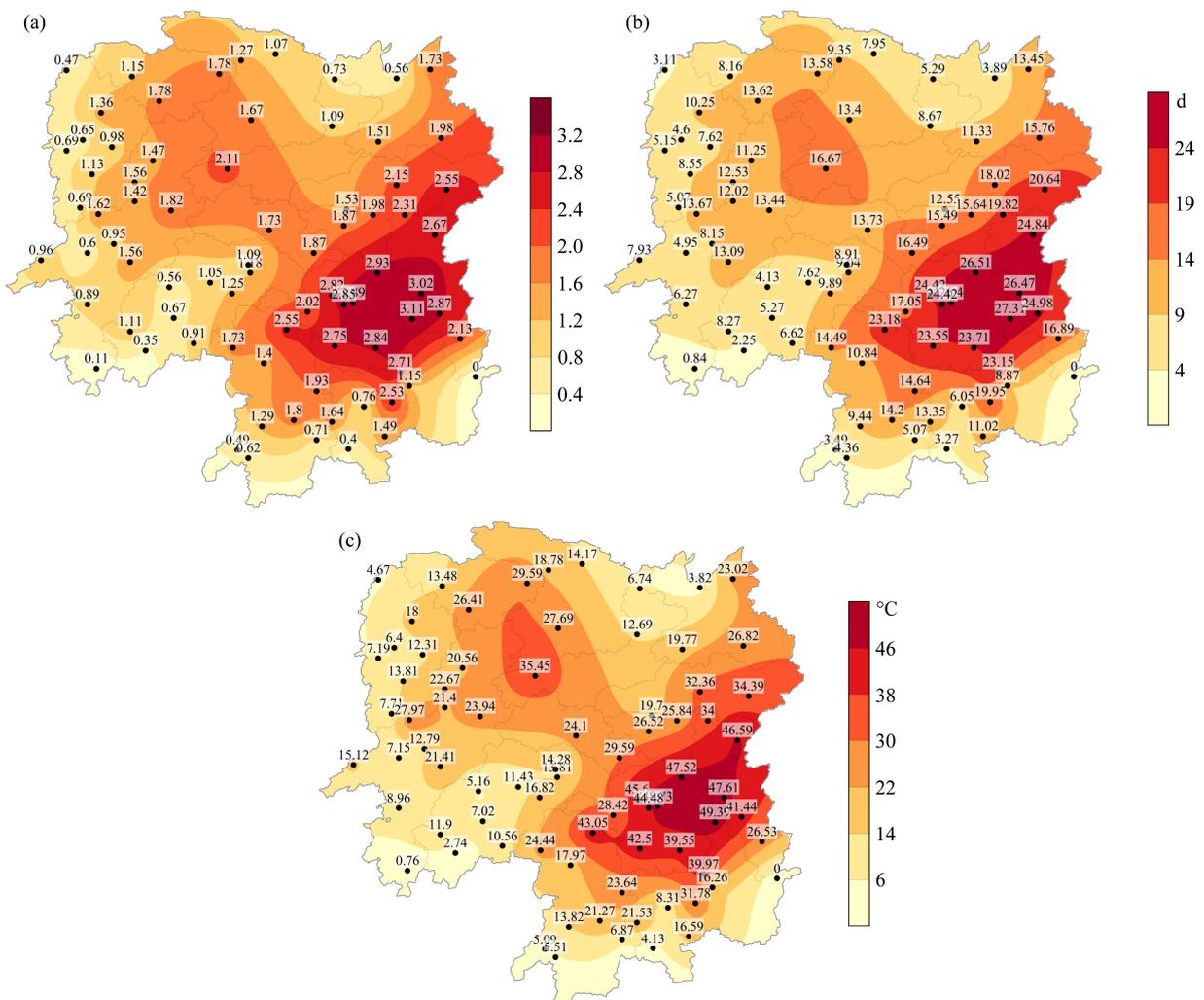


图 2 1960~2014 年湖南省平均夏季 (a) 高温热浪频次、(b) 高温热浪日数及 (c) 高温有效积温的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of mean summer (a) heatwave frequency, (b) heatwave days, and (c) Effective Accumulated High Temperature (EAHT) in Hunan Province during 1960–2014

图 2b 给出近 55 年夏季热浪期间的年均高温日数，高温热浪日数的空间变化较大，日数范围为 0（桂东）~27.3 d/a（安仁），全省平均为 12.4 d/a。高温热浪日数与高温频次的空间分布形态较为一致。图 2c 显示了高温有效积温的空间分布，它反映了湖南省夏季的炎热程度及高温危害程度，高温热浪频次越高，高温热浪日数就越多，高温有效积温值也就越大。从图 2c 可以看到，衡阳盆地一带夏季高温的危害程度最大，其次是长沙、株洲、益阳等地，而湘西地区受高温的危害较小。

西太平洋副热带高压（下称西太副高）与特殊地形是影响湖南夏季高温分布形态的重要因素（罗伯良和李易芝，2014）。在地理位置上，湘东偏东，距离副高中心较近；而湘西偏西，距离副高中心相对较远，因而湘西受副高的影响要比湘东小一些。这是湘东热浪频发、高温日偏多，而湘西热浪较少的主要原因。

3.2 趋势变化特征

分别计算湖南省 77 站高温热浪频次、高温热浪日数及高温有效积温的气候变化趋势（见图 3）。

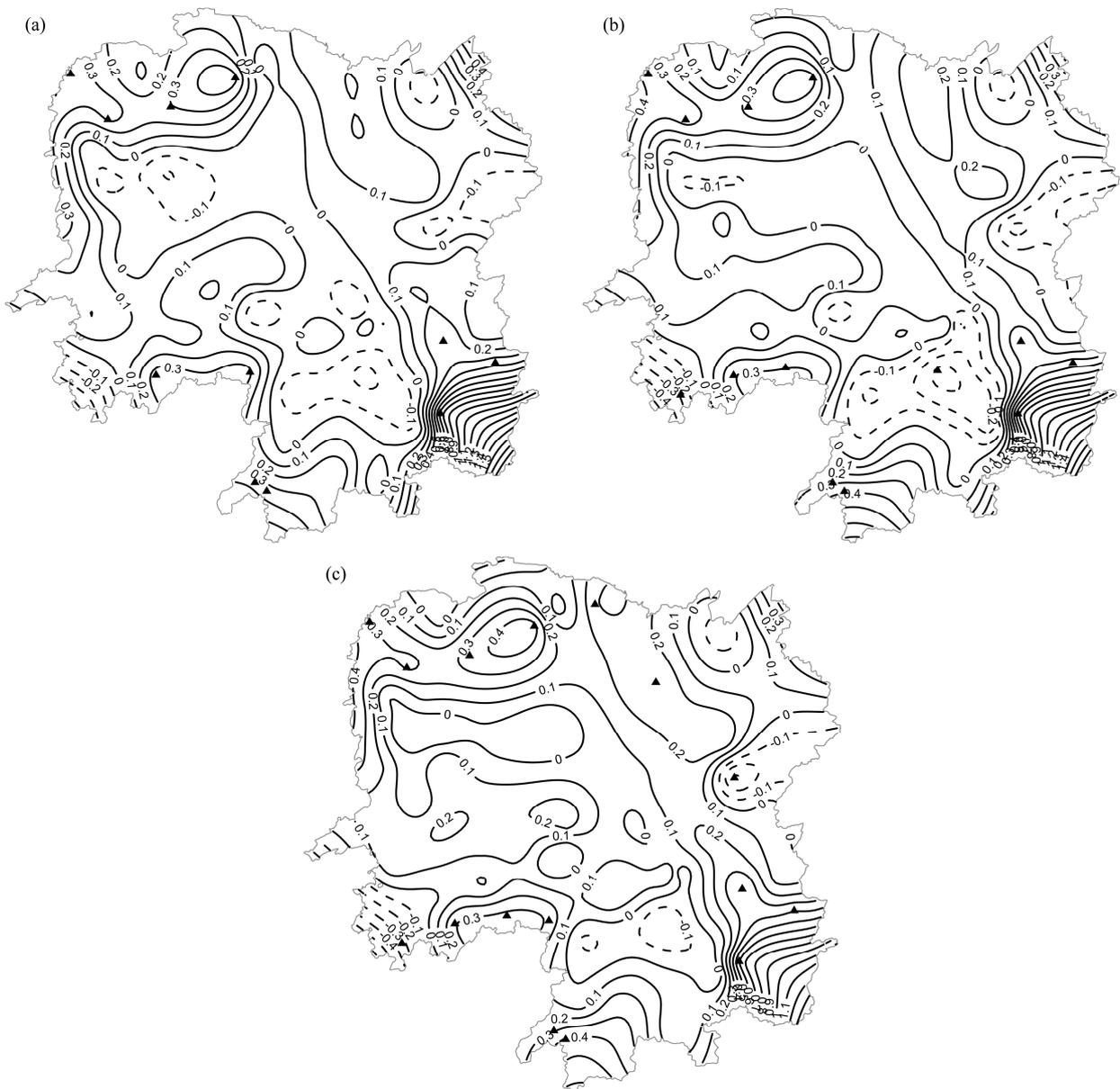


图 3 1960~2014 年湖南省 (a) 高温热浪频次、(b) 高温热浪日数 (单位: d) 及 (c) 高温有效积温 (单位: °C) 变化趋势的空间分布 (▲代表通过 0.05 显著性水平检验的站点)

Fig. 3 Spatial distributions of linear trends of summer (a) heatwave frequency, (b) heatwave days (d), and (c) EAHT (°C) in Hunan Province during 1960–2014 (▲ represent stations where the above values pass the 0.05 significance level)

可以看出,大部分地区高温热浪频次、日数及有效积温均呈增加(增强)趋势(实线),仅少部分区域呈减少(减弱)趋势(虚线)。这反映出该地区高温热浪有愈演愈烈趋势,炎热程度不断增强。其中,增幅较大的地区主要分布在湘西北、湘南等边缘地区。与图2对比后发现,这些地区高温热浪发生频次较低、强度较弱;呈减少趋势的地区主要位于湘中部偏南、衡阳—永州—郴州交界地带,这些地区为高温热浪频发区(图2)。简而言之,呈增加趋势的站点主要位于高温热浪频次较低、强度较弱的地区,而呈减少趋势的站点又大多处于高温热浪频发、强度较强的地区,这在一定程度上缩小了高温热浪的空间差异。但是,上述的增加或减少趋势不够显著,仅少数几个站点可通过显著性检验。

3.3 长期变化特征

图4给出近55年湖南夏季平均高温热浪频次、高温热浪日数及高温有效积温的历年值曲线。从图中可以看出,三者的变化趋势较为一致,呈先减后增的变化趋势,在1986年附近达到历史最低值。运用Mann-Kendall检验法分别对3个时间序列进行

突变检验,研究时段内未发现明显的突变点,但在1986年附近,UF曲线通过0.05显著性检验(图略)。因此,本文以1986年为界,对前后两段时间序列进行分段拟合(图4中实线)。1986年之前,湖南多年平均高温热浪频次、日数、高温有效积温分别为1.52次、12.5 d、20.2 °C,并且三者均呈显著减少(弱)趋势;1986年之后,多年平均高温热浪频次、日数、高温有效积温分别为1.64次、13.3 d、24.3 °C,并且三者均呈显著增多(强)趋势。叶殿秀等(2013)、陈敏等(2013)、傅帅等(2016)、王喜元等(2016)分别对全国、上海、长沙、长江流域等进行高温热浪的分析结果也证实,20世纪80年代中期以后,高温热浪有明显的增多增强趋势。研究认为,高温热浪的这种变化特征,与20世纪80年代后全球气候增暖是有一定联系的(肖嗣荣等,2010;叶殿秀等,2013;李双双等,2015)。也有研究认为,城市高温热浪的这种转变,与改革开放后,由城市化进程加快、下垫面性质遭到破坏、人为热排放量增加而引发的城市热岛效应有一定联系(肖嗣荣等,2010;傅帅等,2016)。

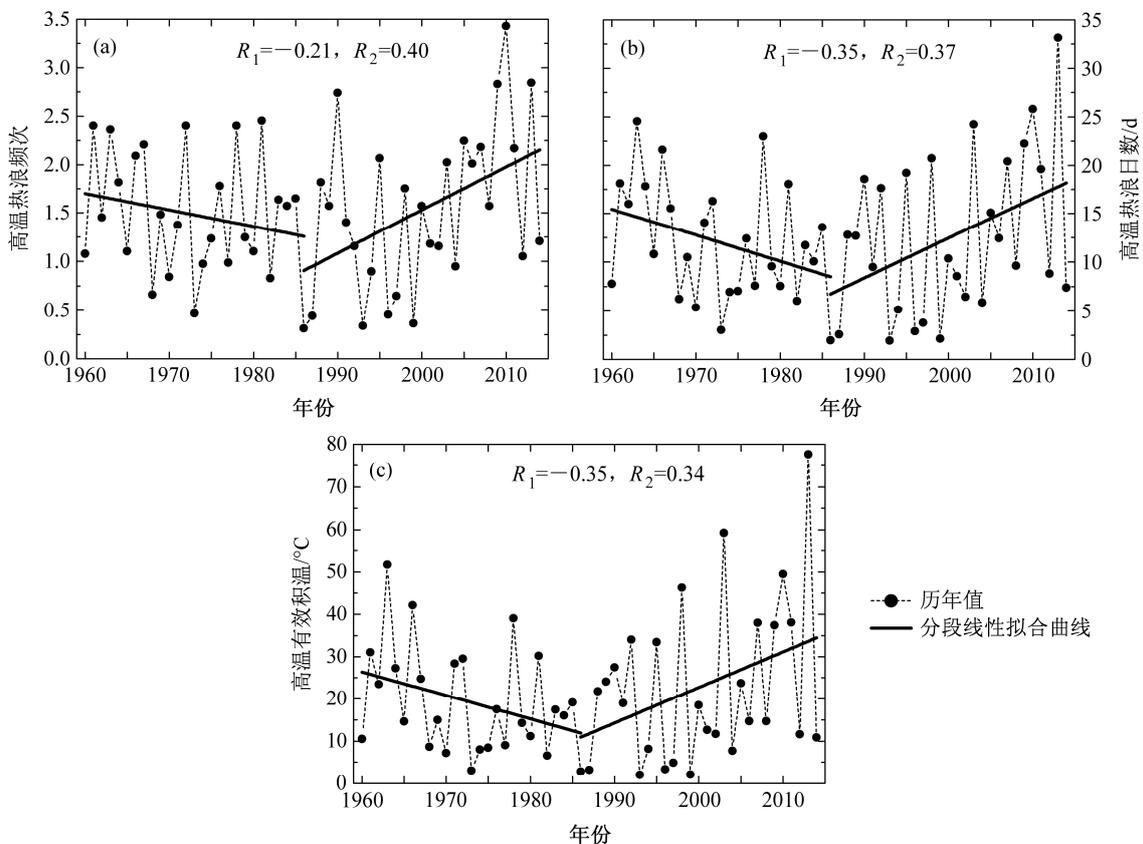


图4 1960~2014年湖南省夏季平均(a)高温热浪频次、(b)高温热浪日数及(c)高温有效积温的历年变化

Fig. 4 (a) Annual mean summer heatwave frequency, (b) annual mean heatwave days, and (c) annual mean EAHT in Hunan Province during 1960–2014

近 55 年中，年均高温热浪频次波动范围在 0.31~3.42 次，年均高温热浪日数 1.9~33.2 d，年均高温有效积温为 2.0~77.6 °C。其中，在各指标的前 4 位中，高温热浪频次有 3 次出现在 2000 年之后，分别为 2010 年(3.42 次)、2013 年(2.84 次)、2009 年(2.83 次)；高温热浪日数有 2 次出现在 2000 年之后，分别为 2013 年(33.2 d)、2010 年(25.8 d)；高温有效积温有 3 次出现在 2000 年之后，分别为 2013 年(77.6 °C)、2003 年(59.3 °C)、2010 年(49.4 °C)。由此可见，21 世纪以来，湖南地区的高温热浪急剧增多增强。

4 湖南省一次极端高温热浪的天气学成因

除了地形地貌外，规律性和异常性大气环流也是影响温度场的重要原因，有研究指出，南亚高压和西太副高的配合会显著影响湖南省温度场的变化(符静, 2015)。因此，西太平洋副高和南亚高压的协同影响，可能与湖南省的高温热浪过程有重要的作用，本文选取了 2003 年 7 月 13 日至 8 月 10 日的一次强高温热浪过程。这次高温热浪具有波及范围广(每日均有 70 个以上的台站最高气温达到或超过 35 °C)、持续时间长(持续近 1 个月)的特点，利用 NCEP/NCAR 逐日位势高度场再分析资料，探讨研究时段内西太副高与南亚高压的高低空环流配置情况。

在这次高温过程中，副高位置明显偏西、偏北，588 dagpm 线西伸至 100°E 以西，副高环流控制范围更广，湖南完全处于 588 dagpm 线控制范围之内(图略)。从 500 hPa 高度距平场(图 5a)发现，副高强度偏强，大气环流呈“正—负—正”的分布形势。此外，在我国中东部地区存在一个正距平中心，中心强度达到 30 dagpm 以上，而湖南绝大部分地区都处于这个中心之中。500 hPa 西太平洋副高偏西往往对应着 100 hPa 的南亚高压位置偏东(陶诗言等, 1965)。用 1680 dagpm 东脊点的经度来表示南亚高压的位置，发现在 2003 年高温过程中，南亚高压较常年平均位置明显偏东，东脊点东伸至 120°E 以东，湖南绝大部分地区位于南亚高压控制范围内(图略)。100 hPa 高度距平分布场(图 5b)上，南亚高压强度偏强，较常年表现出明显的正距平。与 500 hPa 高度场距平分布相似，100 hPa

高度上，南亚高压在我国中东部也存在一个正距平中心，中心强度达 20 dagpm 以上。

从副高和南亚高压沿 28°N 剖面图(图 5c-d)可以发现，两者的东西移动存在很强的相关性。副高东西移动主要分为 5 个阶段：6 月中旬中期、7 月上旬初和 7 月下旬初西伸，8 月上旬初东退，8 月中旬初再次西伸。从副高脊线东脊点的位置可以看出，7 月初和 7 月下旬西伸最明显，7 月初 588 dagpm 线西脊点一度接近 70°E，8 月中旬副高虽再次西伸，但强度较之前有所减弱。南亚高压东西移动也分为 5 个阶段：6 月下旬初、7 月上旬末、7 月下旬末东伸，8 月中旬初西退，8 月下旬初再次东伸。从南亚高压东脊点位置来看，7 月上旬末和 7 月末南亚高压的强度最强，7 月末东脊点达到 120°E 以东，即副高西伸开始后，南亚高压随即响应东伸，而后副高达到最强，南亚高压也随之达到最强。在这次过程中，湖南省同时受偏强偏东的南亚高压和偏强偏西的副高控制，下沉气流异常强盛(图 5e)，对流无法发展，最终导致持续高温天气的发生。

从全省最高气温分布(图 5f)看，此次过程湖南极端最高温度最大值为 42 °C，出现在 7 月 31 日。全省极端最高温度 ≥ 35 °C 有 54 d， ≥ 38 °C 有 37 d， ≥ 40 °C 有 12 d；全省平均最高温度最大值为 39.2 °C，出现在 8 月 2 日，全省平均最高温度 ≥ 30 °C 有 54 d， ≥ 35 °C 有 32 d， ≥ 38 °C 有 5 d。7 月 13 日至 8 月 10 日高温情况尤为严峻，全省平均最高温度基本维持在 35 °C 以上，且连续 29 d 极端最高温度 ≥ 38 °C(7 月 25 日为 37.9 °C)，其中 40 °C 以上天数达 11 d，7 月 27 日至 8 月 3 日更是出现连续 8 d 极端最高温度超过 40 °C，这与西太副高和南亚高压在 7 月初至 8 月上旬期间强度最强相对应，表明西太副高和南亚高压中心强度与高温天气之间存在较好的对应关系。

5 结论与讨论

高温热浪严重危及人体健康及生命财产安全，科学而全面地认识此类极端天气事件，积极制定应急预案，一直是气象学界研究的热点问题。在全球气候变暖的背景下，湖南省高温热浪频频出现。基于近 55 年夏季 77 个气象台站逐日最高气温资料，本文对高温热浪的时空分布特征进行了讨论，并从天气学角度初步分析一次极端高温热浪过

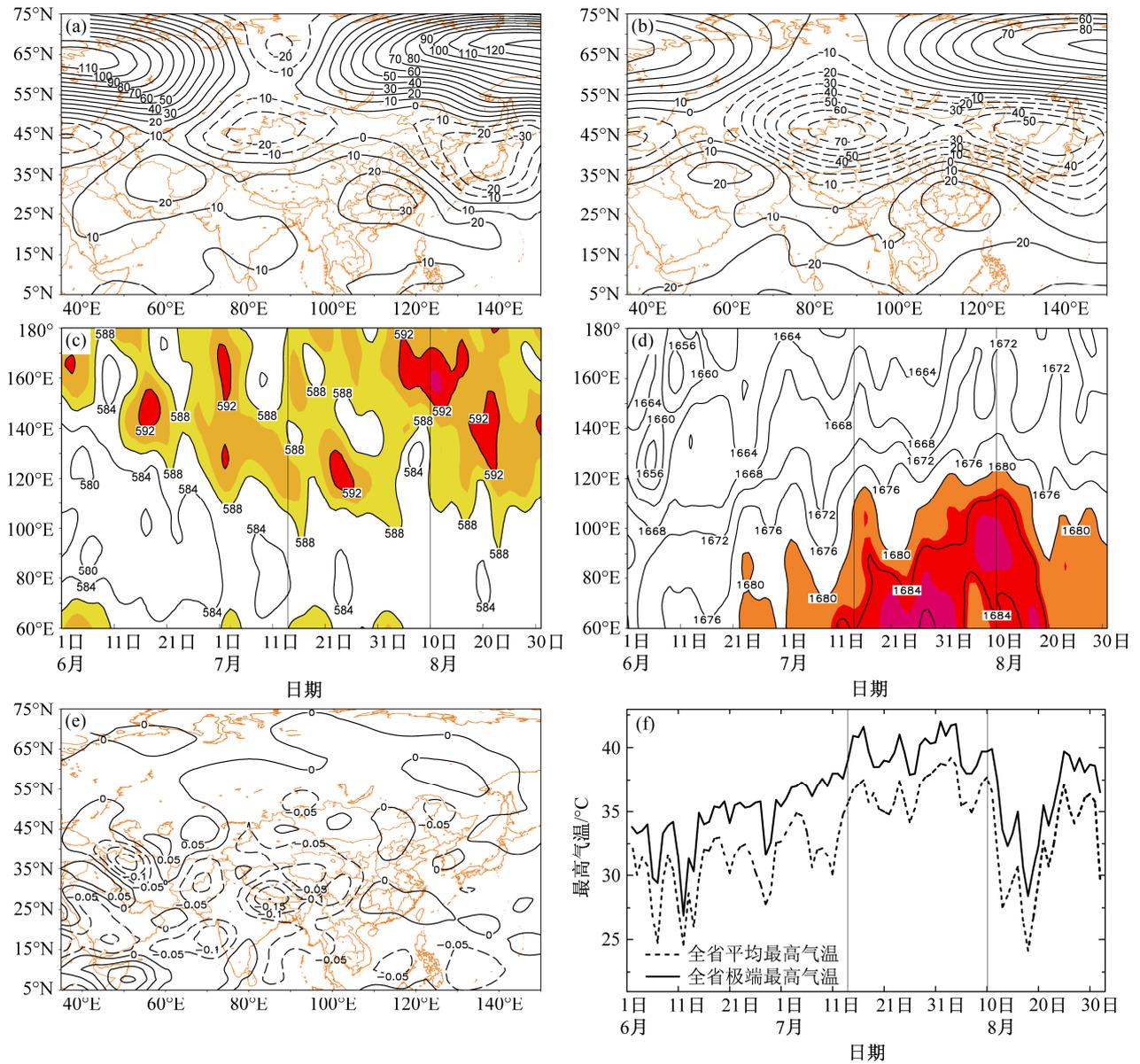


图5 2003年7月13日至8月10日 (a) 500 hPa、(b) 100 hPa 平均位势高度与同期1960~2014年多年平均的差值(单位: dagpm); 2003年7月1日至8月31日28°N (c) 500 hPa (阴影区代表 ≥ 588 dagpm 区域)、(d) 100 hPa (阴影区代表 ≥ 1680 dagpm 区域) 附近位势高度的经度—时间剖面(单位: dagpm); (e) 2003年7月13日至8月10日850 hPa 平均垂直速度场(单位: Pa/s); (f) 全省平均最高气温和极端最高气温随时间的变化(c、d、f 竖线之间的区域为强高温热浪时段7月13日至8月10日)

Fig. 5 The difference value between mean geopotential height (units: dagpm) at (a) 500 hPa, (b) 100 hPa from 13 Jul to 10 Aug 2003 and the mean value over the same period of 1960 to 2014; Longitude-time profiles of mean geopotential height (units: dagpm) at (c) 500 hPa (shaded area in panel indicate values ≥ 588 dagpm), (d) at 100 hPa (shaded area in panel indicate values ≥ 1680 dagpm) around 28°N from 1 Jul to 31 Aug 2003; (e) Mean field of vertical velocity (units: Pa/s) from 13 Jul to 10 Aug 2003; (f) Temporal changes of daily average maximum temperature and extreme maximum temperature at 77 stations. The areas between the two vertical lines in panel (c), (d), and (f) indicate the heatwave period (from 13 Jul to 10 Aug 2003)

程的成因。主要结论如下:

(1) 湖南大部分地区常年遭受高温热浪袭击, 年均发生 1.53 次, 部分地区超过 2 次。近年来, 高温热浪影响范围逐渐扩大, 炎热程度不断增强。

(2) 高温热浪频次及强度具有明显的阶段性特

征: 20 世纪 80 年代以前呈减少减弱的趋势, 20 世纪 90 年代以后以增多增强的趋势为主, 20 世纪 80 年代为一个过渡阶段。21 世纪以来, 高温热浪明显增多增强。

(3) 对 2003 年一次持续时间长、影响范围广

的极端高温热浪的研究发现：酷夏年西太副高与南亚高压的相互配合是造成湖南高温热浪的重要原因之一。西太副高异常强盛，位置偏西、偏北且稳定少动，南亚高压东伸扩展，这样的配置有利于湖南省持续性高温天气的出现。

本文仅从观测资料分析了过去几十年湖南省夏季高温热浪的时空分布特征及其初步成因，下一步还需结合区域气候模式深入探讨造成湖南省夏季高温热浪时空变化的物理机制。为了应对气候变化可能造成的影响，我们还将通过 CMIP5 的模式，评估不同碳排放情景下湖南省夏季高温热浪未来的变化趋势。

参考文献 (References)

- Brabson B B, Palutikof J P. 2002. The evolution of extreme temperatures in the central England temperature record [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (24): 16-1-16-4, doi: 10.1029/2002GL015964.
- 巢清尘, 周波涛, 孙颖, 等. 2014. IPCC 气候变化自然科学认知的发展 [J]. *气候变化研究进展*, 10 (1): 7-13. Chao Qingchen, Zhao Botao, Sun Ying, et al. 2014. The cognition development of the climate change physical sciences on IPCC [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis* (in Chinese), 10 (1): 7-13, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.002.
- 陈敏, 耿福海, 马雷鸣, 等. 2013. 近 138 年上海地区高温热浪事件分析 [J]. *高原气象*, 32 (2): 597-607. Chen Min, GengFuhai, Ma Leiming, et al. 2013. Analyses on the heat wave events in Shanghai in recent 138 years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32 (2): 597-607, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00058.
- 程炳岩, 孙卫国, 郭渠. 2010. 重庆地区夏季高温的气候特征与环流形势分析 [J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 32 (1): 73-80. Cheng Bingyan, Sun Weiguo, Guo Qu. 2010. Analyses of climatological features of the summer high temperature and circulation situation in Chongqing [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 32 (1): 73-80.
- 窦坤, 程德海, 孙翠凤, 等. 2015. 1961~2014 年鲁西南高温日数及高温热浪时空变化特征 [J]. *气象研究与应用*, 36 (2): 26-30. Dou Kun, Cheng Dehai, Sun Cuifeng, et al. 2015. Spatial and temporal variation characteristics of the number of high temperature days and heat wave from 1961 to 2014 in southwest of Shandong Province [J]. *Journal of Meteorological Research and Application* (in Chinese), 36 (2): 26-30, doi: 10.3969/j.issn.1673-8411.2015.02.005.
- 符静. 2015. 2001~2013 年洞庭湖流域植被覆盖度时空变化特征研究 [D]. 湖南师范大学硕士学位论文, 33-44. Fu Jing. 2015. Spatial and temporal variations of vegetation coverage in the Dongting Lake Basin over the last 13 years (2001-2013) [D]. M. S. thesis (in Chinese), Hunan Normal University, 33-44.
- 傅帅, 蒋勇, 张小泉, 等. 2016. 近 64 年长沙市高温热浪事件统计分析 [J]. *气象科技*, 44 (6): 991-997. Fu Shuai, Jiang Yong, Zhang Xiaoquan, et al. 2016. Statistics analysis of heat wave events in Changsha in recent 64 years [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 44 (6): 991-997.
- Green H K, Andrews N, Armstrong B, et al. 2016. Mortality during the 2013 heatwave in England—How did it compare to previous heatwaves? A retrospective observational study [J]. *Environ. Res.*, 147: 343-349, doi:10.1016/j.envres.2016.02.028.
- 黄卓禹, 胡国强, 刘杰雄, 等. 2015. 湖南娄底“6·20-21”强降水的中尺度特征分析 [J]. *广东气象*, 37 (6): 47-51. Huang Zhuoyu, Hu Guoqiang, Liu Jiexiong, et al. 2015. Analysis of the mesoscale characteristics of a severe rain on June 20 to 21, 2015 in Loudi, Hunan Province [J]. *Guangdong Meteorology* (in Chinese), 37 (6): 47-51, doi: 10.3969/j.issn.1007-6190.2015.06.012.
- Keellings D, Waylen P. 2015. Investigating teleconnection drivers of bivariate heat waves in Florida using extreme value analysis [J]. *Climate Dyn.*, 44 (11-12): 3383-3391, doi:10.1007/s00382-014-2345-8.
- Koppe C, Kovats S, Jendritzky G, et al. 2004. Heat-waves: Risks and responses [R]. Health and Global Environmental Change Series, No. 2. Copenhagen, Denmark: World Health Organization, 9-15.
- Kuglitsch F G, Toréti A, Xoplaki E, et al. 2010. Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (4), doi: 10.1029/2009GL041841.
- 李琪, 苏欢, 史雨涵, 等. 2016. 1961~2010 年江浙沪地区夏季高温热浪时空变化特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 25 (3): 506-513. Li Qi, Su Huan, Shi Yuhuan, et al. 2016. Temporal-spatial change characteristics of summer heatwaves in Jiangsu-Zhejiang-Shanghai region during 1961-2010 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (in Chinese), 25 (3): 506-513, doi: 10.11870/cjlyzyyhj201603018.
- 李双双, 杨赛霓, 张东海, 等. 2015. 近 54 年京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素 [J]. *应用气象学报*, 26 (5): 545-554. Li Shuangshuang, Yang Saini, Zhang Donghai, et al. 2015. Spatiotemporal variability of heat waves in Beijing-Tianjin-Hebei region and influencing factors in recent 54 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 26 (5): 545-554, doi: 10.11898/1001-7313.20150504.
- 巢清尘, 周波涛, 孙颖, 等. 2014. IPCC 气候变化自然科学认知的发展 [J]. *气候变化研究进展*, 10 (1): 7-13. Chao Qingchen, Zhao Botao, Sun Ying, et al. 2014. The cognition development of the climate change physical sciences on IPCC [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis* (in Chinese), 10 (1): 7-13, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.002.
- 罗伯良, 李易芝. 2014. 2013 年夏季湖南严重高温干旱及其大气环流异常 [J]. *干旱气象*, 32 (4): 593-598. Luo Boliang, Li Yizhi. 2014. Characteristics of serious high temperature and drought and anomalies of atmospheric circulation in summer of 2013 in Hunan Province [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 32 (4): 593-598, doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0593.
- Martiello M A, Giacchi M V. 2010. High temperatures and health outcomes: A review of the literature [J]. *Scandinavian Journal of Public Health*, 38 (8): 826-837, doi:10.1177/1403494810377685.
- 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 等. 2015. 1951 年以来中国无霜期的变化趋势 [J]. *地理学报*, 70 (11): 1811-1822. Ning Xiaoju, Zhang Lijun, Yang Quntao, et al. 2015. Trends in the frost-free period in China from 1951 to 2012 [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 70 (11): 1811-1822, doi:

- 10.11821/dlxb201511010.
- 秦大河, Stocker T, 259 名作者和 TSU (驻伯尔尼和北京). 2014. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论 [J]. 气候变化研究进展, 10 (1): 1–6. Qin Dahe, Stocker T, 259 Authors and TSU (Bern & Beijing). 2014. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 10 (1): 1–6, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001.
- 覃卫坚, 李耀先. 2011. 2010 年广西高温热浪气象灾害成因分析 [J]. 气象研究与应用, 32 (4): 13–16. Qin Weijian, Li Yaoxian. 2011. Analysis on the causes of 2010 high temperature heat wave meteorological disasters in Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 32 (4): 13–16.
- 史军, 丁一汇, 崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 347–358. Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. 2009. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in East China and its causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 347–358, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.13.
- 谈建国, 郑有飞, 彭丽, 等. 2008. 城市热岛对上海夏季高温热浪的影响 [J]. 高原气象, 27 (S): 144–149. Tan Jianguo, Zheng Youfei, Peng Li, et al. 2008. Effect of urban heat island on heat waves in summer of Shanghai [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (Suppl.): 144–149.
- 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 2009. 中国近百年温度曲线的对比分析 [J]. 气候变化研究进展, 5 (2): 71–78. Tang Guoli, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. 2009. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (2): 71–78, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2009.02.002.
- 陶诗言, 叶笃正, 谢义炳. 1965. 东亚夏季大气环流 [J]. 科学通报, 10 (1): 8–24. Tao Shiyang, Ye Duzheng, Xie Yibing. 1965. The general circulation over the East Asia in summer [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 10 (1): 8–24.
- 王倩云, 罗德海, 王佳妮. 2016. 欧洲地区夏季热浪的特征及其与阻塞环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 21 (4): 367–379. Wang Qianyun, Luo Dehai, Wang Jiani. 2016. Characteristics of summer heatwaves over Europe and their link with European blocking circulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (4): 367–379, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15022.
- 王喜元, 闫业超, 岳书平, 等. 2016. 1961~2010 年长江流域高温热浪时空变化特征 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 38 (4): 602–609. Wang Xiyuan, Yan Yechao, Yue Shuping, et al. 2016. On spatiotemporal variations of heat waves in the Yangtze River Basin from 1961 to 2010 [J]. Journal of Yunnan University (in Chinese), 38 (4): 602–609, doi: 10.7540/j.ynu.20150821.
- 肖嗣荣, 张可慧, 刘芳圆, 等. 2010. 石家庄市高温热浪与“三大火炉”城市的对比研究 [J]. 地理与地理信息科学, 26 (5): 87–92. Xiao Sirong, Zhang Kehui, Liu Fangyuan, et al. 2010. Study of the high-temperature and heatwaves in Shijiazhuang compared to the “three-furnace cities” in China [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 26 (5): 87–92.
- 徐金芳, 邓振镛, 陈敏. 2009. 中国高温热浪危害特征的研究综述 [J]. 干旱气象, 27 (2): 163–167. Xu Jinfang, Deng Zhenyong, Chen Min. 2009. A summary of studying on characteristics of high temperature and heat wave damage in China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 27 (2): 163–167, doi: 10.3969/j.issn.1006-7639.2009.02.012.
- 许遐祯, 郑有飞, 尹继福, 等. 2011. 南京市高温热浪特征及其对人体健康的影响 [J]. 生态学杂志, 30 (12): 2815–2820. Xu Xiaozhen, Zheng Youfei, Yin Jifu, et al. 2011. Characteristics of high temperature and heat wave in Nanjing City and their impacts on human health [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 30 (12): 2815–2820.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (1): 80–85. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (1): 80–85, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2005.01.008.
- 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等. 2013. 1961~2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 9 (1): 15–20. Ye Dianxiu, Yin Jifu, Chen Zhenghong, et al. 2013. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961–2010 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9 (1): 15–20, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.01.003.
- 张剑明. 2008. 近 36 年来湖南省干旱的时空分布特征 [D]. 湖南师范大学硕士学位论文, 9–14. Zhang Jianming. 2008. The spatio-temporal distribution of drought in Hunan Province in past 36 years [D]. M. S. thesis (in Chinese), Hunan Normal University, 9–14.
- 张玛, 高庆九, 蒋薇. 2011. 2009 年夏季中国高温分析 [J]. 气象科学, 31 (5): 582–590. Zhang Ma, Gao Qingjiu, Jiang Wei. 2011. The preliminary analysis of heat wave in summer of 2009 in China [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31 (5): 582–590, doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2011.05.005.
- 张志薇, 王式功, 尚可政, 等. 2011. 华中地区近 50 年高温事件及大气环流成因分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 47 (2): 50–55. Zhang Zhiwei, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. 2011. Analysis of the atmospheric circulation anomalies of large-scale extreme high temperature events over central China in recent 50 years [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 47 (2): 50–55.
- 朱歆炜, 叶成志, 彭晶晶, 等. 2016. 湖南省 55 年极端气温事件变化特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 10 (2): 82–88. Zhu Xinwei, Ye Chengzhi, Peng Jingjing, et al. 2016. Characteristics analysis on extreme temperature in Hunan Province in recent 55 years [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 10 (2): 82–88, doi: 10.3969/j.issn.1002-0799.2016.02.013.