Vol. 49 No. 9 September 2023

罗娟,邓承之,朱岩,等,2023.2022 年盛夏重庆不同阶段高温特征及成因对比[J]. 气象,49(9):1108-1118. Luo J, Deng C Z, Zhu Y, et al,2023. Comparison on characteristics and causes at different stages of the extreme heat event in Chongqing in the 2022 midsummer[J]. Meteor Mon,49(9):1108-1118(in Chinese).

2022 年盛夏重庆不同阶段高温特征及成因对比*

罗 $f^{1,2}$ 邓承之 1,2 朱 岩 1,2 夏 蘩 1,2 庞 玥 1,2 朱浩楠 1,3

- 1 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室,重庆 401147
- 2 重庆市气象台,重庆 401147
- 3 重庆市气候中心,重庆 401147

提 要: 2022 年盛夏,重庆地区出现了两段高温天气,两段高温均为先大陆高压、后副热带高压控制下形成的。利用地面观测资料和 ERA5 再分析资料,对比分析了重庆大陆高压阶段和副热带高压阶段的高温特征差异。结果表明:大陆高压持续时间短,为高温发展阶段,高温强度弱、相对湿度大、气温日较差大;副热带高压持续时间长,为高温强盛阶段,高温极端性强,干热特征显著、夜间升温明显。热力学方程诊断表明,大陆高压阶段,增温为非绝热加热和垂直运动项共同作用;副热带高压阶段,白天增温主要源于非绝热加热,其次为温度平流项,垂直运动项作用弱,夜间低空干绝热或超绝热层减弱消失,翻越云贵高原的下沉气流带来的增温效应显著增强。地表热力差异表明,副热带高压阶段较大陆高压阶段地表潜热通量下降,感热通量显著上升,地表感热直接加热大气,对地面增温作用明显。

关键词:副热带高压,大陆高压,高温特征,温度局地变化,非绝热加热

中图分类号: P448,P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 082801

Comparison on Characteristics and Causes at Different Stages of the Extreme Heat Event in Chongqing in the 2022 Midsummer

LUO Juan^{1,2} DENG Chengzhi^{1,2} ZHU Yan^{1,2} XIA Fan^{1,2} PANG Yue^{1,2} ZHU Haonan^{1,3}

- $1~\mathrm{CMA}~\mathrm{Economic}~\mathrm{Transformation}~\mathrm{of}~\mathrm{Climate}~\mathrm{Resources}~\mathrm{Key}~\mathrm{Laboratory},~\mathrm{Chongqing}~401147$
- 2 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147
- 3 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract: Two extreme heat events, caused sequentially by continental high and subtropical high, occurred in Chongqing in the midsummer of 2022. Based on surface observation data and ERA5 reanalysis data, the differences in high temperature characteristics between the two stages dominated by continental high and subtropical high are compared and analyzed. The results show that during the short stage of continental high domination, the heating process was developing with less intensity, high relative humidity and bigger diurnal temperature range. During the long stage of subtropical high domination, the heat event exhibited great extremity, grew severe with pronounced xerothermic characteristics and nocturnal warming. The diagnosis of thermodynamic equation reveals that when the continental high was dominant, diabatic heating and vertical motion jointly contributed to the warming, while when subtropical high set in, diabatic heating and heat advection became the primary and secondary factors for the diurnal warming, and the contribution

^{*} 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J011)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-106)、重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-202201)和重庆市气象局青年基金项目(QNJJ-202317)共同资助

²⁰²³年3月2日收稿; 2023年8月13日收修定稿

第一作者:罗娟,主要从事灾害性天气预报和研究. E-mail:443153195@qq.com

通讯作者:邓承之,主要从事灾害性天气预报和研究. E-mail:95640680@qq. com

of vertical motion became insignificant. At night, as the dry adiabatic or super-adiabatic layer at lower level abated and vanished, the warming effect induced by downward motion on the northern side of Yunnan-Guizhou Plateau drastically intensified. The surface thermodynamic difference suggests that the surface latent heat flux decreased and sensible heat flux increased significantly under the domination of subtropical high than under the continental high. The increasing surface sensible heat directly heated the atmosphere, intensively driving up the surface temperature.

Key words: subtropical high, continental high, high temperature characteristic, local temperature change, diabatic heating

引言

随着全球气候变化和城市化进展加快,夏季极 端高温事件呈现出明显增多的趋势,高温热浪严重 影响人体健康,加剧能源消耗,威胁生态环境,已经 成为主要的气象灾害之一(杨宏青等,2013;许霜等, 2014;谢志清等,2015;高璇等,2023)。目前,高温成 因研究方面已取得不少成果,大气中的高压环流系 统是影响高温热浪的直接因素。对于我国夏季南方 地区高温而言,最主要的高压环流系统包括西太平 洋副热带高压(以下简称副热带高压)(林建等, 2005; 尹东屏等, 2006; 贾子康等, 2020)、大陆副热带 高压(以下简称大陆高压)(彭京备等,2007;陈丽华 等,2010;袁媛等,2018)、以及对流层中高层的南亚 高压(张琼和吴国雄,2001;钱永甫等,2002)。大陆 副热带高压是由谢义炳(1997)提出,有别于海洋上 空的副热带高压,大陆高压环流位于陆地上。2006 年夏季,大陆高压与西伸的副热带高压打通,控制川 渝地区,导致该地区出现历史罕见的高温天气(彭京 备等,2007;陈丽华等,2010)。副热带高压和南亚高 压异常偏强也是出现高温的重要原因,例如 2003 年 夏季,我国江南出现大范围异常高温天气就是由于 副热带高压的异常偏强和偏西,同时南亚高压异常 偏强和偏东造成的(彭海燕等,2005;林建等,2005; 杨辉和李崇银,2005)。2013年中国大范围的强高 温事件也与副热带高压和南亚高压的活动密切相 关,高压中空气的下沉绝热增温是形成高温天气的 主要物理机制(唐恬等,2014;杨涵洧和封国林, 2016;彭京备等,2016)。

此外,还有一些气象学者从热力学方程出发,从 热力成因方面对高温天气做了很多研究(周后福, 2005;张迎新和张守保,2010)。尹东屏等(2006)的 研究表明,在副热带高压控制下,非绝热加热是2003年7—8月江苏高温出现的关键,而温度平流和绝热加热对高温的贡献非常小。方宇凌和简茂球(2011)发现,在2003年夏季的三段持续性高温期间,大气升温主要是由非绝热加热造成,而温度平流对升温起负贡献。邹海波等(2015)研究了2013年盛夏中国中东部地区异常高温天气的成因,也得出类似的结论,非绝热加热(主要是长波净辐射)是夏季中国中东部地区升温最为主要的因子,而异常的温度平流(冷平流)则起着负贡献。

2022年夏季,中国南方地区再次出现持续性异 常高温天气,具有影响范围广、持续时间长、极端性 强的特点,高温天气综合强度为1961年有完整气象 观测记录以来最强,中央气象台连续多日发布高温 红色预警。针对2022年极端高温事件,林纾等 (2022)对高温干旱特征和环流形势进行了分析,表 明 2022 年夏季对流层高层南亚高压异常偏东,与中 层的西太平洋副热带高压相向而行,高压系统叠加 呈稳定正压结构,高压中心位于川渝上空,致使川渝 地区成为高温日数和极端高温事件次数的高值中 心。郝立生等(2022)认为 2022 年长江流域夏季异 常高温干旱气候事件的发生是高纬、中低纬、低纬热 带地区环流异常协同作用影响的结果。可见,现有 研究从大气环流异常的角度,表明异常偏强的高压 环流系统是 2022 年长江流域持续性高温天气的主 要原因,但对不同高压系统下高温天气学特征的认 识仍然不足。

重庆素有"火炉"之称,副热带高压和大陆高压 是高温天气最为直接和重要的影响系统,那么 2022 年盛夏(7—8月)不同高压控制下的重庆高温究竟 有何不同?为了回答这一科学问题,本文利用地面 观测资料和 ERA5 再分析资料,首先从环流形势、 高温强度、相对湿度和气温日较差等方面进行对比, 再从热力学方程出发进行诊断,探讨和总结不同高 压控制下重庆高温特征差异和可能成因,以期为高 温预警服务提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 资 料

本文使用的最高气温和相对湿度资料来自重庆国家地面站。环流分析和热力学方程诊断所用资料要素包括高度场、风场、温度场和垂直速度等,4.2小节中的地表热力差异特征分析采用的地表接收到的太阳辐射、地表感热通量和潜热通量数据,均来源于 ERA5 再分析数据集,资料时间分辨率为 1 h,水平分辨率为 0.25°×0.25°。地表感热和潜热通量在ERA5 中规定向下为正通量,向上为负通量,为了符合使用习惯,本文在垂直通量前乘以一1。另外,本文所使用的站点为沙坪坝和北碚站。

1.2 方 法

为了诊断分析造成 2022 年盛夏重庆不同阶段 高温天气的主要因子,有必要定量计算影响温度局 地变化的各项因子,由热力学第一定律可得温度随 时间的变化方程,即:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T - w(\gamma_{d} - \gamma) + \frac{1}{c_{p}} \frac{\mathrm{d}\mathbf{Q}}{\mathrm{d}t} \quad (1)$$

引起温度局地变化的因子主要有三项,分别为温度平流项 $-V\cdot \nabla T$,垂直运动项 $-\omega(\gamma_d-\gamma)$ 和非绝热加热项 $\frac{1}{c_p}\frac{dQ}{dt}$ 。其中 T 为温度,V 为水平风矢量, ω 为垂直速度, γ_d 为干绝热垂直递减率, γ 为环境温度垂直递减率, c_p 为定压比热容,Q 为外源加热量。由于 Q 的计算非常复杂,因此本文 4.1 小节进行热力学方程诊断时先计算出温度随时间变化、温度平流项和垂直运动项,再由式 (1) 推算出非绝热加热项。另外,本文给出了大陆高压阶段和副热带高压阶段各项因子的合成结果,是先根据式 (1) 使用ERA5 资料进行逐日逐时计算,再将不同阶段的计算结果合成。

2 高温天气概况

2022年盛夏,重庆出现大范围持续性晴热高温

天气,高温呈现出持续时间长、影响范围广和极端性 强的特点。图 1 给出了≥35℃和≥40℃高温日数历 年变化,由图可知,全市35℃以上高温日数达 49.7 d,超过 2006 年(49.4 d)(图 1a);40℃以上高 温日数达 15.8 d,刷新了 2006 年历史极值 (10.2 d), 高温日数为 1961 年有完整气象观测记录 以来同期最多(图 1b)。图 2a 为各区县≥40℃高温 日数分布,由图可见,高温天气范围广且持续时间 长,全市有 31 个区(县)(占比为 91%)出现 40℃以 上的高温天气,有 25 个区(县)(占比为 74%)40℃ 以上高温日数超过了 10 d,15 个区(县)(占比为 44%)超过20 d(图 2a)。图 2b 显示了日最高气温 刷新历史纪录的区(县),高温极端性突出,日最高气 温连创新高,15个区(县)(占比为44%)日最高气温 刷新当地有气象记录以来历史极值,其中北碚站连 续两天日最高气温达 45℃,超过 2006 年重庆綦江 站(44.5℃),这也是除新疆叶鲁番以外目前国家站 观测到的最高值。

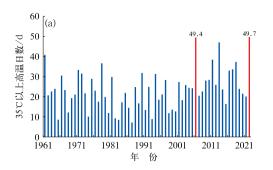
3 高温演变及不同阶段高温特征对比

图 3 显示了 2022 年盛夏重庆高温站数逐日演变。2022 年盛夏重庆高温主要有两段:第一段在7月4—17日,第二段在7月24日至8月29日。从逐日天气图演变来看(图略),两段高温均表现为先大陆高压控制,后转为副热带高压控制。第一阶段期间:7月4—8日为大陆高压控制,7月9—17日转为副热带高压控制;第二阶段期间:7月24—31日为大陆高压控制,而8月1—29日再次转为副热带高压控制。大陆高压和副热带高压控制的重庆高温特征究竟有何不同?

图 4 给出了不同高压阶段合成环流形势。由图可见,大陆高压阶段 200 hPa(图 4a)南亚高压位于伊朗高原至青藏高原上空,位势高度场有强的正距平,对流层中部 500 hPa(图 4b)强的正距平位于青藏高原到四川盆地,重庆受到大陆高压脊前侧的偏北气流控制。副热带高压阶段南亚高压明显东扩,异常强盛的南亚高压盘踞在长江流域上空(图 4c);500 hPa 副热带高压显著西伸北抬,且呈现出异常偏西的特征,长时间稳定控制重庆地区(图 4d)。因此,大陆高压和强盛的副热带高压是 2022 年盛夏重庆高温的关键环流系统。

图 3 还显示了高温的持续时间和强度,大陆高

压持续时间短,而副热带高压持续时间长。大陆高



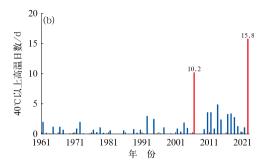
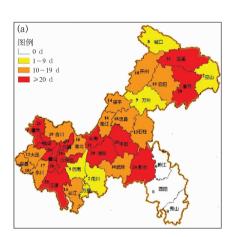
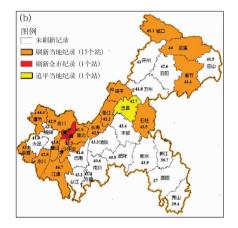


图 1 1961—2022 年重庆(a)≥35℃和(b)≥40℃高温日数年变化

Fig. 1 Annual variation of days with maximum temperatures (a) $\geqslant 35\,^{\circ}\text{C}$ and (b) $\geqslant 40\,^{\circ}\text{C}$ in Chongqing from 1961 to 2022





注:五角星代表北碚站和沙坪坝站位置。

图 2 2022 年盛夏重庆各区(县)(a) ≥40℃的高温日数和 (b)日最高气温刷新历史纪录的区(县)分布情况

Fig. 2 (a) Days of maximum temperature ≥40°C and (b) counties with record-breaking maximum temperature in Chongqing in midsummer of 2022

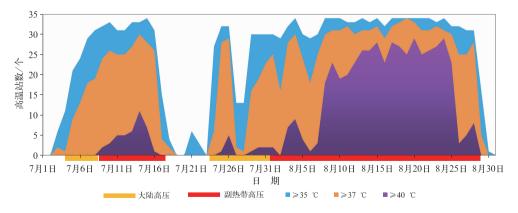


图 3 2022 年盛夏重庆逐日高温站数演变

Fig. 3 Time series of the stations with daily high temperature in Chongqing in midsummer of 2022

先大陆高压后副热带高压控制是否为重庆持续

性高温天气的普遍特征?图 5 给出了 2006 年盛夏 川渝异常高温天气 500 hPa 环流对比。由图可见, 2006 年盛夏重庆高温也具有类似环流演变特征,以 7 月下旬阶段性高温为例,7 月 22—27 日(图 5a)重 庆受大陆高压控制,高温处于发展阶段,随后副热带 高压西伸(图 5b),7 月 31 日后(图 5c),强烈西伸的 副热带高压与大陆高压打通,高温进入强盛阶段。可

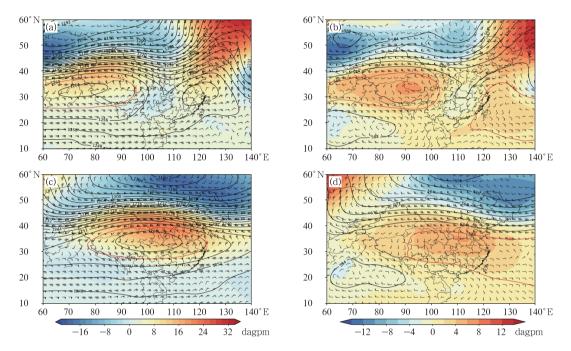


图 4 2022 年(a,b)7 月 4—8 日和 24—31 日大陆高压阶段以及(c,d)7 月 9—17 日和 8 月 1—29 日 副热带高压阶段平均位势高度(等值线,单位:dagpm)、位势高度距平(填色)和风场(风羽)分布 (a,c)200 hPa,(b,d)500 hPa

Fig. 4 Synoptic patterns of mean geopotential height (contour, unit; dagpm), geopotential height anomaly (colored) and wind (barb) under (a, b) the domination of continental high in 4-8 and 24-31 July 2022 and (c, d) the domination of subtropical high in 9-17 July and 1-29 August 2022

(a, c) 200 hPa, (b, d) 500 hPa

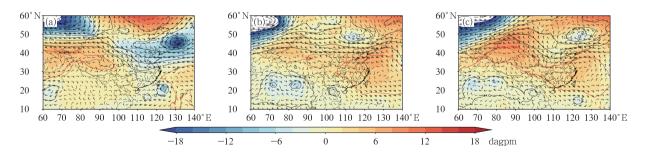


图 5 2006 年 7 月(a)22 日 08 时,(b)28 日 08 时,(c)31 日 08 时 500hPa 位势高度 (等值线,单位:dagpm)、位势高度距平(填色)和风场(风羽)分布

Fig. 5 Geopotential height (contour, unit: dagpm), geopotential height anomaly (colored), and wind (barb) at 500 hPa at (a) 08:00 BT 22, (b) 08:00 BT 28 and (c) 08:00 BT 31 July 2006

见,先大陆高压、后副热带高压控制是盛夏重庆持续 性高温的典型发展形势。

为了对比不同高压控制下高温的干热和湿热特征,图 6a 给出了北碚站 7—8 月逐日相对湿度、最高气温和气温日较差的演变。由图可知,大陆高压阶段以湿热为主,相对湿度为 60%~80%,而副热带高压阶段则以干热为主,特别是 8 月 8 日以后干热特征更为显著,随着温度攀升,相对湿度明显下降,仅为 30%~40%。这是因为大陆高压阶段持续时间短且出现在降雨过程后,相对湿度较高;而副热带高压阶段持续时间长,地表水分逐渐蒸发,且高温强度强于大陆高压阶段,使得空气饱和水汽压增加,从而导致相对湿度降低。

图 6a 还显示了大陆高压阶段气温日较差较大,约为 15℃左右,副热带高压阶段气温日较差明显减小,约为 10℃左右。这是因为副热带高压阶段除了最高气温在攀升之外,日最低气温升幅尤为显著,特别是 8 月 8 日以后,重庆多个国家站夜间最低气温在 34℃以上(图略)。以 8 月 20 日沙坪坝站气温为例(图 6b),可以看出,沙坪坝站有 23 h 气温在 35℃以上,18 h 气温在 37℃以上(09 时至次日 02 时),10 h 气温在 40℃以上(12—21 时)。

4 不同高压控制下高温成因对比

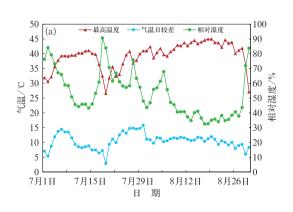
4.1 温度局地变化

为了寻找造成 2022 年盛夏重庆不同阶段高温

图 7 和图 8 分别给出大陆高压和副热带高压阶段 850 hPa 温度局地变化、温度平流项、垂直运动和非 绝热加热项分布。由图7可知,大陆高压控制期间, 重庆大部地区温度局地变化为正值,特别是中西部 地区升温明显(图 7a)。大陆高压阶段增温主要源 于垂直运动项和非绝热加热,两者贡献相当(图 7c, 7d)。而温度平流项作用较小,且在武陵山脉和云贵 高原北侧还有弱的冷平流(图 7b),这可能与重庆处 于大陆高压脊前侧,武陵山脉和云贵高原北侧存在 偏北气流携带冷空气在山前堆积有关。由图 8 可 知,副热带高压阶段,增温较大陆高压阶段更为强盛 (图 8a),各项因子对增温的贡献也有明显不同,副 热带高压阶段白天最重要的增温源于非绝热加热项 (图 8d),即太阳短波辐射、地面长波辐射、感热及尺 度较小的湍流等作用,其次为温度平流项(图 8b), 偏南风携带暖空气北上,在武陵山脉和云贵高原北 侧有一定的正贡献。另外,副热带高压阶段白天增 温垂直运动项贡献小(图 8c),较大陆高压阶段明显 减弱。

天气的主要因子,从热力学方程出发进行诊断分析。

图 9 给出了北碚站热力学方程各项因子时间高度演变。由图可知,副热带高压阶段白天低空 850 hPa 以下增温仍然主要源于非绝热加热作用 (图 9d),其次为温度平流项(图 9b),垂直运动项作用弱,但对于对流层中上部 700~300 hPa 的增温则主要源于垂直运动作用(图 9c),即下沉运动导致的绝热增温现象。另外,夜间与白天的情况也有明显不同,夜间在近地面有非绝热冷却(图 9d),温度平



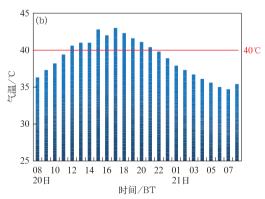


图 6 2022 年(a)盛夏北碚站逐日最高气温、气温日较差和平均相对湿度, (b)8 月 20 日沙坪坝站逐时气温演变

Fig. 6 (a) Daily maximum temperature, diurnal temperature range and mean relative humidity at Beibei Station from July to August of 2022, and
(b) hourly temperature series at Shapingba Station on 20 August 2022

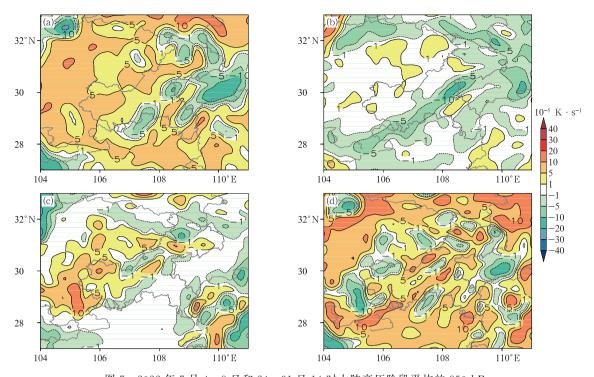


图 7 2022 年 7 月 4—8 日和 24—31 日 14 时大陆高压阶段平均的 850 hPa (a)温度局地变化,(b)温度平流项,(c)垂直运动项及(d)非绝热加热项的分布 Fig. 7 Distribution of mean (a) local temperature variation, (b) temperature advection, (c) vertical motion and (d) diabatic heating at 850 hPa under the domination of continental high at 14:00 BT in 4—8 and 24—31 July 2022

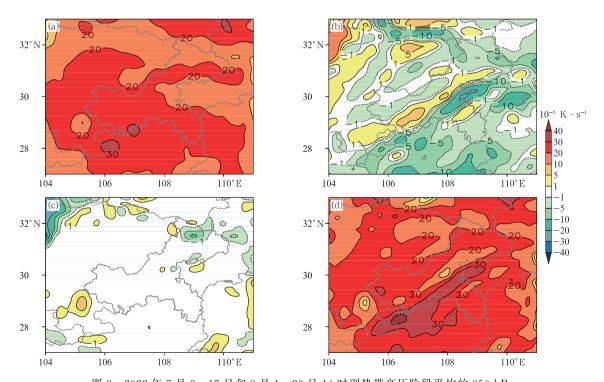


图 8 2022 年 7 月 9—17 日和 8 月 1—29 日 14 时副热带高压阶段平均的 850 hPa (a)温度局地变化,(b)温度平流项,(c)垂直运动项及(d)非绝热加热项的分布 Fig. 8 Distribution of mean (a) local temperature variation, (b) temperature advection, (c) vertical motion and (d) diabatic heating at 850 hPa under the domination of subtropical high at 14:00 BT in 9—17 July and 1—29 August 2022

流也以负贡献为主(图 9b),但垂直运动项的作用明显加大(图 9c),可见偏南风翻越云贵高原产生的下沉气流在夜间形成了一定的增温效应,这也是副热带高压阶段重庆夜间升温的原因之一。

垂直运动项造成的增温效应在高温不同阶段、白天和夜间均有明显不同,其原因与垂直速度和低空气温直减率有关。由垂直运动项一 $w(\gamma_d-\gamma)$ 可知,该项取决于w和 γ 。图 10 为重庆北碚站分别在

副热带高压阶段和大陆高压阶段气温直减率及垂直速度的时间-高度演变。由图 10a 可知,白天副热带高压阶段在非绝热加热作用下低空快速增温,800 hPa 以下形成了气温直减率在 $-10\sim-9$ \mathbb{C} • km⁻¹的干绝热甚至超绝热层结,环境大气的气温直减率和气块干绝热直减率相当, γ_a $-\gamma$ 较小,因此带来的增温效应非常弱。图 10b 显示大陆高压阶段这种干绝热层结较弱, γ_a $-\gamma$ 增大,因此由垂直运动项

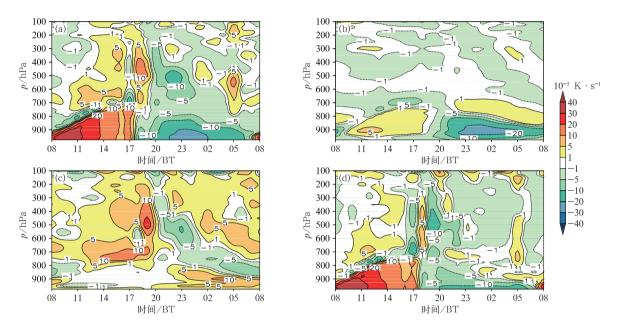


图 9 2022 年 7 月 9—17 日及 8 月 1—29 日副热带高压阶段北碚站平均(a)温度局地变化, (b)温度平流项,(c)垂直运动项及(d)非绝热加热项的时间-高度演变

Fig. 9 Time-height diagram of mean (a) local temperature variation, (b) temperature advection,
(c) vertical motion and (d) diabatic heating at Beibei Station under the domination
of subtropical high in 9-17 July and 1-29 August 2022

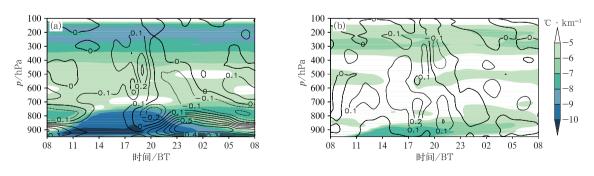


图 10 2022 年(a)7 月 9—17 日及 8 月 1—29 日副热带高压阶段,(b)7 月 4—8 日及 24—31 日大陆高压阶段平均的北碚站气温直减率(填色)及垂直速度(等值线,单位 Pa·s⁻¹)的时间-高度演变 Fig. 10 Time-height diagram of mean temperature lapse rate (colored) and vertical velocity (contour, unit: Pa·s⁻¹) at Beibei Station under (a) the domination of subtropical high in 9—17 July and 1—29 August, and (b) continental high in 4—8 and 24—31 July 2022

产生的增温效应增强。图 10a 还显示出,副热带高 压阶段低空气温直减率的日变化显著,夜间低空干 绝热或超绝热层消失,且下沉气流有所增强,因而垂 直运动项在夜间会产生更显著的增温效应。

综上所述,2022 年盛夏重庆副热带高压阶段增温明显强于大陆高压阶段。大陆高压阶段的增温主要为非绝热加热和垂直运动项共同作用。副热带高压阶段的白天增温主要源于非绝热加热项,其次为温度平流项,垂直运动项作用弱,但夜间随着低空干绝热或超绝热层减弱消失,翻越云贵高原的下沉气流带来的增温效应显著增强。

4.2 地表热力差异

上述分析表明,非绝热加热是重庆增温最为主要的因子。大气的热量主要来自地球表面,近地面非绝热加热包括地表长波辐射通量加热、地表感热通量加热以及潜热通量加热。地球表面吸收太阳短波辐射后,同时放射出长波辐射加热大气;地表感热通量是通过空气湍流影响地球表面和大气之间热量传递的物理量,感热通量的大小取决于地表和覆盖大气之间的温差、风速差、地表粗糙度和土壤相对湿

度等;地表潜热通量是通过相变影响地球表面和大气之间潜热传递的物理量,地球表面的蒸发表示有热量从地表转移到大气中。图 11 为大陆高压阶段和副热带高压阶段地表热力差异,由图可知,两个阶段地表接收到的太阳辐射量接近,大陆高压阶段平均太阳辐射通量约 700 W·m⁻²(图 11a),副热带高压阶段略有增加,为 750 W·m⁻²(图 11d)。地表感热通量在大陆高压阶段较小,仅为 100 W·m⁻²(图 11b),副热带高压阶段明显增大,达到 300~350 W·m⁻²(图 11e)。潜热通量则相反,大陆高压阶段较大,为 500 W·m⁻²(图 11c),副热带高压阶段明显减小,不足 200 W·m⁻²(图 11f)。

副热带高压阶段较大陆高压阶段太阳辐射变化不大,但地表感热通量显著上升,可能与持续晴热天气导致土壤湿度减小有关。易翔等(2016)利用WRF模式就土壤湿度扰动对高温天气影响进行模拟,结果表明土壤湿度减小会引起地面向上的感热通量增加。地表感热可以直接加热大气,对地面增温作用更为明显,而潜热不直接加热大气,需要通过凝结释放而对气温产生影响,对高温作用相对较小,因此副热带高压阶段高温强于大陆高压阶段。

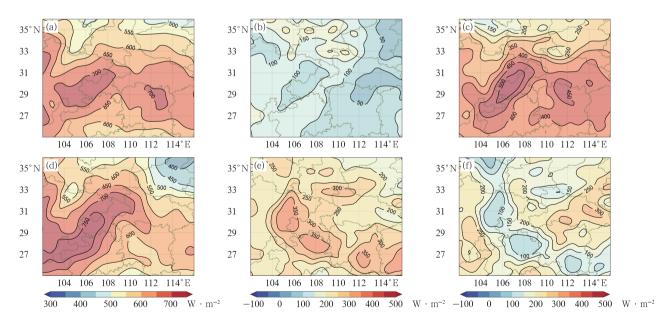


图 11 2022 年($a\sim c$)7 月 4—8 日和 24—31 日大陆高压阶段和 ($d\sim f$)7 月 9—17 日和 8 月 1—29 日副热带高压阶段的 (a,d)太阳辐射通量,(b,e)地表感热通量,(c,f)地表潜热通量

Fig. 11 (a, d) Solar radiation flux, (b, e) surface sensible heat flux and (c, f) latent heat flux under (a-c) the domination of continental high in 4-8 and 24-31 July and (d-f) the domination of subtropical high in 9-17 July and 1-29 August 2022

5 结论与讨论

2022 年盛夏重庆经历了罕见的晴热高温天气, 高温强度强、范围广、持续时间长。大陆高压和副热 带高压是此次重庆高温天气的关键环流系统,本文 对比分析了不同高压控制下高温特征差异及可能成 因,得到以下结论:

- (1)先大陆高压、后副热带高压控制是盛夏重庆 持续性高温典型发展形势,不同高压控制下高温特 征表现不同。大陆高压为持续性高温发展阶段,高 温强度较小,以35℃和37℃的高温为主,副热带高 压进入高温强盛阶段,出现大范围40℃以上的极端 高温天气。大陆高压阶段相对湿度较高,副热带高 压阶段由于温度高、饱和水汽压增大,干热特征更为 显著。另外,大陆高压阶段气温日较差减小,约为 15℃左右,副热带高压阶段气温日较差减小,约为 10℃左右。
- (2)温度局地变化分析表明,副热带高压阶段增温明显强于大陆高压阶段。大陆高压阶段增温主要为非绝热加热和垂直运动项共同作用;副热带高压阶段增温主要源于非绝热加热,其次为温度平流项,垂直运动项白天低空增温作用弱,但夜间随着干绝热或超绝热层减弱消失,翻越山脉的下坡风在云贵高原北侧带来显著的下沉增温效应。
- (3)地表热力差异表明,副热带高压阶段较大陆 高压阶段太阳辐射变化不大,地表潜热通量下降,感 热通量显著上升,地表感热可以直接加热大气,对地 面增温作用更为明显,因此副热带高压阶段高温强 于大陆高压阶段。

重庆极端高温成因复杂,除与大气环流形势有 关外,还与本地特殊地形密不可分。极端高温位于 重庆境内平坝、河谷及岭谷地带,特殊地形使得热量 难以散发。加之近年来城市化进展加快,"热岛效 应"也是重庆城市极端高温的重要因子(白莹莹等, 2015),因此,今后还需结合本地特殊地形及城市"热 岛效应"等对高温成因做更全面的研究。

参考文献

白莹莹,程炳岩,王勇,等,2015. 城市化进程对重庆夏季高温炎热天气的影响[J]. 气象,41(3):319-327. Bai Y Y,Cheng B Y,Wang Y,et al,2015. Influences of urbanization speed on the summer high temperature and sultry weather in Chongqing[J]. Meteor Mon,41(3):319-327(in Chinese).

- 陈丽华,周率,党建涛,等,2010. 2006 年盛夏川渝地区高温干旱气候 形成的物理机制研究[J]. 气象,36(5):85-91. Chen L H, Zhou L, Dang J T, et al, 2010. Research on physical mechanism of summer severe climatic high temperature and drought disasters in Sichuan and Chongqing Area in 2006[J]. Meteor Mon, 36 (5):85-91(in Chinese).
- 方宇凌,简茂球,2011. 2003 年夏季华南持续高温天气过程及热力诊断[J]. 热带海洋学报,30(3):30-37. Fang Y L, Jian M Q,2011. Diagnosis study of persistent heat waves in South China during summer 2003[J]. J Trop Oceanogr,30(3):30-37(in Chinese).
- 高璇,赵东升,郑度,2023.1961—2018 年中国地表温度变化的区域 差异[J]. 大气科学,47(4):995-1006. Gao X, Zhao D S, Zheng D,2023. Regional differences in surface temperature variation in China from 1961 to 2018[J]. Chin J Atmos Sci,47(4):995-1006 (in Chinese).
- 郝立生,马宁,何丽烨,2022. 2022 年长江中下游夏季异常干旱高温事件之环流异常特征[J]. 干旱气象,40(5):721-732. Hao L S, Ma N, He L Y,2022. Circulation anomalies characteristics of the abnormal drought and high temperature event in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer of 2022[J]. J Arid Meteorol,40(5):721-732(in Chinese).
- 贾子康,郑志海,封国林,2020. 中国南方地区盛夏高温类型及其对应的大尺度环流和海温异常[J]. 气象学报,78(6):928-944. Jia Z K,Zheng Z H,Feng G L,2020. Midsummer high temperature types in southern China and corresponding large-scale circulation and sea surface temperature anomalies[J]. Acta Meteor Sin,78(6):928-944(in Chinese).
- 林建,毕宝贵,何金海,2005. 2003 年 7 月西太平洋副热带高压变异及中国南方高温形成机理研究[J]. 大气科学,29(4):594-599. Lin J,Bi B G,He J H,2005. Physical mechanism responsible for western Pacific subtropical high variation and hot wave in southern China in July 2003[J]. Chin J Atmos Sci,29(4):594-599(in Chinese)
- 林纾,李红英,黄鹏程,等,2022.2022年夏季我国高温干旱特征及其 环流形势分析[J]. 干旱气象,40(5):748-763. Lin S,Li H Y, Huang P C, et al, 2022. Characteristics of high temperature, drought and circulation situation in summer 2022 in China[J]. J Arid Meteor,40(5):748-763(in Chinese).
- 彭海燕,周曾奎,赵永玲,等,2005.2003年夏季长江中下游地区异常高温的分析[J]. 气象科学,25(4):355-361. Peng H Y, Zhou C K, Zhao Y L, et al,2005. The analysis of abnormal high temperature in 2003 summer[J]. Sci Meteor Sin, 25(4):355-361(in Chinese).
- 彭京备,刘舸,孙淑清,2016. 2013 年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析[J]. 大气科学,40(5):897-906. Peng J B,Liu G,Sun S Q,2016. An analysis on the formation of the heat wave in southern China and its relation to the anomalous western Pacific subtropical high in the summer of 2013[J]. Chin J Atmos Sci,40(5):897-906(in Chinese).
- 彭京备,张庆云,布和朝鲁,2007.2006年川渝地区高温干旱特征及 其成因分析[J].气候与环境研究,12(3):464-474.Peng J B,

- Zhang Q Y, Bueh C, 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan-Chongqing Region in 2006[J]. Clim Environ Res, 12(3): 464-474 (in Chinese).
- 钱永甫,张琼,张学洪,2002. 南亚高压与我国盛夏气候异常[J]. 南京大学学报(自然科学版),38(3);295-307. Qian Y F, Zhang Q, Zhang X H,2002. The south Asian high and its effects on China's mid-summer climate abnormality[J]. J Nanjing Univ(Nat Sci),38(3);295-307(in Chinese).
- 唐恬,金荣花,彭相瑜,等,2014. 2013 年夏季我国南方区域性高温天气的极端性分析[J]. 气象,40(10):1207-1215. Tang T, Jin R H,Peng X Y, et al,2014. Analysis on extremely high temperature over southern China in summer 2013[J]. Meteor Mon,40(10):1207-1215(in Chinese).
- 谢义炳,1997. 盛夏亚洲及西太平洋大型天气与中国降水[C]//气象论文集. 北京:北京大学出版社,170-179. Xie Y B. 1997. Large scale weather in Asia and the Western Pacific during midsummer and precipitation in China[C]//Collected Works of Xie Yibing. Beijing, Peking University Press; 170-179 (in Chinese).
- 谢志清,杜银,曾燕,等,2015. 上海城市集群化发展显著增强局地高温热浪事件[J]. 气象学报,73(6):1104-1113. Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al, 2015. The exacerbated intensity and duration of the heat waves events over Shanghai as caused by urban clusters expansion[J]. Acta Meteor Sin,73(6):1104-1113(in Chinese).
- 许霜,付加锋,居辉,等,2014. 华北地区能源行业产出对气象条件变化的敏感性分析[J]. 资源科学,36(3):538-548. Xu S,Fu J F,Ju H,et al,2014. Sensitivity analyses of the energy output impacted by meteorological disasters in North China[J]. Resour Sci,36 (3):538-548(in Chinese).
- 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 H,Li C Y,2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer[J]. Clima Envir Res,10(1):80-85(in Chinese).
- 杨宏青,陈正洪,谢森,等,2013. 夏季极端高温对武汉市人口超额死亡率的定量评估[J]. 气象与环境学报,29(5):140-143. Yang H Q,Chen Z H,Xie S,et al,2013. Quantitative assessment of impact of extreme high temperature in summer on excess mortality in Wuhan[J]. J Meteorol Environ,29(5):140-143(in Chinese).
- 杨涵洧,封国林,2016. 2013 年盛夏中国持续性高温事件诊断分析 [J]. 高原气象,35(2):484-494. Yang H W, Feng G L,2016.

- Diagnostic analyses of characteristics and causes of regional and persistent high temperature event in China[J]. Plateau Meteor, 35(2):484-494(in Chinese).
- 易翔,曾新民,郑益群,等,2016. 高分辨率 WRF 模式中土壤湿度扰动对短期高温天气模拟影响的个例研究[J]. 大气科学,40(3): 604-616. Yi X,Zeng X M,Zheng Y Q,et al. 2016. Impact of soil moisture perturbation on high resolution simulation of short-range high temperature weather: a WRF case study[J]. Chin J Atmos Sci,40(3):604-616(in Chinese).
- 尹东屏,严明良,裴海瑛,等,2006. 副热带高压控制下的高温天气特征分析[J]. 气象科学,26(5):558-563. Yin DP, Yan ML, Pei HY, et al,2006. Synoptic character analysis on high temperature appearing under the control of subtropical high[J]. Sci Meteor Sin,26(5):558-563(in Chinese).
- 袁媛,丁婷,高辉,等,2018. 我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系[J]. 大气科学,42(6):1245-1262. Yuan Y, Ding T, Gao H, et al,2018. Major modes of midsummer air temperature in southern China and their relationship with sea surface temperature anomalies[J]. Chin J Atmos Sci,42(6):1245-1262 (in Chinese).
- 张琼,吴国雄,2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J]. 气象学报,59(5):569-577. Zhang Q, Wu G X,2001. The large area flood and drought over Yangtze River Valley and Its relation to the South Asia high[J]. Acta Meteor Sin, 59(5):569-577 (in Chinese).
- 张迎新,张守保,2010.2009 年华北平原大范围持续性高温过程的成因分析[J]. 气象,36(10):8-13. Zhang Y X,Zhang S B,2010. Causation analysis on a large-scale continuous high temperature process occurring in North China Plain[J]. Meteor Mon,36(10):8-13(in Chinese).
- 周后福,2005. 局地温度变化中各项因子的定量估算[J]. 气象,31 (10):20-23. Zhou H F,2005. Estimation of every element in local temperature variation[J]. Meteor Mon,31(10):20-23(in Chinese).
- 邹海波,吴珊珊,单九生,等,2015. 2013 年盛夏中国中东部高温天气的成因分析[J]. 气象学报,73(3):481-495. Zou H B, Wu S S, Shan J S, et al,2015. Diagnostic study of the severe high temperature event over mid-east China in 2013 summer[J]. Acta Meteor Sin,73(3):481-495(in Chinese).

(本文责编:俞卫平)