

川渝地区夏季极端气温变化及未来预估

陈诗颖

成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都
Email: chensycuit@126.com

收稿日期: 2020年12月24日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月27日

摘要

本文利用CN05.1数据集1961~2012年全国日平均气温资料和CMIP5模式数据集中的三个模式中等排放情境RCP4.5日平均气温资料, 计算川渝地区夏季区域平均气温; 并使用百分位阈值方法筛选出每一年夏季川渝极端高温事件与极端低温事件的发生频次, 分析川渝地区夏季近52年极端气温变化趋势, 并对未来直到21世纪末川渝地区夏季极端气温变化趋势做出预估。对观测资料的分析表明, 过去52年间, 川渝地区夏季极端高温事件整体发生频次呈上升趋势, 极端低温事件发生频次整体呈下降趋势, 说明川渝地区夏季极端高温呈上升趋势, 极端低温呈下降趋势。对RCP4.5情景下三个模式预估资料的研究表明, 未来直到21世纪末, 川渝地区夏季极端高温事件发生频次呈现持续上升趋势; 至2050年, 对比现在的极端高温阈值, 川渝地区每一年夏季将有超过一半的时间超过此极端高温阈值; 极端低温事件发生频次呈现下降趋势, 2050年以后, 川渝地区大部分年份的夏季可能均将不会发生极端低温事件。表明了在未来增暖的气候背景下, 川渝地区极端高温事件将有频发的趋势。

关键词

极端高温, 极端低温, 川渝地区, 变化趋势, 未来预估

Summer Extreme Temperature Changes and Future Projections in Sichuan-Chongqing Region

Shiyong Chen

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: chensycuit@126.com

Received: Dec. 24th, 2020; accepted: Jan. 20th, 2021; published: Jan. 27th, 2021

Abstract

Based on the CN05.1 daily observation temperature data from 1961 to 2012 and the daily model temperature data from CMIP5 models in the medium emission scenario RCP4.5, this study evaluated the extreme temperature in summer in Sichuan-Chongqing region between observation and models data. We used the percentile threshold method to define the extreme high temperature events and extreme low temperature events in Sichuan-Chongqing region in summer. The extreme temperature changes of Sichuan-Chongqing region in summer in recent 52 years were analyzed, and the change trend of summer extreme temperature in Sichuan-Chongqing region until the end of the 21st century was predicted. The analysis of the observed data showed that the frequency of extreme high temperature events in Sichuan-Chongqing region in summer had been on the rise as a whole, and the frequency of extreme low temperature events had been on the decline as a whole in the past 52 years, which indicated that the extreme high temperature in Sichuan-Chongqing region in summer was on the rise and the extreme low temperature was on the decline. The study of three models under RCP4.5 scenario showed that the frequency of extreme high temperature events in Sichuan-Chongqing region will continue to increase in the future. By 2050, compared with the current extreme high temperature threshold, more than half of the time in Sichuan-Chongqing region will exceed the extreme high temperature threshold in summer each year; the frequency of extreme low temperature events will decrease, and after 2050, Sichuan-Chongqing region will be affected by the extreme high temperature threshold. Extreme low temperature events may not occur in summer in most years of the region. It shows that under the future warming climate background, the trend of extreme high temperature events in Sichuan-Chongqing region will be much more frequent.

Keywords

Extremely High Temperature, Extreme Low Temperature, Sichuan-Chongqing Region, Trend of Change, Projection

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

近 50 年来, 在全球显著增温的环境下, 气候变化以及其影响已经成为环境和气象学界研究的热点。联合国政府间气候变化委员会(IPCC)的第 5 次报告会议中指出[1], 全球的平均温度在 1901~2012 年间上涨 0.89℃, 近 62 年全球气温以 0.12℃/10a 的速率上升, 近 50 年中国增温尤其明显, 全国的年平均地表气温增加 1.1℃, 增温速率为 0.22℃/10a, 高于全球同期平均增温速率[2] [3]。在全球变暖的大背景下, 极端气温事件导致的气象灾害频发, 比如高温干旱事件、暴雨洪涝灾害、霜冻天气等, 这些不仅导致人类的相关疾病与死亡风险的增加, 而且会给社会和农业生产带去很大负面的影响[4] [5]。例如 2006 年夏季川渝地区遭遇罕见高温, 且同期少雨, 严重影响川渝地区人民的生活, 对川渝地区造成严重生态与经济影响[6] [7]。气候变化问题也已经由单纯的科学问题转化为人类可持续发展的政治问题。联合国在 2015 年通过《巴黎协定》, 提出“力争把升温控制在较工业化前上升 1.5℃以内” [8]。

国内已经有较多学者对不同地区的极端气温变化规律进行了分析和讨论[9]-[19]。杨萍[9] (2010)等指出中国年极端气温相关指数与季节极端气温相关指数均体现了全国增暖趋势, 刘学华[10] (2006)等通过对

1961~2000年全国站点数据资料研究指出,近40年来,全国高温天与极端高温事件明显增加,气温表现变暖趋势,与全球变暖一致。有预估表明[11][12],21世纪中期中国区域平均最高与最低气温很可能增加 1.5°C ,且有可能增加超过 2.0°C 摄氏度,大值区位于中国西南,且到21世纪末,平均气温很可能增加 2.0°C ,西南地区增温幅度超过25%,明显增暖可能导致中国极端天气事件频率增加。

川渝两省毗邻青藏高原,境内存在山地、高原、盆地、丘陵、平原等多种不同地貌,地形复杂,局地因子影响较大,是一个典型的气候多变区。相互交错的特殊地形、特殊的地理位置使得川渝地区气温变化拥有着显著的局地特征,具有一定区域气候代表性。杨淑群[13](2008)等指出2006年是四川地区自1951年来发生极端高温伏旱最为严重的一年,多个研究[14][15][16][17][18]表明近50年来,特别是20世纪80年代以后,西南地区呈增暖趋势,并对我国整体增暖有一定贡献,且川渝大部分地区变暖趋势明显。胡豪然[19](2008)等利用1961~2006年145个川渝台站夏季平均温度资料研究表明,川渝夏季极端高温事件发生频次不大,事件高发区位于 103°E ,且在高温频次四川盆地西北部呈显著增长趋势,在川西高原西南部和川西南部山区呈弱增长趋势,盆地东南部呈减少趋势。很多研究在研究极端气温时采用的是站点日数据,利用某一个或某几个代表站瞬时温度来表征极端气温情况,而利用日均气温的研究较少。本文在前人的研究基础上,利用1961~2012年川渝地区日平均温度,计算出每年夏季平均温度,统计川渝夏季极端高温频次,极端低温频次,分析川渝地区夏季极端气温的年际与年代际变化趋势,并利用CMIP5模式中对川渝地区气温模拟较好的部分模式对川渝极端气温事件进行预估,研究未来川渝地区温度与极端气温事件可能的变化趋势做预估分析。

2. 资料与方法

2.1. 研究区域与资料概况

本文所使用的资料包括有观测资料与CMIP5模式RCP4.5情景下模式预估数据。观测资料为CN05.1数据集中1961~2012年全国日平均气温格点资料,选取川渝地区($26^{\circ}25'\text{E}\sim 34^{\circ}75'\text{E}$, $97^{\circ}25'\text{N}\sim 110^{\circ}25'\text{N}$)进行研究,川渝地区范围和地形情况如图1所示。四季定义参照气候学上定义方法:3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为冬季,12~次年2月为冬季。本文研究季节为夏季,即为每年6~8月。通过筛选,我们发现2001年夏季有27天数据缺失,故1961年~2012年夏季有日平均气温资料的天数共4757天。预估模式资料为CMIP5提供的RCP4.5情景下的地表气温模拟的日平均温度数据,时间范围为2006~2100年,共95年。我们同观测资料时间段对比,以2006~2012年时段数据检测各模式模拟准确性,以2013~2100年时段作为各模式对未来气温的预估基准。伍清[20](2017)等关于CMIP5模式对西南地区气温的模拟能力评估中指出,ACCESS1.0, CESM1-WACCM, CMCC-CMS, GFDL-CM2.1, GISS-E2-R-CC, MRI-ESM1, NorESM1-ME这7个模式对西南地区温度变化模拟能力相对较好。在筛选数据时发现, CESM1-WACCM, GISS-E2-R-CC, MRI-ESM1, NorESM1-ME这4个模式并没有提供可供下载的日资料,本文在文献提到的模式中,下载了全部提供日资料的模式数据,即ACCESS1.0, CMCC-CMS, GFDL-CM3三个模式的数据(其中GFDL-CM3模式为GFDL-CM2.1模式的更新版本),来对川渝地区未来极端温度事件做预估。模式的基本信息参见表1,更多模式细节请参阅<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>。

RCP4.5情景是2100年辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2 的情景。用全球变化评估模式模拟,这个模式考虑了与全球经济框架相适应的,长期存在的全球温室气体和生存期短的物质排放,以及土地利用的陆面变化。模式的改进包括历史排放及陆面覆盖信息,并遵循用最低代价达到辐射强迫目标的途径。为了限制温室气体排放,需要改变能源体系,多使用电能、低排放能源技术,开展碳捕获及地质储藏技术。通过降尺度的方法得到模拟的排放及土地利用的区域信息[21][22]。

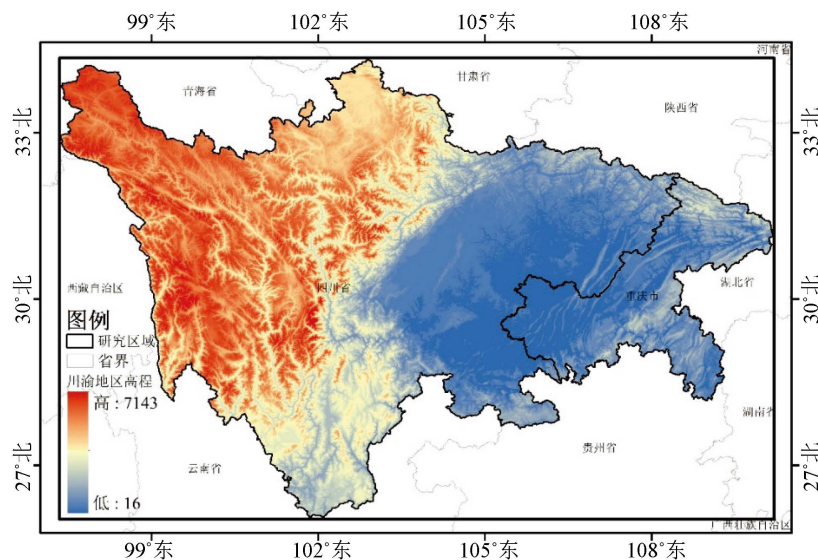


Figure 1. Study area and topographic map of Sichuan-Chongqing Region

图 1. 研究区域与川渝地区地形图

Table 1. Basic information of the model

表 1. 模式的基本信息

模式名称	所属国家	水平分辨率
ACCESS1.0	澳大利亚	192 × 145
CMCC-CMS	意大利	480 × 240
GFDL-CM3	美国	144 × 90

2.2. 方法

前人的很多研究是利用日最高温度和日最低温度来表征极端气温，但是通常来说，日最高温度和日最低温度表示的是在某个瞬间的绝对极端情况，与日均温度有差异。本文在研究中利用日平均气温研究川渝地区夏季极端气温变化情况，选择从概率统计的角度定义极端温度事件，即统计意义上的小概率事件，采用百分比阈值。研究中我们对川渝夏季地区日均气温资料进行升序排列，将位于 95% 位置的温度定义为极端高温事件阈值，气温高于这个阈值的事件被称为极端高温事件 ($T_H > 95th T$)；将位于 5% 位置的温度定义为极端低温事件阈值，气温低于这个阈值的事件被称为极端低温事件 ($T_L < 5th T$)。在确定出极端气温事件阈值的基础上，统计每一年夏季极端气温事件发生的频次，建立事件的时间序列，并进行线性回归，通过研究极端气温发生频次变化来研究川渝夏季极端气温年际、年代际变化。

下载的模式数据的温度采用开尔文温度，本文通过公式将其转换为摄氏温度再进行计算。摄氏度与开尔文温度的转换公式为：

$$T = K - 273.15 \quad (1)$$

公式(1)中 T 为摄氏温度，单位 $^{\circ}C$ ，K 为开尔文温度，单位 K。

3. 川渝地区夏季极端气温变化研究

3.1. 川渝地区夏季平均温度变化

图 2 为 1961 年~2012 年 52a 川渝地区夏季平均气温，从图 2 中可以看出，52 年以来，川渝夏季气温

呈弱上升趋势。1961~1989 年的气温在波动中保持稳定状态，高温年的气温呈降低趋势，最后七年间降温幅度较大，下降约 0.35°C ；低温年的气温呈上升趋势，最后七年间上升较快，上升幅度为 $0.2^{\circ}\text{C}/7\text{a}$ 。1990 年后气温变化规律性减弱，但气温在波动中上升明显，可以看出，1990 年后，低温年的温度明显上升，高温年温度升温缓慢，但 2006 年，川渝夏季气温异常偏高，温度达到 17.69°C 。

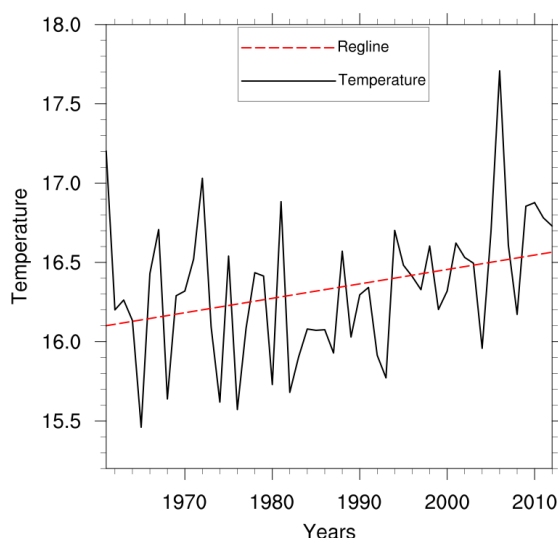


Figure 2. The time series of average summer temperature in Sichuan-Chongqing region for 1961~2012

图 2. 1961~2012 年川渝地区夏季平均气温时间序列

3.2. 川渝地区夏季极端高温变化

通过对川渝地区 1961~2012 年夏季日平均气温升序排序，找到位于 95%位置的气温，可以确定出极端高温的阈值为 18.97°C ，日平均气温 $\geq 18.97^{\circ}\text{C}$ 的气温为极端高温。

图 3 为川渝地区 1961~2012 年 52a 夏季极端高温事件发生频次的时间序列。从图 3 可以看出，这 52 年川渝夏季极端高温事件并不频发，但整体呈上升趋势，线性趋势系数为 0.105，增幅约 1 天/10a，极端高温事件没有随着时间的增加而显著增加。与气温变化相似，在八十年代至九十年代极端高温事件发生频次有一段时间的下降。1961~1973 年极端高温频次在波动中保持着稳定的状态，没有明显的升高或者降低。1976 年以后至 1996 年以前，极端高温事件发生频次有下降，在这段时间内，极端高温频发的年份中，极端高温发生频次有下降的趋势比较明显，最为明显的是 1984 年至 1987 年，极端高温事件发生的次数比周期其余年份都低，与那段时期的气温变化较为一致。1996 年以后，极端高温发生频次增加，特别是 2000 年以后，极端高温发生频次上升更为明显。2006 年极端高温频次有一个明显的突变，在一个较高的气温条件下，夏季发生了 27 次极端高温事件，2010 年也是极端高温高发年。可以认为，进入 21 世纪后，极端高温事件显著增加。特别指出，1963 年，1965 年，1968 年，1973 年，1974 年，1975 年，1979 年，1982 年，1987 年，1993 年，2008 年这 11 年没有极端高温事件发生。其中 1973 年与 1975 年本属于气温较高的年份，但没有极端高温事件的发生，可能是受到这段时期降温的影响。

3.3. 川渝地区夏季极端低温变化

通过对川渝地区 1961~2012 年夏季日平均气温升序排序，找到位于 5%位置的气温，可以确定极端低温的阈值为 13.35°C ，夏季日平均气温 $\leq 13.35^{\circ}\text{C}$ 为极端低温。

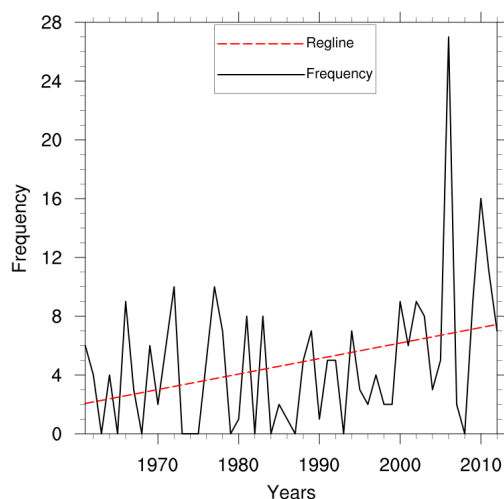


Figure 3. The frequency series of extreme high temperature events in summer in Sichuan and Chongqing area for 1961~2012

图 3. 1961~2012 年川渝地区夏季极端高温事件发生频次时间序列

图 4 为川渝地区 1961~2012 年 52a 夏季极端低温事件发生频次的时间序列。从图 4 中可以看出，52 年间，川渝地区夏季极端低温事件发生频次呈下降趋势，线性趋势系数为 -0.051 ，下降幅度约 0.5 天/10a。极端低温事件不随着时间的增加而显著降低。极端低温事件发生的频次没有明显的周期，极端低温事件在波动中减少。与极端高温相似，极端低温事件高发期普遍在气温偏低的年份，而气温偏高的年份极端低温事件发生较少。有部分年极端低温频次与温度不相匹配，主要位于二十世纪八十年代以后，比如 1985 年，温度较 1984 年与 1986 年没有明显降低，但极端低温发生频次较高，达到 9 天，这可能与八十年代川渝地区异常降温有关。1999 年温度有降低，但极端低温事件发生较少。进入二十一世纪后，极端低温发生的频次开始变得没有规律，最具有代表性的是 2010 年，2010 年川渝夏季温度较高，在极端高温天气达到 16 天的同时，极端低温天气达到 9 天。特别指出，在 1994 年，1995 年，2006 年川渝地区夏季没有极端低温事件发生。

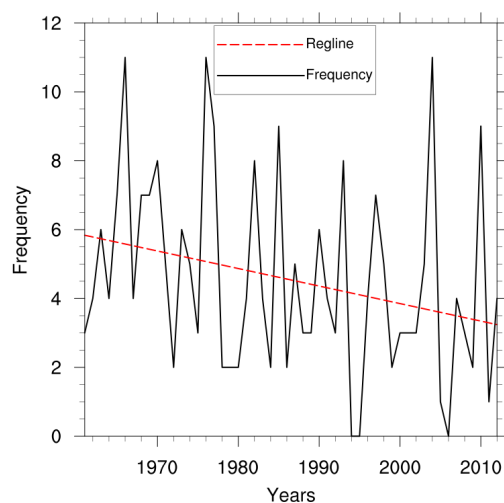


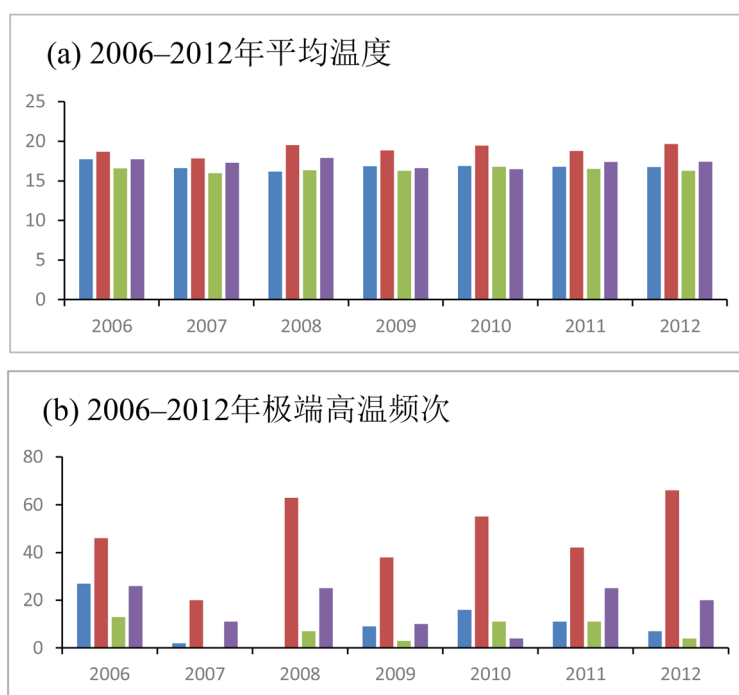
Figure 4. The frequency series of extreme low temperature events in summer in Sichuan and Chongqing area for 1961~2012

图 4. 1961~2012 年川渝地区夏季极端低温事件发生频次时间序列

4. 川渝地区夏季极端气温事件未来预估

4.1. 模式验证

为了对川渝地区未来极端气候发展趋势进行进一步的了解,本文利用 CMIP5 中等排放情景下 RCP4.5 数据对 2013 年~2100 年川渝地区极端高温频次、极端低温频次及其年际与年代际变化进行了分析。首先利用 2006 年~2012 年的观测数据验证 CMIP5 模式 RCP4.5 情境下试验数据对川渝地区平均温度,极端高温频次,极端低温频次的模拟能力。图 5(a)为实际观测资料与文章所选取的 RCP4.5 情境下三个模式 (ACCESS1.0, CMCC-CMS, GFDL-CM3)模式数据关于川渝地区夏季平均气温。从图 5(a)可以看出,从夏季平均温度来看, ACCESS1.0 模式观测出的温度比实际观测温度高,误差约 $1^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$; CMCC-CMS 模式观测的气温比实际偏低,但误差较小,在 1°C 以内; GFDL-CM3 模式观测的气温与实际相比有高有低,误差较小,约 $-0.5^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。对于川渝地区夏季平均温度观测上, CMCC-CMS 模式结果与观测气温相比误差最小, ACCESS1.0 模式结果误差最大。图 5(b)为实际观测资料与文章所选取 RCP4.5 情景下三个模式 (ACCESS1.0, CMCC-CMS, GFDL-CM3)观测数据关于川渝地区夏季极端高温频次柱状图。从图中可以看出, ACCESS1.0 模式数据中的极端高温频次远高于实际观测,误差超过 20 天,这可能与其对温度观测普遍偏高有关。CMCC-CMS 模式观测数据中极端高温频次比实际观测频次较低,但误差较小,大部分年观测误差在 5 天以内。GFDL-CM3 模式观测数据中极端高温频次比实际观测频次较高,大部分年观测误差在 10 次以内。从结果上看, CMCC-CMS 模式对极端高温观测结果最好, ACCESS1.0 模式观测结果较差。图 5(c)为实际观测资料与文章所选取 RCP4.5 情境下三个模式 (ACCESS1.0, CMCC-CMS, GFDL-CM3)观测资料关于川渝地区夏季极端低温频次柱状图。从图中可以看出, ACCESS1.0 模式因为温度观测较高的原因,极端低温事件发生频次较低,大多数年为 0 天。CMCC-CMS 模式观测出的极端低温频次比实际观测出的极端低温频次误差较大,误差约 2~9 天。GFDL-CM3 模式观测出的极端低温事件频次与实际观测出的极端低温频次较为接近,误差在 1~3 天。从结果可以看出, GFDL-CM3 模式关于极端低温频次的观测结果较好。因为参考年份较少,趋势变化不明显,在此不对趋势变化对比多加概述。



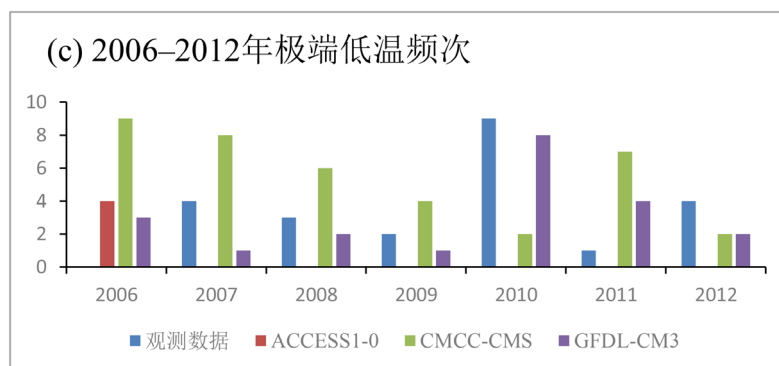


Figure 5. The actual observation data and ACCESS1-0, CMCC-CMS, GFDL-CM3 models RCP4.5 data in Sichuan- Chongqing region for 1961-2012 summer (a) the average temperature, (b) the frequency of extreme high temperature events, and (c) the frequency of extreme low temperature events

图 5. 实际观测与 ACCESS1-0, CMCC-CMS, GFDL-CM3 模式 RCP4.5 情景下模拟数据川渝地区 2006~2012 年夏季(a) 平均温度; (b) 极端高温事件频次; (c) 极端低温事件频次

4.2. ACCESS1.0 模式预估结果

图 6(a)为 ACCESS1.0 模式资料关于川渝地区 2013~2100 年 88 年的夏季平均温度的预估。从图中可以看出, 未来 88 年, 川渝夏季气温呈上升趋势, 线性趋势系数为 0.029, 升温幅度为 0.3°C/10a, 预计到二十一世纪末, 川渝地区夏季平均温度可达到 21.8°C。在 ACCESS1.0 的预估中, 2013~2030 年气温上升幅度不大, 在波动中保持稳定状态, 但 2030 年以后, 气温显著上升。在 2040~2050 年有两次较为显著的气温的突变, 一次显著升温, 一次显著降温, 升温降温幅度均为 1.5°C/2a。温度变化没有明显的周期, 但依旧存在低温年与高温年的交替变化, 我们可以明显看出, 2013 年至 2080 年以前, 高温年的温度逐渐上升, 上升幅度约 0.3°C/10a, 2080 年以后, 高温年有一次突增, 在三年内上升了 0.8°C, 达到 22.4°C, 其后十年高温年的温度保持稳定。在 2090 年附近有一次温度的负突变, 温度约下降 2°C, 但接近 2100 年时, 温度又很快上升回去。低温年的温度在 2030 年以前没有太大变化, 稳定在 18.8°C, 2030 年以后除了 40 年代发生的一次低温突变外, 直至 2090 年, 低温年的气温逐渐上升, 上升幅度约 0.3°C/10a。2080 年以后低温年的温度基本保持稳定, 约 20.6°C。图 6(b)是 ACCESS1.0 模式对川渝地区极端高温事件预估的时间序列图。从图中可以看出, 未来 88 年, 川渝地区夏季极端高温事件发生的频率呈上升趋势, 线性趋势系数为 0.385, 上升幅度约 3.85 天/10a。可以看出, 在高温年极端高温事件频发, 低温年极端高温事件较少。除了部分突变年份, 不论是极端高温多发年还是低发年, 2030 年以后, 极端高温的频次都在逐年增加, 且在极端高温高发的年份中, 川渝地区夏季有超过 2 个月的时间日平均气温超过目前的极端高温阈值, 2070 年后, 几乎整个夏季的日平均气温都超过现有阈值。就算是在极端高温较少的年份中, 2040 年以后极端高温频次也超过了两个月, 部分年甚至能达到 80 天。也就是说, 在 2040 年以后, 川渝地区每一年夏季都有超过 2/3 的时间气温超过现在的极端高温阈值, 部分年份甚至整个夏季都超过。在 2090 年以后, 极端高温频次有一次下降, 但下降幅度不大, 且很快回升。在 ACCESS1.0 模式的预估结果中, 直至二十一世纪末, 极端高温频次将比二十一世纪初上升 50%, 达到 90 天, 几乎整个夏季的日均温都超过目前的极端高温阈值。图 6(c)是 ACCESS1.0 模式对川渝地区极端高温事件预估的时间序列图。在 ACCESS1.0 模式中, 除了两次气温突变降低的年份中有 1~2 天的气温低于现在的极端低温阈值, 其余年份夏季均无极端低温事件。

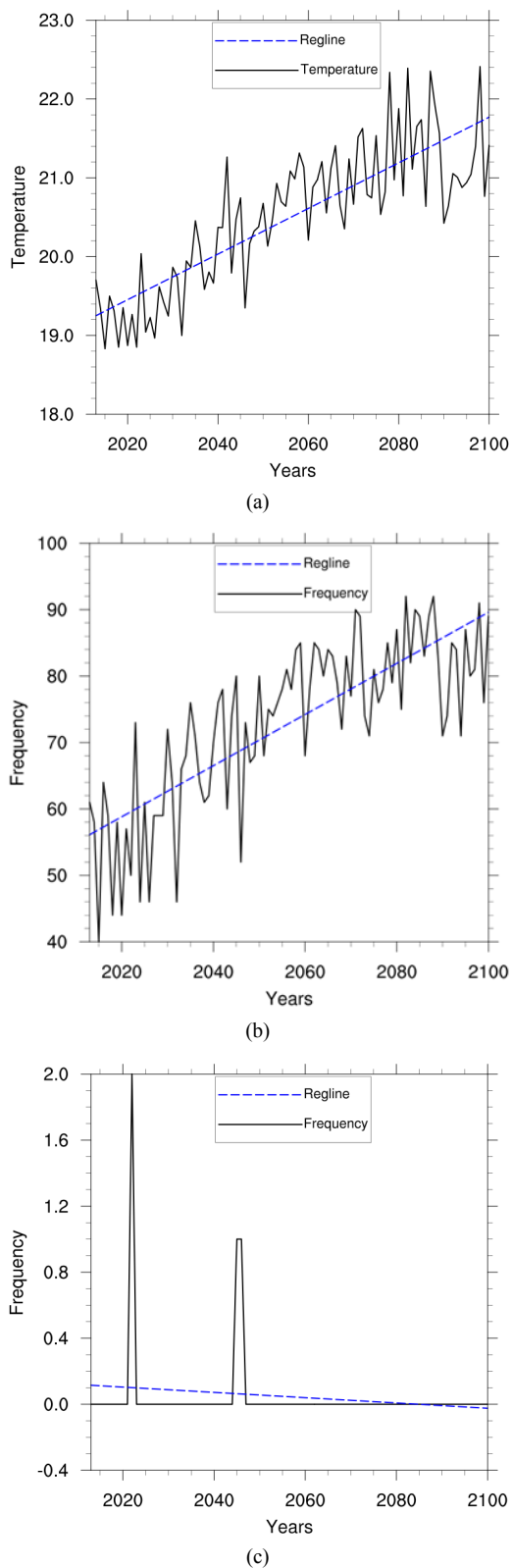
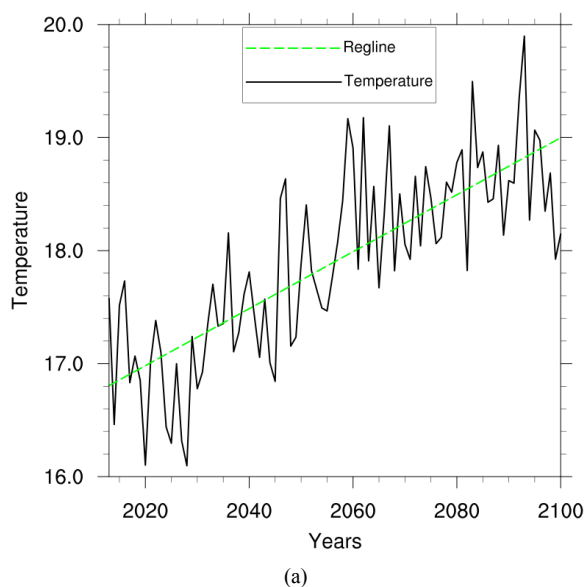


Figure 6. The time series of (a) average temperature, (b) frequency of extreme high temperature events, and (c) frequency of extreme low temperature events in summer in Sichuan and Chongqing area for 2013-2100 estimated by ACCESS1-0 model
图 6. ACCESS1-0 模式预估川渝 2013~2100 年夏季(a) 平均气温; (b) 极端高温频次; (c) 极端低温频次时间序列

4.3. CMCC-CMS 模式预估结果

图 7(a)为 CMCC-CMS 模式预估下, 川渝地区 2013 年~2100 年 88a 夏季平均气温的时间序列图, 从图中可以看出, 在 CMCC-CMS 的预估中, 川渝地区夏季温度在波动中呈上升趋势, 线性趋势系数为 0.025, 升温幅度约为 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在 2013~2030 年有一段时间的降温, 高温年和低温年的气温都有一定程度的下降, 2030 年以后, 不论是高温年还是低温年, 除了 2040 年至 2050 年有一次温度的突变以外, 温度都在逐渐上升。在图中可以清楚的看出, 在这个模式的预估中, 夏季平均气温存在一个周期为 20a 的变化, 每个周期之间温度呈上升趋势, 周期内温度存在高温年与低温年的交替, 但并不是每一个高温年的温度都在上升, 部分高温年的温度较之前的年份有下降, 但低温年的温度在周期内变化不大。至 2090 年, 川渝地区夏季平均温度最高可以达到 19.9°C 。图 7(b)为 CMCC-CMS 模式预估中川渝地区 2013~2100 年夏季极端高温事件发生频次的时间序列图, 从图中可以看出, 川渝地区极端高温事件发生频次在 88 年中呈上升趋势, 线性趋势系数为 0.439, 上升幅度约为 4.5 天/10a。极端高温事件发生频次的周期性不明显, 但我们可以以事件发生频率的高低将时间分为三个部分, 2013 年~2030 年, 极端高温事件以 10a 为周期呈下降趋势, 2030 年至 2055 年, 除了四十年代与五十年代有两次极端高温事件频次的突变, 其他极端高温高发的年份中, 频次变化不大, 基本维持在 21~24 天, 极端高温低发的年份中, 极端高温发生频次呈下降趋势, 从 18 天下降到 10 天。2055 年以后, 川渝地区每年夏季几乎有 1~2 个月的时间日平均气温高于现有的极端高温阈值。极端高温事件以 10 天为周期呈上升趋势, 上升幅度约 6 天/10a。在周期内极端高温高发的年份中, 极端高温发生频次有升有降, 但低发分年份中, 极端高温发生频次基本不变, 维持在 30 天左右。特别指出, 在这个模式的预估中, 2020 年与 2027 年夏季川渝地区日平均气温均没有超过现在的极端高温阈值。图 7(c)为 CMCC-CMS 模式预估中川渝地区 2013~2100 年夏季极端低温事件发生频次的时间序列图, 从图中可以看出, 川渝地区极端低温事件发生频次在 88 年中呈下降趋势, 线性趋势系数为 -0.02566 。极端低温事件发生频次的周期性不明显, 但类似与极端高温, 我们可以利用极端低温发生频次的区别将时间分为三个部分, 2013~2030 年, 极端低温发生频次有上升趋势, 2030~2055 年, 极端低温高发年份中, 极端低温变化频次基本一致, 约 4~5 天。2055 年以后, 极端低温发生频次下降, 除了少数年份发生突变以外, 其余年份极端低温均为 0~2 天。在七十年代有一次频次的突变, 达到 5 天。



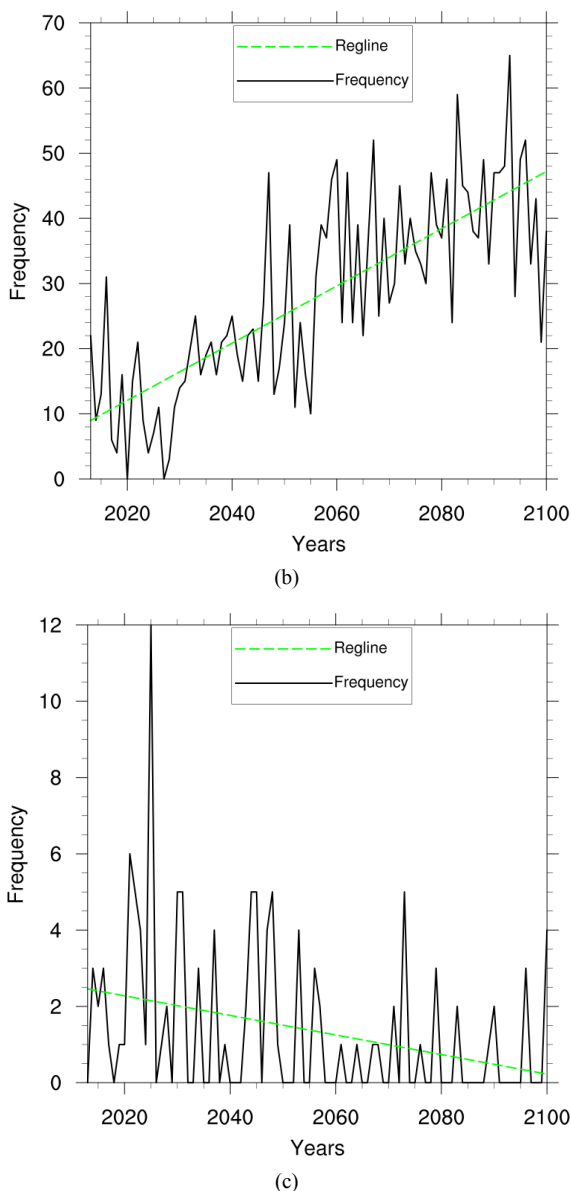


Figure 7. The same as Figure 6, but for CMCC-CMS model
图 7. 同图 6, 但为 CMCC-CMS 模式结果

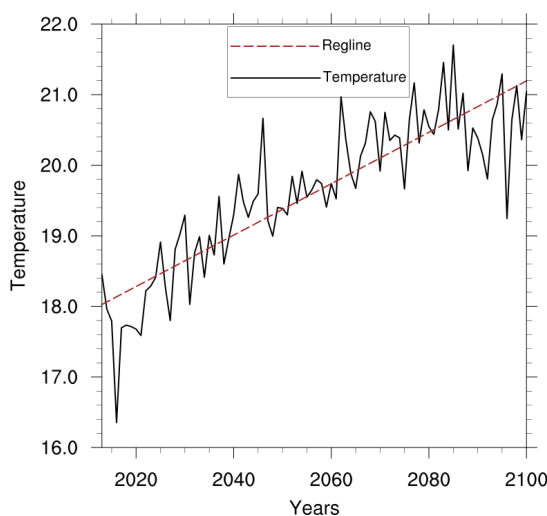
4.4. GFDL-CM3 模式预估结果

图 8(a)为 GFDL-CM3 模式预估下, 川渝地区 2013 年~2100 年 88 年的夏季平均气温的时间序列图, 从图中可以看出, 在 GFDL-CM3 模式的预估中, 川渝地区夏季温度在波动中呈上升趋势, 线性趋势系数为 0.3641109, 上升幅度约 0.36℃/10a。2012~2020 年间有一次温度的突变, 气温下降 1.5℃, 2020~2080 年, 气温在波动中上升, 可以认为, 在这一时间段内, 存在以 10a 为周期的周期变化, 周期与周期之间呈上升变化, 升温幅度约 0.3℃/10a。周期内温度有升有降, 每个周期内有部分年温度突增, 低温年的温度稳定上升。2080 年以后, 有气温的下降, 幅度约 0.5℃/10a。图 8(b)为 GFDL-CM3 资料中, 川渝地区 2013~2100 年极端高温事件发生频次的时间序列, 在 GFDL-CM3 的模式中, 未来川渝地区夏季极端高温事件发生频次呈上升趋势, 线性趋势系数为 0.626, 中上升, 2065 年以后, 极端高温发生频次基本达到

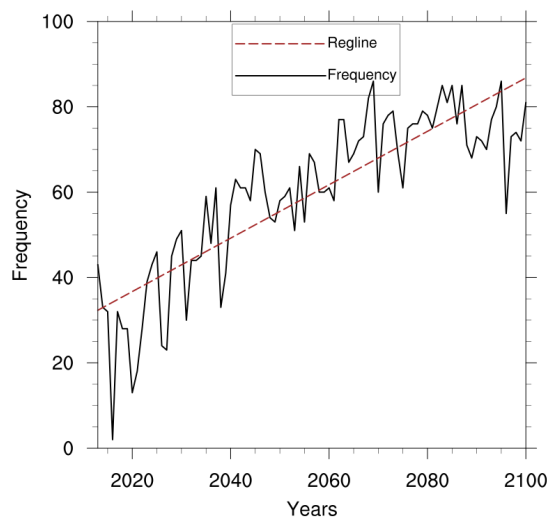
稳定, 高发年稳定在 80 天左右, 低发年稳定在 60 天左右。二十一世纪 30 年代以后, 每一年夏季川渝地区至少有一个月时间日平均气温超过现在的极端高温阈值。60 年代以后, 极端高温天气天数超过 58 天。在二十一世纪末有一次突变下降, 但依旧维持在 60 天左右。图 8(c) 为 GFDL-CM3 模式资料中, 川渝地区 2013~2100 年夏季极端低温发生频次的时间序列。在 GFDL-CM3 的模式预估中, 未来 88 年, 川渝地区夏季极端低温发生频次呈下降趋势, 线性趋势系数为 -0.02 , 无明显的周期变化。直至 2048 年, 川渝地区夏季极端低温发生频次降低至 1 天, 在 2048 年极端低温事件频次有上升, 上升为 3 次, 这之后, 直至 2100 年, 除了少数年份有一次极端低温事件发生外, 其余年均无极端低温事件发生。

4.5. 预估结果总结

结合观测资料和模式资料的对比与 RCP4.5 三个模式的预估结论, 川渝地区 2013~2100 年夏季 88 年间, 夏季平均气温将持续在波动中上升, 升温幅度约 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图 9(a)), 最高夏季平均温度可能达到 20.8°C , 较快的升温将持续到 2080 年, 其后气温上升速度将减缓, 至 21 世纪末期可能有一段时期会存在气温小幅度下降。



(a)



(b)

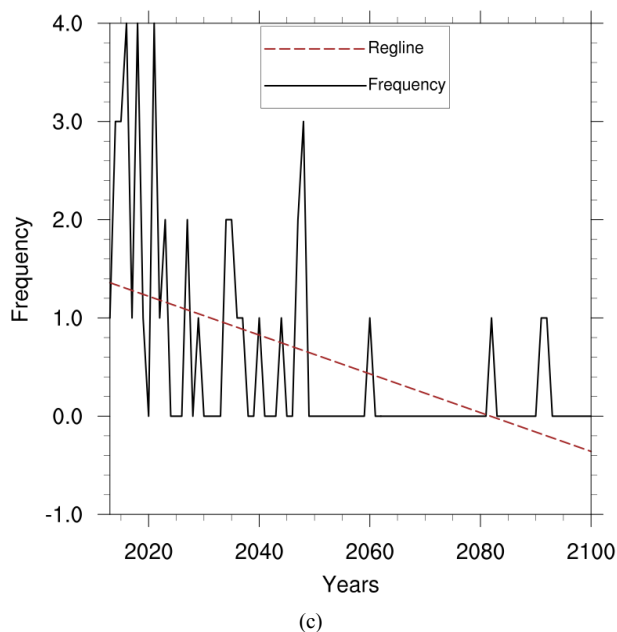
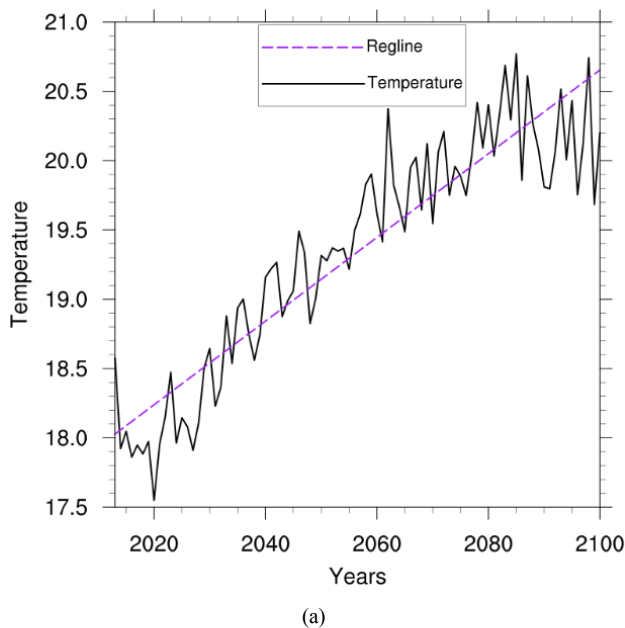
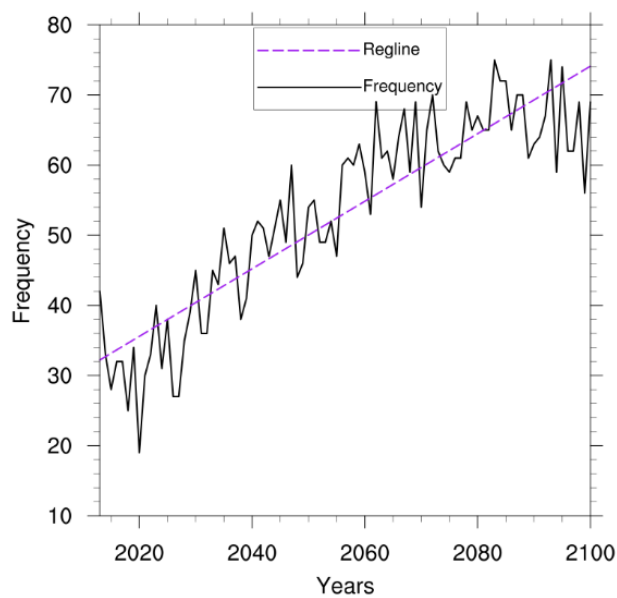


Figure 8. The same as Figure 6, but for GFDL-CM3 model
图 8. 同图 6, 但为 GFDL-CM3 模式结果

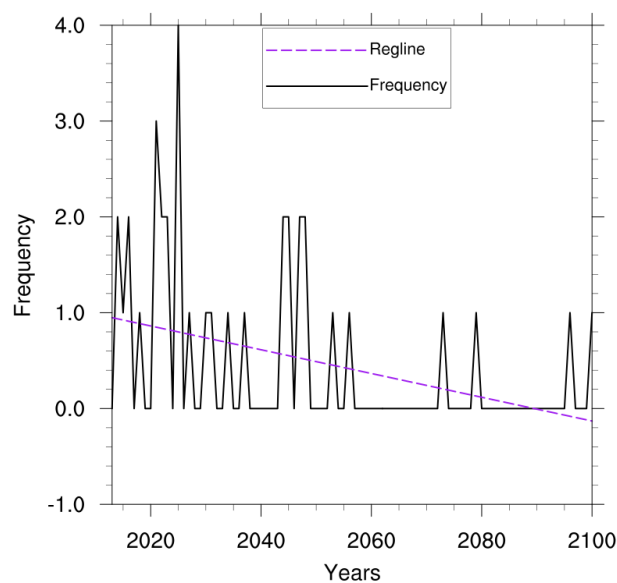
未来极端高温事件将会持续增加, 整体上升幅度约 5 天/10a (图 9(b)), 2050 年以后, 川渝地区每一年夏季可能有超过一半的时间超过现在的极端高温阈值, 部分年超过现在的极端高温阈值的天数甚至超过两个月。2080 年后, 较多年份超过两个月的时间日均气温比现在的极端高温阈值高。2020~2060 年是极端高温上升较快的时期, 2060 年以后, 上升趋势减缓, 呈弱上升趋势。

未来川渝地区夏季极端低温事件发生频次依旧较少, 且呈持续下降趋势(图 9(c)), 2030 年以后, 夏季日均气温低于现在的极端低温阈值的天数均较少, 可能至 2050 年以后, 川渝地区夏季只有极少数年有 1 天日均气温会低于现有的极端低温阈值。





(b)



(c)

Figure 9. The same as Figure 6, but for ensemble mean of ACCESS1-0, CMCC-CMS and GFDL-CM3 models

图9. 同图6, 但为 ACCESS1-0、CMCC-CMS 和 GFDL-CM3 三个模式集合平均结果

5. 结论

1) 1961~2012 年, 川渝地区夏季平均气温整体呈上升的变化趋势, 但在 80~90 年代时期有气温的下降, 进入 21 世纪后升温显著。

2) 1961~2012 年, 川渝地区极端高温天气均较少, 但整体呈上升趋势, 与平均气温变化相适应, 2006 年极端高温事件频发。极端低温天气整体呈下降趋势。2010 年, 在有一个较高的夏季平均气温的条件下, 极端高温与极端低温事件发生频率相对较高。

3) 在选取的三个 RCP4.5 的模式中, CMCC-CMS 模式对川渝地区夏季平均气温与极端高温天气的观测结果较好, GFDL-CM3 模式对川渝地区夏季极端低温频次的观测结果较好。

4) 根据模式观测资料显示, 川渝地区未来 88 年气温将持续上升, 升温幅度约 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最高夏季日平均气温可能达 20.8°C ; 极端高温事件发生频率将上升, 上升幅度约 5 天/10a, 2060 年后极端高温上升趋势减弱, 2080 年后部分年有降低, 但整体仍呈弱上升趋势; 极端低温事件发生频率下降, 直至 2050 年以后。可以得出, 在未来川渝地区升温的大环境下, 极端高温事件将会频发。

本文对川渝地区极端气温变化进行了一些统计分析, 并对其未来的变化趋势做了预估, 但其影响机制还有待更进一步的分析与探索。

参考文献

- [1] 秦大河, Stocker, T. 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, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 23-33.
- [3] Ren, G.Y., Ding, Y.H., Zhao, Z.C., et al. (2012) Recent Progress in Studies of Climate Change in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **29**, 958-977. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-1200-2>
- [4] 吴绍洪, 尹鹤. 极端事件对人类系统的影响[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 99-102.
- [5] Meehl, G.A., Karl, T., Easterling, D.R., et al. (2000) An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **81**, 413-416. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0413:AITTIE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0413:AITTIE>2.3.CO;2)
- [6] 邹旭恺, 高辉. 2006 年夏季川渝高温干旱分析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 149-153.
- [7] Jian, S.Q., Jing, J.Z., Yan, F.L., et al. (2015) A Review of International Climate Change Conference and Analysis on Recent Hot Issues. *Advances in Earth Science*, **30**, 1210-1217.
- [8] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29-35.
- [9] 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 618-624.
- [10] 江晓菲, 李伟, 游庆龙. 中国未来极端气温变化的概率预估及其不确定性[J]. 气候变化研究进展, 2018, 79(3): 12-20.
- [11] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 未来 20 年中国气温变化预估[J]. 气象与环境学报, 2008(5): 1-5.
- [12] 高学杰. 中国地区极端事件预估研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 162-166.
- [13] 杨淑群, 潘建华, 柏建. 2006 年四川极端高温干旱影响系统分析[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008(7): 133-137.
- [14] 罗玉, 范广州, 周定文, 华维, 张永莉, 等. 近 41 年西南地区极端温度变化趋势[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 161-167.
- [15] 班军梅, 缪启龙, 李雄. 西南地区近 50 年来气温变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 346-351.
- [16] 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 西南地区近 40a 气温变化的时空特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 30-36.
- [17] 赵文虎, 孙卫国, 程炳岩. 近 50 年川渝地区的气温变化及其原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(3): 59-67.
- [18] 孙晨, 程志刚, 毛晓亮, 等. 近 44a 四川地区极端气候变化趋势及特征分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1): 126.
- [19] 胡豪然, 毛晓亮, 梁玲. 近 50 年川渝地区夏季极端高温事件的时空演变特征[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(3): 15-28.
- [20] 伍清, 蒋兴文, 谢洁. CMIP5 模式对西南地区气温的模拟能力评估[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 358-370.
- [21] Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., et al. (2011) RCP4.5: A Pathway for Stabilization of Radiative Forcing by 2100. *Climatic Change*, **109**, 77-94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- [22] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 305-307.