

白莹莹,高阳华,张焱,等. 气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响[J]. 气象,2010,36(9):47-54.

气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响^{* 1}

白莹莹^{1,2} 高阳华² 张 焱³ 李永华² 王 中⁴

- 1 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072
- 2 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147
- 3 重庆市气象台, 重庆 401147
- 4 重庆市人工影响天气办公室, 重庆 401147

提 要: 利用重庆地区 1961—2006 年逐日气象观测资料,研究了气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响。结果表明:重庆区域显著的增暖开始于 20 世纪 90 年代后期,突变检验结果显示气温距平的突变出现在 1997 年。增暖后,极端高温事件发生频次增加趋势明显,高温热浪风险显著上升,极端降水事件发生频次也呈现出显著增加趋势,洪涝灾害的风险不断上升。进一步分析了区域平均各级别降水日数的变化趋势,结果显示小雨和中雨日数减少趋势明显,使得干旱的风险增大。将区域平均气温距平序列分为全球气候变化对重庆区域平均气温的影响和重庆区域平均气温的自身变率两部分,发现在增暖后,全球气候变化对区域气温变化的贡献较增暖前增大。分别计算 2006 年全球气候变化和区域自身变率对重庆异常气温的贡献,发现 2006 年重庆异常高温可能是受全球气候变化和区域自身的变率共同作用的结果,但以区域自身的变率为主。

关键词: 重庆地区, 气候变化, 极端事件, 高温, 旱涝

Impact of Climate Changes on High-Temperature,
Drought and Flood Disasters of Chongqing

BAI Yingying^{1,2} GAO Yanghua² ZHANG Yan³ LI Yonghua² WANG Zhong⁴

- 1 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, Chengdu 610072
- 2 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147
- 3 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147
- 4 Chongqing Weather Modification Office, Chongqing 401147

Abstract: Daily meteorological data from 1961 to 2006 of Chongqing area have been employed to diagnose the impact of climate changes on high-temperature, drought and flood disasters of Chongqing. Results show that significant warming of Chongqing area began at late 1990s. The abrupt temperature change occurred in 1997. During warming period, extreme high temperature event increased obviously, the risk of heat wave rose significantly, meanwhile extreme precipitation event also increased obviously, the risk of flood rose significantly. Furthermore, the trends of each grade regional average precipitation days have been analyzed, the precipitation days of light and moderate rain decrease obviously, which may lead to the risk of drought to increase significantly. Put regional temperature anomalies into two parts, one is the impact of global climate changes on it, the other is regional self-variability. It was found that the contribution of global climate changes to regional temperature variations increased significantly during warming period. Then we calculated the contributions of global climate changes and regional self-variability in 2006, respectively, results suggest that global climate changes and regional self-variability may cause the abnormal high temperature of 2006, but regional self-variability is the main contributor.

Key words: Chongqing area, climate changes, extreme event, high temperature, drought and flood

^{*} 国家科技支撑计划重大项目(2007BAC03A06),国家自然科学基金项目(40975058),中国气象局成都高原气象研究所开放实验室基金项目(LPM2009008,LPM200814),重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC2008BA0022,CSTC2009BB7248),国务院三峡工程建设委员会办公室生态环境补偿经费(SX2009-004)共同资助
2008 年 12 月 18 日收稿; 2009 年 11 月 24 日收修定稿
第一作者:白莹莹,主要从事气候动力学研究. Email:byying113@126.com

引言

近百年来,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化。IPCC 第四次气候变化评估报告指出^[1],近一百年(1906—2005 年)全球地面平均温度升高了 0.74 ℃,这种全球性的气候变暖,是由自然的气候波动和人类活动增强的温室效应共同引起的。随着全球平均温度的上升,全球气候系统表现出明显的变化,大气和海洋的环流系统发生变化,气候变率增大,极端天气气候事件频繁发生。

极端事件的频繁发生,使得洪涝、干旱、热带气旋、冷害、冻害、寒害、暴雪、沙尘暴、冰雹、大雾、雷暴、龙卷风、大风、热浪、连阴雨等气象灾害频繁发生,每年造成的损失占整个自然灾害损失的 70% 左右,造成的直接经济损失占国民生产总值的 3%~6%;而与气象条件有关的水土流失、泥石流、滑坡、崩塌、地面沉降、森林和草原火灾、农林草原病虫害、荒漠化等生态环境灾害的损失更是难以统计。

在全球气候变暖的大背景下,气候变化也具有明显的地区性差异^[2-7]。重庆地处气候变化的敏感区,地形条件复杂,局地异常气候发生率高,灾害较为频繁,特别是 2004 年 9 月重庆开县 200 年一遇的特大暴雨、2006 年夏季重庆百年一遇的高温伏旱,以及 2007 年 7 月重庆局部地区百年一遇的洪涝灾害,已对区域经济和人民生活产生严重的影响。已有的研究表明^[8-13],重庆的气候变化趋势与全球和全国气候变化相比,具有其独特性,其变暖有些滞后,20 世纪 90 年代后呈现出较为显著的变暖趋势,针对其独特性,本文将重点讨论重庆地区与极端事件有关的气象灾害的变化及其与气候变化之间的可能联系。

1 资料和方法

1.1 资料

采用重庆地区 1961—2006 年 32 站逐日降水、平均气温及日最高气温资料,以及国家气候中心 1880—2006 年全球气温距平序列资料^[14]。

1.2 方法

本文主要采用趋势分析、M-K 突变检测、一元

回归等方法^[15],对重庆地区极端事件发生频率的时空分布特征及其与全球气候变化之间的联系进行了研究。

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法^[15]。非参数检验方法亦称无分布检验,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算也比较简便。对于具有 n 个样本数的时间序列 x ,构造一个秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i)$$

可见,秩序列 s_k 是第 i 时刻大于 j 时刻数值的个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$U_{Fk} = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

其中 $U_{F1} = 0$, $E(s_k)$, $\text{Var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差,在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立,且有相同连续分布时,它们可由下式算出:

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4}, \quad \text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

U_{Fk} 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|U_{Fk}| > U_\alpha$ 则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 再重复上述过程,同时使 $U_{Bk} = -U_{Fk}$, $k = n, n-1, \dots, 1$, $U_{B1} = 0$ 。

如果 U_{Fk} 和 U_{Bk} 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

2 重庆区域气候变化概况

2.1 温度变化

总的来看,重庆区域的增暖较全国相比,相对较晚,全国的增暖始于 20 世纪 80 年代中期^[16],而重庆显著的增暖开始于 20 世纪 90 年代后期(图 1a)。对区域平均气温距平序列进行 M-K 突变检验,发现重庆气温距平的突变出现在 1997 年(图 1b)。以 1997 年作为分界,分别分析了 1961—1996 年和

1997—2006 年的气温变化趋势(图 1a),发现前一时段气温变化不明显,而后一时段,增暖显著,趋势系数达到 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,超过了这一时段全球和全国的增温速度。

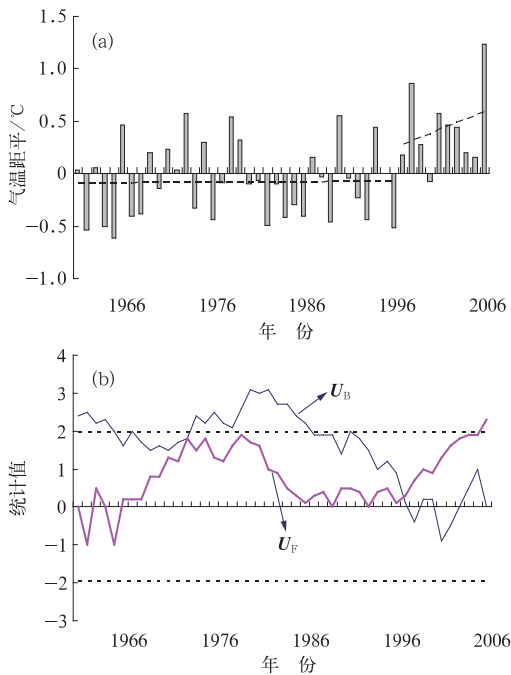


图 1 重庆区域年平均气温距平变化 (a)及 Mann-Kendall 统计量曲线(b) (点线为 $\alpha = 0.05$ 显著性水平临界值)

Fig. 1 Changes of annual mean temperature anomalies in Chongqing (a), and the Mann-Kendall statistic curve(b) (dotted lines are the critical values significant at a confidence level of 0.05)

2.2 降水变化

全市年平均降水量变化以年际振荡为主,变化趋势不明显(图 2a)。但降水日数呈显著减少趋势,20 世纪 90 年代后基本为负距平(图 2b)。降水总量变化不大但频率减少,意味着降水过程存在强化的趋势,干旱和洪涝灾害可能会趋于增多。

3 重庆区域气象灾害的变化

相对于均值变化,气候极值更直接地影响人类社会,是造成气候灾害的直接因素。重庆地区素以“火炉”著称,高温热浪和旱涝灾害是影响本区的重要气候灾害,因此有必要对与之相关联的极端高温事件和极端降水事件的变化进行分析。本文极端事件的定义是参照翟盘茂等^[17-18]的定义方法,根据每个测站的日最高温度及降水量定义了不同地区逐日极端高温事件和极端降水事件的阈值。以极端高温

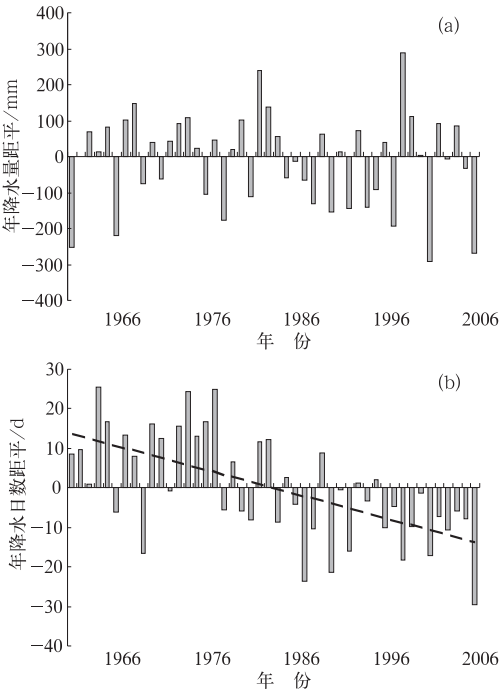


图 2 重庆区域年平均降水量距平(a) 及年降水日数距平及趋势(b)

Fig. 2 Changes of annual mean precipitation (a) and annual precipitation days(b)in Chongqing

事件为例,将某站 1971—2000 年中同日最高温度资料按升序排列,得到该日最高温度的第 90 个百分位值,照此方法求出 366 个中的第 90 个百分位值,将之作为该日极端高温事件阈值。如果某日的最高温度高于该日的阈值,则认为该日出现了极端高温事件。

3.1 极端高温热浪

根据图 1b 所示,重庆区域年平均气温在 1997 年发生了突变,为进一步探讨变暖和气候灾害之间的联系,下面着重分析了突变前后极端高温事件发生频次趋势差异。

在 1961—1996 年增暖前,区域平均极端高温事件发生频次呈减少趋势,减少率为 $-7.3\text{ 次}/10\text{a}$ (见表 1),从趋势系数空间分布来看,全市呈现出一致的减少趋势,有 29 个站的趋势系数可以通过 95% 的显著性水平检验,长江沿线地区减少趋势更为明

表 1 极端高温事件发生频次趋势统计
Table 1 Trend statistics of the frequency of extreme high-temperature events

	区域平均总趋势 (次/10a)	通过 95%显著 水平的站点数
1961—1996 年	$-7.3 *$	29
1997—2006 年	$+41.1 *$	25

注: * 表示该趋势通过了 95% 的显著性水平检验

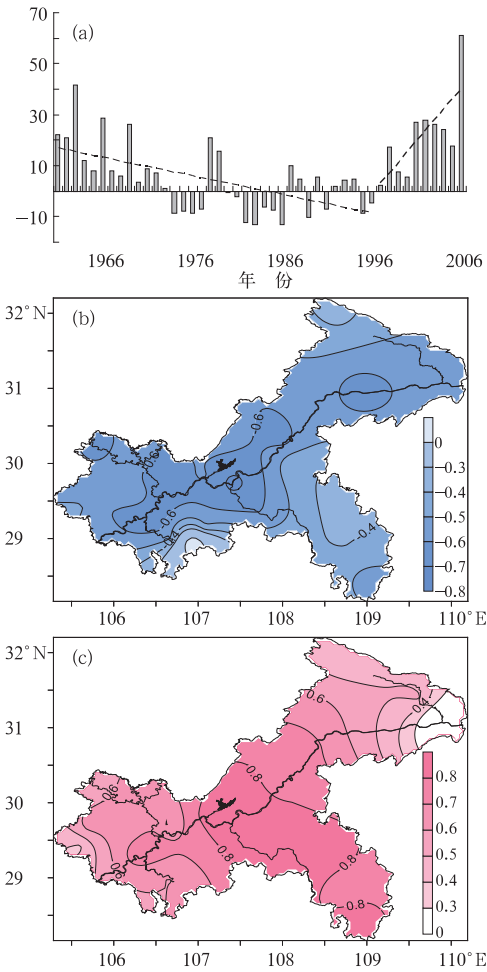


图3 极端高温事件发生频次趋势分析,区域平均(a);1961—1996年趋势系数空间分布(b);1997—2006年趋势系数空间分布(c)
Fig. 3 Trend analysis of the frequency of extreme high-temperature events, regional mean change curve(a);Spatial distribution of trend coefficient during 1961—1996 (b) and 1997—2006 (c)

显(图 3b)。在 1997—2006 年显著增暖期,区域平均极端高温频次呈现显著增加趋势,增加率高达 41.1 次/10a,从空间分布也可以看到,全市共有 25 个站的增加趋势明显,主要集中在重庆市的中部地区和东南部地区(图 3c)。可见,在增暖期,极端高温事件发生频次增加趋势明显,意味着高温热浪风险显著上升。

3.2 极端降水及旱涝灾害

3.2.1 极端降水频次变化

与极端高温事件发生频次的趋势相类似,在增暖前,极端降水频次也呈现出显著的减少趋势,减少

率为-3.6 次/10a,全市有 30 个站的趋势系数可以通过 95%的显著性水平检验(表 2),极端降水频次显著减少的区域主要位于长江以南地区(图 4b)。增暖后,极端降水事件发生频次也呈现出显著增加趋势,增长率为 15.8 次/10a,全市 25 个站增加趋势明显。从空间分布来看,增幅较为显著的地区分布在重庆西部、东南部及东北部偏北地区(图 4c)。随着年平均温度的升高,极端降水事件发生频次显著增加,洪涝灾害的风险也在不断上升^[18]。

表 2 极端降水事件发生频次趋势统计
Table 2 Trend statistics of the frequency of extreme rainfall events

	区域平均总趋势 (次/10a)	通过 95%显著 水平的站点数
1961—1996 年	-3.6 *	30
1997—2006 年	+15.8 *	25

注: * 表示该趋势通过了 95%的显著性水平检验

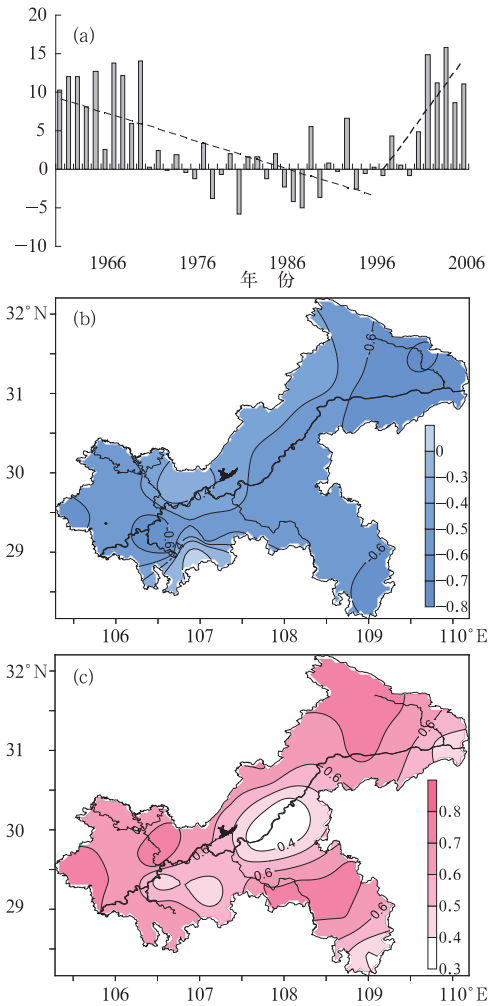


图4 与图 3 相类似,但为极端降水事件频次趋势
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the extreme rainfall events

3.2.2 区域旱涝变化趋势

由图 2 可知,重庆区域年降水总量变化不大,但降水日数呈减少趋势,为了弄清区域降水日数的变化的原因,分别计算了各种级别降水日数的时间序列及趋势(见图 5)。总的来看,小雨和中雨日数呈减少趋势,其中小雨日数的减少最为显著,趋势系数为-5.3 天/10a,可以通过 99%的显著性水平检验;

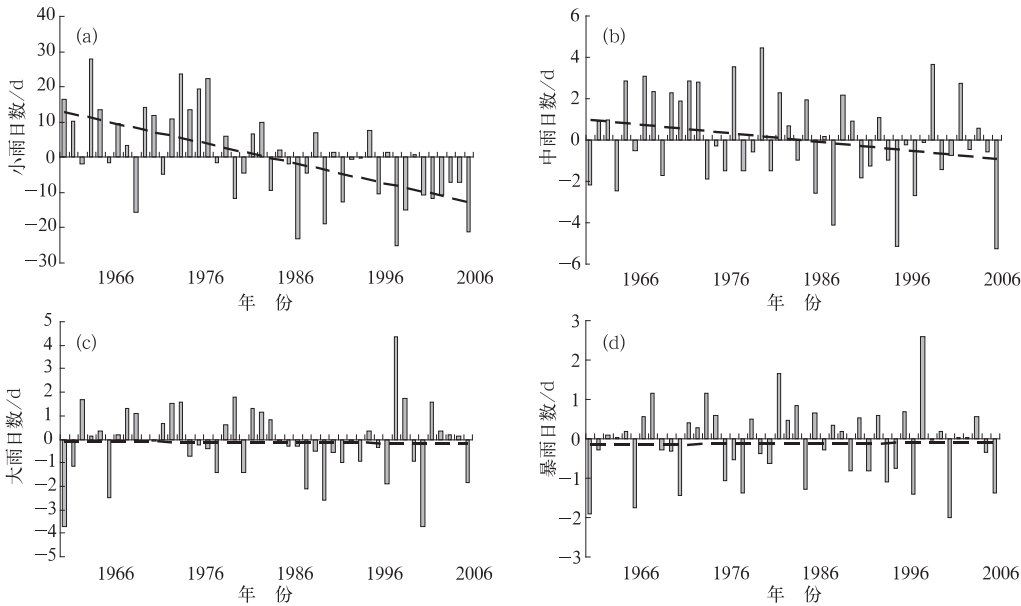


图 5 重庆区域平均年小雨(a)、中雨(b)、大雨(c)及暴雨(d)日数距平的时间序列及趋势
Fig. 5 Time series and trends of regional mean yearly day number anomalies of light rain (a), moderate rain (b), heavy rain (c) and storm rain (d) in Chongqing

比较突变前后两个时段各级别降水日数所占比例,可以发现,增暖后小雨所占的比例在减小,而中雨、大雨和暴雨的比例在增大,因降水总量变化不明显(表 3),说明增暖后,降水强度存在强化的趋势,极端强降水发生的可能性在增大,这与 3.2.1 节中所得的结论相一致,增暖后,极端降水事件发生频次呈显著增加趋势。

表 3 区域平均各级别降水日数所占比例
Table 3 Ratios of different grade rainfall days to the total rainfall days

	小雨日数 比例/%	中雨日数 比例/%	大雨日数 比例/%	暴雨日数 比例/%
1961—1996 年	79.83	13.30	5.02	1.85
1997—2006 年	78.32	14.12	5.58	1.98

3.2.3 春、夏、秋季旱涝变化趋势

根据重庆多年平均逐日降水变化图(图略),可以发现重庆地区的降水主要集中在春、夏、秋三季,冬季降水较少,下面主要分析了春、夏、秋三季各级别降水日数的变化趋势。

而大雨和暴雨日数变化趋势不明显,由此说明,总的降水日数的减少主要是由于小雨和中雨日数的减少,而小雨和中雨在总降水日数中所占的比例在 90%左右,因此小雨和中雨的减少使得干旱的风险在增大,另外,由于大雨和暴雨日数并无明显趋势,因此洪涝的风险并没有减少的趋势。

从春季各级别降水日数变化来看(图 6 左列),小雨和中雨日数呈减少趋势,以中雨日数的减少最为显著,而大雨和暴雨日数变化不明显,由此说明,春季总的降水日数呈减少趋势,因此春季干旱的风险在增大,另外,由于大雨和暴雨日数并无明显减少,因此洪涝的风险并没有下降的趋势。夏季的各级别降水日数变化均不明显。秋季各级别的降水日数都呈现减少趋势,小雨日数减少趋势最为显著(图 6 右列),总的降水日数减少明显,秋季干旱的风险也在加重。

比较增暖前后的降水日数变化的差异,可以发现,春季和秋季无明显差异(图略),虽然夏季总体变化趋势不明显,但夏季增暖前后的变化差异显著(见图 7a),增暖前各级别降水日数变化不大,增暖后,各级别降水都显著减少,从趋势系数来看,近 10 年的小雨和中雨的减少趋势最为显著,说明了随着平均气温的升高,夏季干旱的风险在显著增加。从区域伏旱指数的变化来看,增暖后伏旱指数呈增加趋势,说明近 10 年伏旱强度有所增加,与上述的结果相一致。

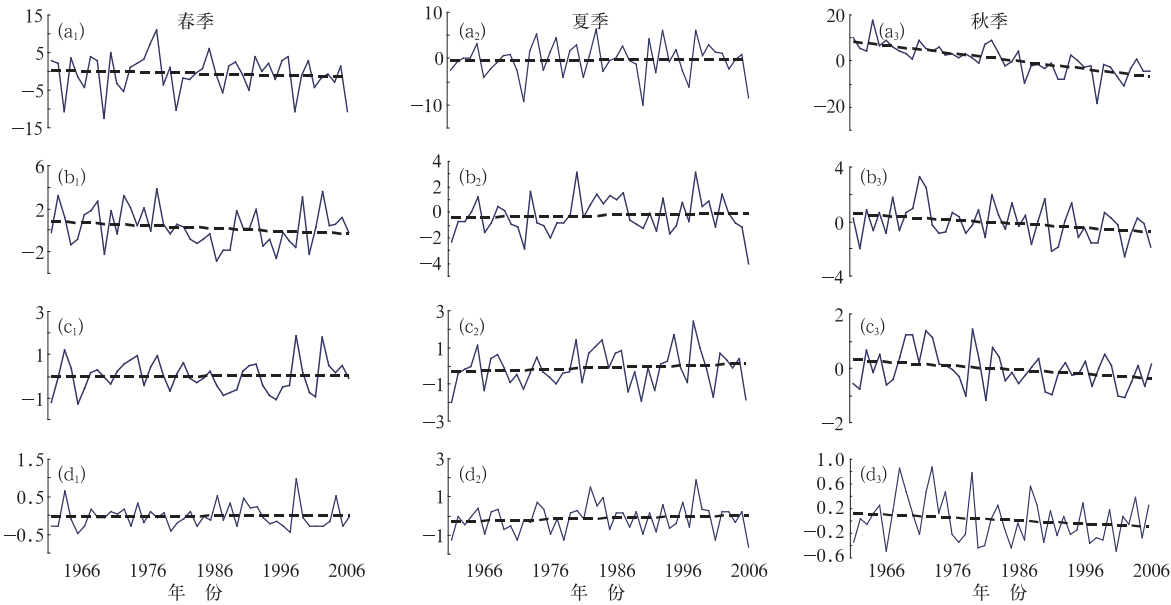


图 6 重庆区域平均春季(左列)、夏季(中列)、秋季(右列)小雨(a)、中雨(b)、大雨(c)及暴雨(d)日数距平的时间序列及趋势

Fig. 6 Time series and trends of regional mean yearly day number anomalies of light rain (a), moderate rain (b), heavy rain (c) and storm rain (d) during spring (left panel), summer (middle panel) and autumn (right panel) in Chongqing

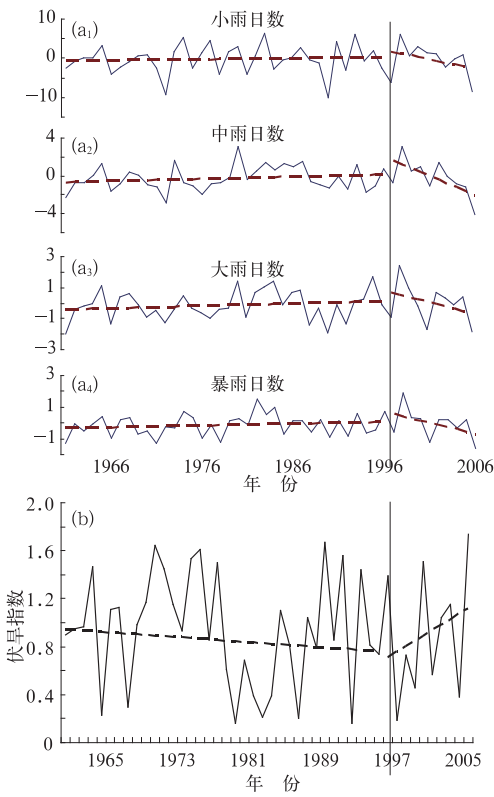


图 7 区域平均夏季各级别降水日数(a)及伏旱指数(b)增暖前后(以 1997 年为界)趋势差异
Fig. 7 Trend differences between time before warming and time after for regional mean each grade rainfall days (a) and dries in hot summer index (b) during summer time

4 全球气候变化对重庆区域气候的影响

为了进一步弄清全球气候变化和区域自身的变率分别对重庆气候变化的相关贡献,可以将区域气温异常用全球气候变化和区域自身的变率两部分来解释,它们的关系可以表示如下:

$$T = T_1 + T_2, \\ T_1 = aX + b,$$

式中, T 表示区域气温异常, T_1 表示全球气候变化影响部分, T_2 表示区域自身变率, X 表示全球气温异常。

4.1 全球气候变化和区域自身变率对区域平均气温异常的影响

利用全球气温距平序列使用一元回归方法滤去全球气候变化对重庆区域平均气温的影响,得到了重庆区域平均气温的自身变率(见图 8)。比较区域平均气温变化实况和自身变率两个序列,可以发现其年际振荡表现为显著的一致,由此也可以说明气温异常的年际变化主要是由于自身变率所造成的。另外,在增暖前(1997 年前),两条曲线拟合较好,说明全球气候变化对重庆区域气温的影响不明显,区

域自身的变率是影响重庆气温变化的主要因素;在增暖后,全球气候变化对区域气温变化的贡献明显增大,但区域自身变率仍呈现出增暖的趋势,说明近 10 年的增暖是由全球气候变化和区域自身变率共同作用的结果。

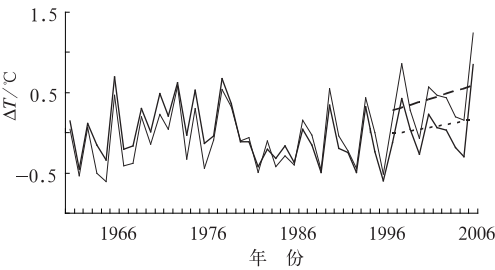


图 8 区域平均气温距平实况(细实线)及自身变率(粗实线)时间序列
Fig. 8 Time series of regional mean temperature anomalies (thin solid line) and self-variability(thick solid line)

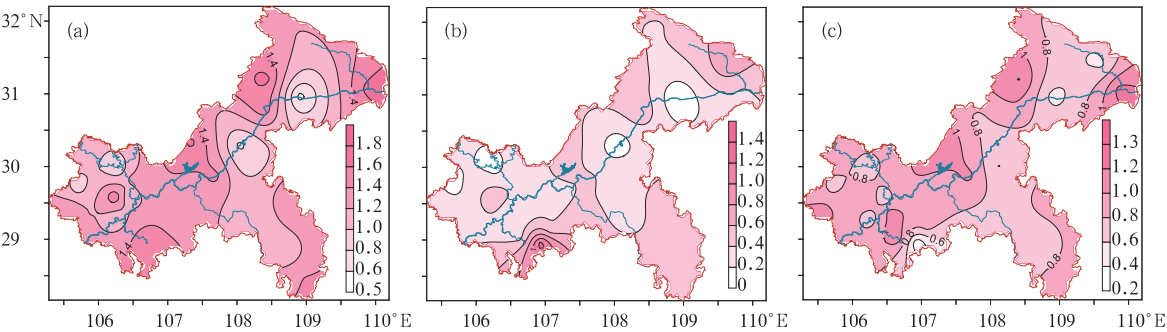


图 9 重庆地区 2006 年气温异常实况分布(a),全球变暖贡献分布(b),区域自身变率贡献(c)
Fig. 9 Distributions of temperature anomalies (a), global warming contributions (b), and regional self-variability contributions(c)

只是值较实况相比偏小。由此推测,2006 年重庆异常高温可能是受全球气候变化和区域自身的变率共同作用的结果,但以区域自身的变率为主。

5 结论与讨论

(1) 重庆区域显著的增暖开始于 20 世纪 90 年代后期。突变检验结果显示气温距平的突变出现在 1997 年,据此进一步分析了突变前后极端高温事件发生频次趋势差异,发现在 1997—2006 年显著增暖期,极端高温事件发生频次呈现显著增加趋势,意味着高温热浪风险显著上升。

(2) 从全市平均年降水量变化来看,线性趋势不明显,但降水日数呈显著减少趋势。降水总量不

4.2 2006 年极端高温干旱事件与全球气候变暖及区域自身变率的关系

2006 年,重庆地区遭受了罕见的高温热浪袭击,同时由于长期少雨,致使上述地区发生了特大伏旱,灾情十分严重。从本文上面的研究也可以看出,2006 年重庆区域平均气温异常偏高,极端高温事件发生频次为 46 年来的最大值。下面将以 2006 年为例,分析 2006 年气温异常偏高的原因。

从 2006 年全市气温异常的实况分布来看,气温异常约为 1~2 °C,气温显著偏高的地区主要位于重庆西部及东北部地区(见图 6a)。而全球变暖对 2006 年气温异常的贡献为 0.3~0.8 °C,从空间分布来看,全球变暖贡献显著的地区位于东北部偏南以及西南部地区(图 6b);区域自身变率的贡献为 0.7~1.2 °C,从空间分布来看基本和实况分布一致,

变但频率减少,意味着降水过程存在强化的趋势,干旱和洪涝灾害可能会趋于增多。极端高温事件与极端降水事件的发生频次呈现相类似的变化趋势,增暖前两者均显著减少,增暖后表现为一致的增加。随着年平均温度的升高,年极端降水事件发生频次显著增加,洪涝灾害的风险也在不断上升;而小雨和中雨日数的减少趋势,使得干旱的风险在增大。

(3) 利用全球气温距平序列使用一元回归方法,将区域平均气温距平序列分为全球气候变化对重庆区域平均气温的影响和重庆区域平均气温的自身变率两部分,发现气温异常的年际变化主要是由于自身变率所造成的。在增暖前(1997 年前),全球气候变化对重庆区域气温的影响不明显,区域自身的变率是影响重庆气温变化的主要因素;在增暖后,

全球气候变化对区域气温变化的贡献明显增大,但区域自身变率仍呈现出增暖的趋势,说明近 10 年的增暖可能是由全球气候变化和区域自身变率共同作用的结果。

此外,本文指出重庆地区气温突变发生在 1997 年,突变的原因值得进一步探讨,需要指出的是重庆 1997 年直辖后,城市的飞速发展导致了温室气体的排放量显著增加,这是否是影响气温突变的重要原因,有待于进一步的研究工作加以证明。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for policymakers[R]. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>.
- [2] 任国玉. 地表气温变化研究的现状和问题[J]. 气象, 2003, 29(8): 3-6.
- [3] 王绍武. 近百年我国及全球气温变化趋势[J]. 气象, 1990, 16(2): 11-15.
- [4] 张明庆, 刘桂莲. 我国近 40 年气温变化地域类型的研究[J]. 气象, 1999, 25(4): 10-14.
- [5] 谭方颖, 王建林, 宋迎波. 华北平原近 45 年气候变化特征分析[J]. 气象, 2010, 36(5): 40-45.
- [6] 韩世刚, 周浩, 何军, 等. 1960—2006 年重庆高温日数时空变化特征[J]. 气象, 2009, 35(9): 68-76.
- [7] 向旬, 王冀, 王绪鑫, 等. 我国极端气温指数的时空变化与分区研究[J]. 气象, 2008, 34(9): 73-80.
- [8] 李跃清, 李崇银. 近 40 多年四川盆地降温与热带西太平洋海温异常的联系[J]. 气候与环境研究, 1999, (4): 388-395.
- [9] 李永华, 刘德, 向波. 重庆市近 50a 来高温变化多时间尺度分析[J]. 气象科学, 23(3): 325-331.
- [10] 丁一汇, 张锦, 宋亚芳. 天气和气候极端事件的变化及其与全球变暖的联系[J]. 气象, 2002, 28(3): 3-7.
- [11] 张天宇, 程炳岩, 刘晓冉, 等. 重庆极端高温的变化特征及其对区域性增暖的响应[J]. 气象, 2008, 34(2): 69-76.
- [12] 刘晓冉, 杨茜, 程炳岩. 2006 年川渝伏旱同期环流场和水汽场异常特征分析[J]. 气象, 2009, 35(8): 27-34.
- [13] 程炳岩, 郭渠, 孙卫国. 川渝地区降水变化与 Nino3 区 SST 的关系及其稳定性分析[J]. 气象, 2010, 36(3): 27-33.
- [14] Smith T M, Reynolds R W. A global merged land air and sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880—1997) [J]. J Climate, 2005, 18: 2021-2036.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [16] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12): 19-26.
- [17] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50a 温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(增): 1-10.
- [18] 龚道溢. 气候变暖与我国夏季洪涝灾害风险[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(3): 30-37.