

郭渠, 孙卫国, 程炳岩, 等. 2009. 重庆市气温变化趋势及其可能原因分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 646–656. Guo Qu, Sun Weiguo, Cheng Bingyan, et al. 2009. The trend of temperature variation and its possible causes in Chongqing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 646–656.

重庆市气温变化趋势及其可能原因分析

郭渠^{1,2} 孙卫国³ 程炳岩¹ 赵海江³

1 重庆市气候中心, 重庆 401147

2 重庆江津区气象局, 重庆 402260

3 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

摘 要 通过对重庆市 1924~2007 年的平均气温、平均最高气温、平均最低气温、极端最高气温、极端最低气温随时间变化特征进行分析发现: 近 84 年来重庆市平均气温微弱变冷, 与全国平均温度相比线性变化趋势存在一定差异; 平均最高和平均最低气温、极端最高和极端最低气温的非对称性变化显著, 最高气温的下降对平均气温的影响很大, 平均最低气温除春季外增暖都非常显著, 最低温度的增高对气温日较差减小的影响更明显。夏季副热带高压位置偏南, 使得我国西南地区东部夏季降水天气增多、云量增加、日照时数减少, 加之轻雾日数增多, 可能是重庆市夏季最高温度持续下降的主要原因。冬季最低气温的显著升高主要是由于降水天气减少、云量增加和城市热岛效应所致。

关键词 气温变化 趋势分析 副热带高压 热岛效应

文章编号 1006-9585 (2009) 06-0646-11 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

The Trend of Temperature Variation and Its Possible Causes in Chongqing

GUO Qu^{1,2}, SUN Weiguo³, CHENG Bingyan¹, and ZHAO Haijiang³

1 *Climate Center of Chongqing, Chongqing 401147*

2 *Chongqing Jiangjin Meteorological office, Chongqing 402260*

3 *Department of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

Abstract Based on the data of mean temperature, mean minimum temperature, and mean maximum temperature, extreme maximum temperature, and extreme minimum temperature in Chongqing from 1924 to 2007, the characteristics of temperature variations are analyzed. The results show that the decrease in the mean temperature in Chongqing is slight in recent 84 years, and the linear trend of the temperature in Chongqing is different from the trend averaged over China. The asymmetric changes of mean minimum temperature and mean maximum temperature, extreme maximum temperature and extreme minimum temperature are distinct. The decrease in the mean maximum temperature has obvious influence on the mean temperature. The mean minimum temperature in addition to that in spring has a more striking increase. The effect of the minimum temperature increasing on the diurnal temperature range decreasing is more obvious than others. The more southward western Pacific subtropical high in the

收稿日期 2008-10-16 收到, 2009-09-27 收到修定稿

资助项目 中国气象局业务项目“重庆三峡库区气候监测评估研究”、中国气象局气候变化研究专项 CCSF 2007-24 和南京信息工程大学科研课题 9922

作者简介 郭渠, 男, 1978 年出生, 硕士, 主要从事气候变化的研究。E-mail: guoqu510@163.com

past summers leads to the increase in rainfall and cloud fraction in summer, as well as the decrease in sunshine time in the eastern part of South-West China and the increase in light fog days. It may be the dominative reason for the persistent decrease in the maximum temperature in summer. The decrease in precipitation days, the increase in cloud cover, and the urban heat island effect are the main causes of the significant increase in mean minimum temperature in winter.

Key words temperature variation, trend analysis, the western Pacific subtropical high, urban heat island effect

1 引言

气温是气候变化最为重要的指标,气温变化对人类的生产和生活以及自然环境状况都会产生重大影响。IPCC 第四次评估报告指出,自 1861 年以来,全球表面年平均温度不断上升,近 100 年来的上升幅度为 $0.74 \pm 0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (赵宗慈等, 2007)。中国近百年的温度变化趋势与北半球大致相似(林学椿等, 1995),其中 1956~2005 年间温度升高了 $1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (赵宗慈等, 2007)。

重庆市地处四川盆地东南部,由于特殊的地理地形条件,形成了夏季“高温、高湿、少风”的特点,是世界闻名的长江流域“三大火炉”之一。以往关于重庆市气候的研究主要集中在气温方面,其中刘德等讨论了重庆市年平均气温(刘德等, 2004)和夏季气温(刘德等, 2003)的多时间尺度特征,李永华等(2005)对重庆市高温变化的时间尺度做了研究。事实上对于重庆市气温变化来说,气温变化既包括自然变化过程,也有人类活动的影响。尽管关于重庆市气温变化特征已有不少研究,但研究重点主要集中在年平均气温年际和年代际变化方面,而对于季节变化特征及其原因分析很少涉及。本文试图根据更长时期的历史资料,对重庆市气温变化趋势、尤其是夏季最高气温降低、冬季最低气温升高的季节变化特点以及这种非对称性变化的可能原因作进一步分析,旨在为区域气候诊断分析和预测提供参考依据。

2 资料与方法

本文所用资料来源于重庆市气候中心根据逐日气温观测资料统计整理的 1924~2007 年沙坪坝站(57516)的月平均气温、平均最高气温、平均

最低气温、极端最高气温和极端最低气温序列;西太平洋副热带高压(西太副高)指数取自国家气候中心发布的 74 项环流特征量资料。沙坪坝站气温观测始于 1924 年,资料累积年代较长;对于个别有缺测记录的月份,采用差值订正法(黄嘉佑, 1995)进行了插补;因此,可以认为资料序列是连续的,而且符合国家气象局颁发的气候资料统计规定(国家气象中心, 1990)。本文选取年、季(春 3~5 月、夏 6~8 月、秋 9~11 月、冬 12~2 月)平均温度(T)、平均最高温度($T_{\max}$)、平均最低温度($T_{\min}$)、极端最高温度(T_{emax})、极端最低温度(T_{emin})以及气温日较差($D_{\text{tr}}=T_{\max}-T_{\min}$)为研究对象,分析其变化规律。

气候变化趋势的性质和幅度通常采用各要素变化趋势系数、变化速率以及前、后两段时期平均值之差来表示(唐国利等, 2006)。气温变化趋势系数实际上就是逐年气温值与年份序列数的相关系数;趋势系数为正或为负时,表示气温在所统计的时间内有线性增加或减少的趋势。气温倾向率反映气温随年份增加的线性变化趋势,其符号表示气温的升降,数值的大小反映了气温变化的剧烈程度。

3 气温变化

1924~2007 年重庆市年平均气温为 $18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均最高气温 $22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均最低气温 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $44.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.1 平均气温变化趋势

表 1 的统计结果表明,近 84 年来重庆市年、季气温的线性趋势系数(R_d)和倾向率(ΔT)均呈微弱的下降趋势,其中夏季降温率为 $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,低于中国近百年来夏季 $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 的气温降温率(唐国利等, 2005);春、秋季降温率分别是 -0.04 和 -0.02

$^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; 而冬季气温变化率为 $-0.04^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 与中国近百年来冬季 $0.17^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的增温率 (唐国利等, 2005) 呈相反趋势; 年降温率为 $-0.03^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 与近百年来中国年平均气温增长率 $0.055^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (丁一汇等, 1994) 和全球年平均气温的增长率 $0.074 \pm 0.018^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (赵宗慈等, 2007) 呈相反的趋势, 与刘德等 (2004) 计算的 1924~2001 年重庆市年平均温度的降温率 $-0.05^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 呈减弱的趋势。

随着经济活动增加, 人类活动对气候变化的影响也急剧增加。表 2 给出了 1951~2007 年重庆市年、季气温的线性趋势系数和倾向率。从表中数值可以看出: 重庆市近 57 年来的温度变化趋势与近 84 年来的趋势存在一定的差异, 主要表现在除夏季外均呈微弱的上升趋势, 但都小于全国年平均气温与四季平均气温的上升趋势 (唐国利等, 2005)。

图 1 为 1924~2007 年重庆市气温变化曲线。由图 1a 可见, 年平均气温具有明显的阶段性变化特征, 表现为: 20 世纪 50 年代以前为气温显著上升阶段, 平均气温为 18.5°C , 其中 20 年代中期到

30 年代中期 10 年平均气温为 18.7°C , 是增暖最迅速的时期。50 年代至 90 年代中期为降温阶段, 1980 年前后年平均气温下降最为明显, 说明重庆市气温由偏暖期转变为偏冷期; 这 40 年的平均气温为 18.2°C , 其中 80 年代平均气温仅 18.0°C , 是近 84 年来重庆市年平均气温最低的年代。90 年代中期至今为持续增温阶段, 平均气温为 18.6°C , 仍未达到 20 年代中期到 30 年代中期的增温水平, 且重庆市 90 年代中期至今出现的显著增温现象在时间上迟于我国 1986 年前后开始的普遍增温 (林学椿等, 1995); 说明重庆市气温变化与全球及全国气候变暖存在非同步性。1950 年为重庆市有观测记录以来最冷的年份, 比 1924~2007 年年平均气温平均值低 0.8°C ; 重庆市最暖的年份为 1946 年, 年平均气温高达 19.5°C , 比近 84 年的多年平均值高 1.1°C , 而全国平均气温最高的年份为 1998 年 (陈隆勋等, 2004)。

3.2 平均最高、最低气温的变化趋势

全年及各季的 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 的趋势系数和倾向率 (表 1) 表明, 重庆市气温变化存在明显的非对称性。典型的非对称变化表现在夏、冬季: $T_{\max}$ 为降温趋势, 趋势系数分别 -0.13 、 -0.19 ; 而

表 1 1924~2007 年重庆市气温趋势系数 R_d 和倾向率 ΔT

Table 1 Trend coefficient (R_d) and tendency rate (ΔT) of temperature in Chongqing during 1924 - 2007

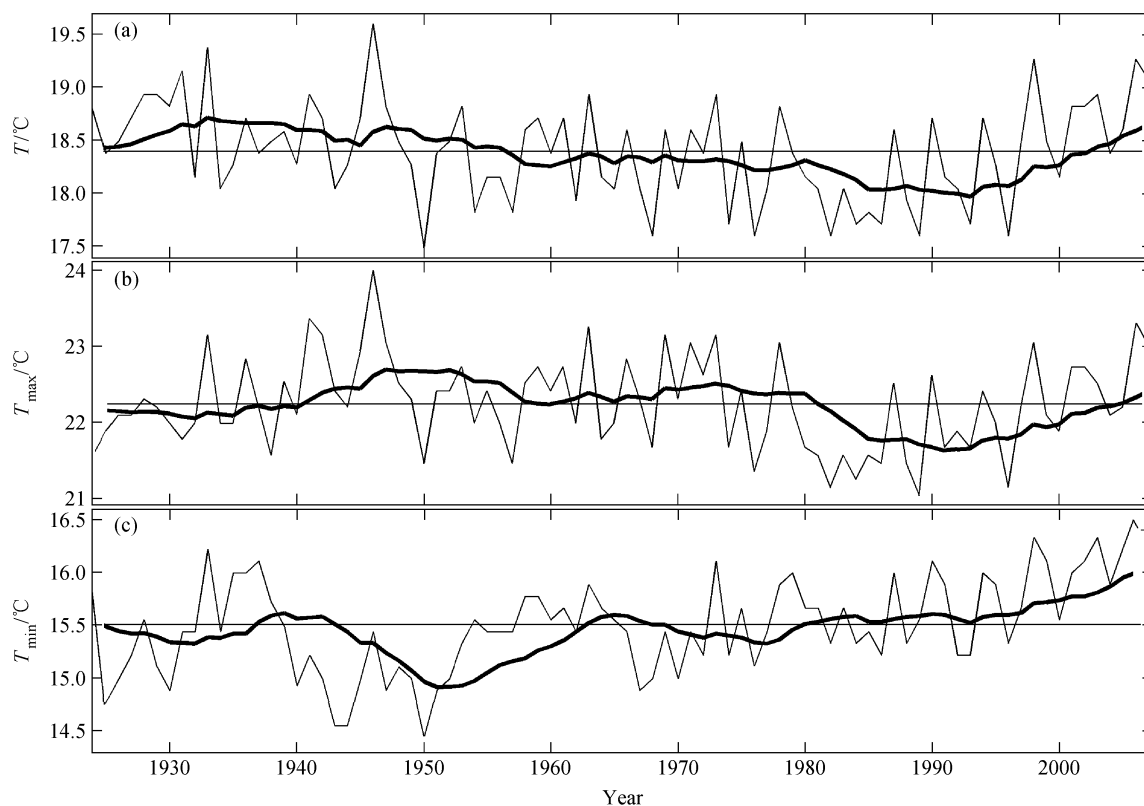
	T		$T_{\max}$		$T_{\min}$		$T_{\max}$		$T_{\min}$		D_{tr}	
	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
春季	-0.12	-0.04	0.03	0.01	0.19*	0.05*	0.07	0.05	0.16	0.12	-0.12	-0.04
夏季	-0.15	-0.05	-0.13	-0.06	0.35*	0.09*	-0.24*	-0.15*	0.13	0.06	-0.37*	-0.15*
秋季	-0.06	-0.02	0.07	0.04	0.29*	0.08*	0.02	0.01	0.11	0.09	-0.08	-0.04
冬季	-0.13	-0.04	-0.19*	-0.08*	0.28*	0.09*	-0.26*	-0.22*	0.17	0.11	-0.50*	-0.17*
年平均	-0.17	-0.03	-0.10	-0.02	0.47*	0.08*	-0.22*	-0.14*	0.21*	0.11*	-0.41*	-0.10*

* 表示通过 0.05 的显著性检验, 下同。

表 2 1951~2007 年重庆市气温趋势系数 R_d 和倾向率 ΔT

Table 2 Trend coefficient (R_d) and tendency rate (ΔT) of temperature in Chongqing during 1951 - 2007

	T		$T_{\max}$		$T_{\min}$		$T_{\max}$		$T_{\min}$		D_{tr}	
	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	R_d	$\Delta T/^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
春季	0.08	0.04	0.04	0.03	0.27*	0.10*	0.09	0.10	0.11	0.11	-0.17	-0.07
夏季	-0.05	-0.02	-0.21	-0.14	0.31*	0.09*	0.06	0.05	0.23*	0.15*	-0.46*	-0.23*
秋季	0.22	0.08	0.06	0.03	0.33*	0.11*	0.01	0.01	0.24*	0.28*	-0.22	-0.08
冬季	0.14	0.06	-0.10	-0.06	0.41*	0.19*	-0.17	-0.20	0.50*	0.42*	-0.56*	-0.25*
年平均	0.17	0.04	-0.09	-0.03	0.57*	0.12*	0.10	0.08	0.57*	0.43*	-0.50*	-0.15*

图1 1924~2007年重庆市年 (a) T 、(b) $T_{\max}$ 和 (c) $T_{\min}$ 的变化曲线Fig. 1 Time series of (a) T , (b) $T_{\max}$, and (c) $T_{\min}$ in Chongqing from 1924 to 2007

$T_{\min}$ 为显著的增温趋势, 趋势系数分别为 0.35、0.28, 通过了信度水平为 5% 的显著性检验; 全年平均 $T_{\min}$ 表现为显著的增温趋势, 趋势系数为 0.47, 达到 1% 的显著水平; 由于 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 呈相反的变化趋势, 以致气温日较差均呈减小趋势, 其中夏季、冬季和全年的下降趋势最为显著, 达到 5% 的显著水平。近 57 年来的 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ (表 2) 变化趋势与近 84 年来的趋势相一致, 气温的非对称变化现象更加明显。对比 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 变化可见, $T_{\min}$ 在重庆市气温变化中表现得尤为突出, 气温日较差变小主要以 $T_{\min}$ 变暖幅度较大为主要特征; $T_{\max}$ (春、秋季除外) 与平均温度一样呈下降趋势, 其速率与平均温度大致相当, 尤其是冬季 $T_{\max}$ 的降温幅度大于平均温度, 对平均气温的影响较大。特别值得注意的是, 图 1b 和 c 中 90 年代中期至今的气温偏暖表现为年 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 同时上升。

3.3 极端最高、极端最低气温的变化趋势

表 1 中的数值还表明, 全年及各季的极端最

高气温 $T_{\max}$ 、极端最低气温 $T_{\min}$ 也存在明显的非对称性变化。除春、秋季外, $T_{\max}$ 呈降温趋势, 其中夏季和冬季的降温趋势最为显著, 趋势系数分别为 -0.24、-0.26, 显著性水平为 0.05; 而四季和全年 $T_{\min}$ 均呈微弱的升高趋势。极端气温变化曲线 (图略) 表明, 50 年代中期以后 $T_{\max}$ 明显低于多年平均水平; 80 年代中期以后 $T_{\min}$ 明显高于多年平均值。

由此可见, 重庆市 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 均表现为明显的非对称变化, 以最低气温升高和最高气温降低为主要特征。因此, 就多年平均而言, 可以认为重庆市冬季和夜间最低温度增高、夏季和白天最高气温的降低使得重庆市的温度变化趋向于缓和。但是, 由于近年来大气环流异常事件的发生和重庆地区的特殊地形条件, 使得重庆市也经常出现高温、干旱等极端天气过程, 例如 1992、1995、2006 年夏季都曾出现过 40 °C 以上的酷热天气; 这些偶发高温事件对重庆市气温变化规律也会产生很大的影响。

4 气温变化的可能原因

气候变化既包括自然变化过程,也有人类活动的影响。气温变化的影响因素既包括大气环流、太阳辐射、降水及日照条件,也包括局地地形以及城市化效应引起的热岛环流等。在全球变暖的气候背景下,环流异常和人类活动的影响是气温变化的主要原因。重庆市的气温变化趋势与全球、全国气温变化具有一定的差异,表现出非常显著的季节性特征,即冬季平均最低气温增暖速率较高,而夏季平均最高气温和年平均气温则呈下降趋势。年平均气温呈下降趋势与西南地区东部的气温变化相一致,许多学者就其原因已经作了许多有益的工作,得出了一些有意义的结论(任国玉等,2005),故本文将重点分析冬、夏两季重庆市气温变化的原因。

4.1 夏季气温变化的原因

大气环流是形成和制约区域或局地气候的重要因子,影响夏季气温的主要因素与大气环流背景及其所产生的天气气候条件密切相关。黄荣辉等(1994)指出,热带西太平洋暖池热状况与我国夏季天气、气候变化密切相关;当西太平洋暖池海温偏暖(冷),菲律宾周围对流活动偏强(弱),引起副热带高压偏北(南)。李跃清等(1999)认为热带西太平洋海温异常偏暖(冷),引起西太平洋副高偏西(东)偏北(南),由此影响川渝地区天气变化,是造成川渝地区夏季气温异常偏暖(冷)的重要大气环流特征。廉毅等(2005)认为四川省西北部和重庆市年降水量变化与影响中国的东亚夏季风在 30°N 以北地区活动和太平洋区极涡强度指数存在显著相关关系。影响川渝盆地夏季降水的主要影响因子有季风、热带西太平洋热状况等,后者通过影响西太副高等环流系统变化,进而影响四川盆地气温和降水气候异常(周长艳等,2006)。可见,川渝地区夏季气候变化复杂,影响因素众多。

重庆市夏季 T 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 与西太副高指数、南方涛动指数(SOI)、Niño 3 区海表温度(SST)、南极涛动指数(AOI)、极涡指数、印缅槽指数、青藏高原指数的统计相关结果表明,重庆市夏季气温变化与副高北界、脊线位置指数存在显著的正相关

关系,而与其他因子的相关系数均未通过信度为5%的显著性检验。当夏季副热带高压位置偏北时,重庆市气温偏高;反之,则气温偏低(表3)。副高北界位置与重庆市夏季降水量的相关系数为 -0.35 ,两者之间呈显著的负相关关系;而近48年来副高北界位置的变化有逐渐南退的趋势(图2f),可能是造成西南地区东部夏季降水偏多、导致重庆市夏季最高气温下降的主要原因。

许多学者分析了西太副高对我国(陶诗言等,2006)、西南地区(唐佑民等,1997)和青藏高原东侧(李跃清等,2003)等地气候变化的影响机制。就西南地区而言,当副高加强、西伸北进时,川中、川东位于副高的控制之中;川西则位于副高西部偏南暖湿气流输送区,同时受夏季青藏高原热低压的影响,西南季风携带的暖湿空气沿副高西部和青藏热低压之间向北输送,所以这时有利于川西降水,而不利川中、川东降水;当副高减弱、东缩南退时,川中、川东及长江口一带处于暖湿气流输送区,同时处于副热带锋区和西风带中。当西风槽有低槽或低涡发生移经锋区上空时,则产生不稳定扰动,有利于川中、川东降水;而川西及青藏高原东部常位于高压控制,不利于产生降水。副高位置变化对青藏高原东侧地区夏季气温变化具有重要影响,当夏季西太副高位置偏北(南)时,使得江淮流域到川渝地区、青藏高原上空的高度场异常偏高(低),西风带偏北(南),从而不利于(有利于)冷空气向中低纬度地区南下扩散,导致川渝地区多晴朗少云(阴天多云)天气,总云量偏少(多),造成川渝地区气温偏高(低)。

重庆市夏季天气气候的这种变化并不是局地现象,与夏季环流场变化特别是西太副高的影响直

表3 1960~2007年重庆市夏季气温与副高指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between summer temperature in Chongqing and the subtropical high indices

	面积指数	强度指数	西伸脊点	北界指数	脊线指数
T	0.06	-0.01	-0.07	0.35^*	0.47^*
$T_{\max}$	-0.05	-0.12	0.03	0.31^*	0.45^*
$T_{\min}$	0.22	-0.12	-0.20	0.28^*	0.40^*

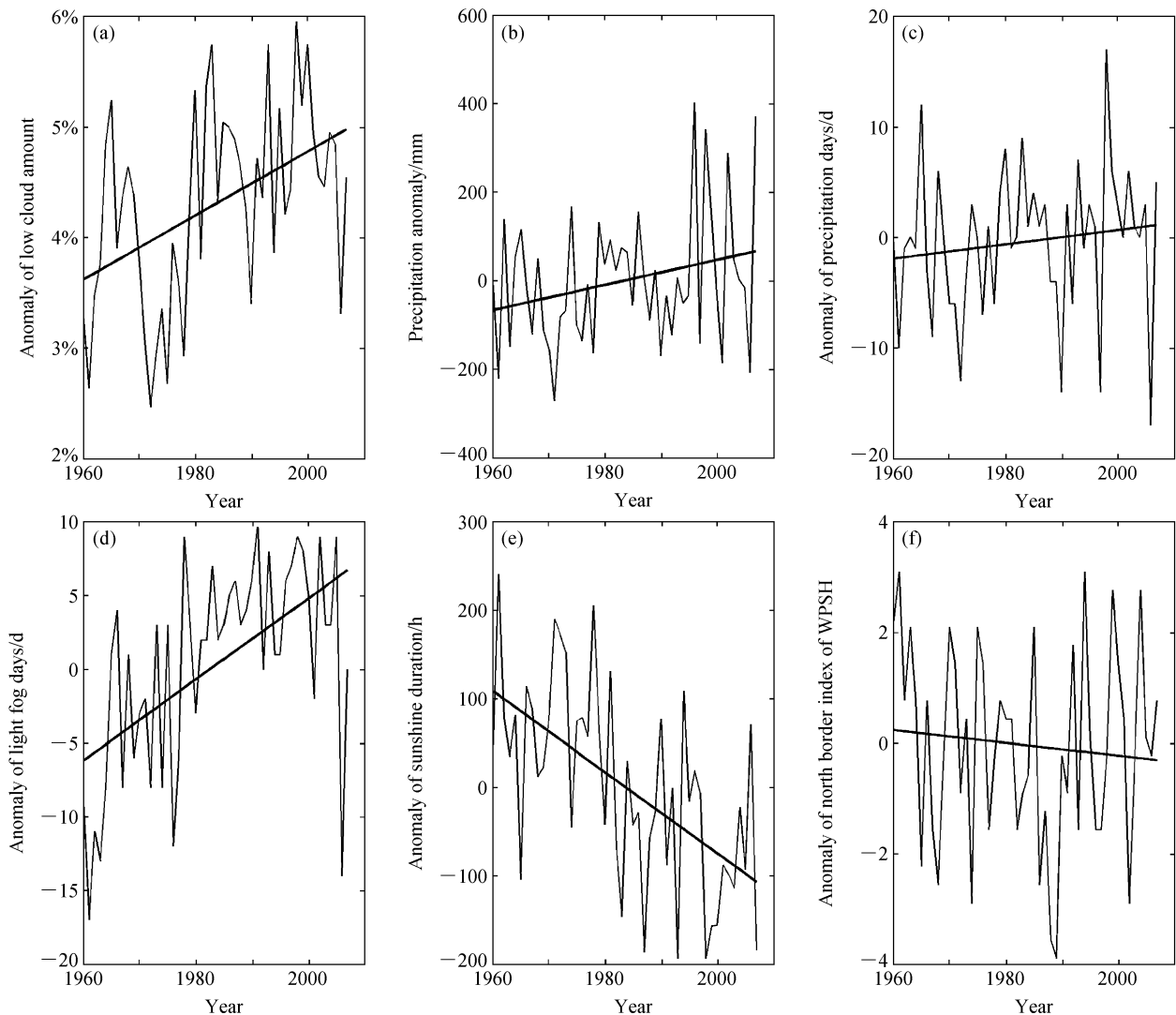


图2 1960~2007年重庆市夏季气温影响因子的变化曲线及趋势：(a) 低云量；(b) 降水量；(c) 降水日数；(d) 轻雾日数；(e) 日照时数；(f) 副高北界

Fig. 2 Time series of anomalies of (a) low cloud amount, (b) precipitation, (c) precipitation days, (d) light fog days, (e) sunshine duration, and (f) north border index of the western Pacific subtropical high (WPSH) in summer and their trends in Chongqing during 1960 – 2007

接相关。西南地区东部近几十年来的夏季降水量、降水日数、云量都明显增多而日照时数显著减少(刘晓冉等, 2007)。在全球变暖的背景下, 因大气环流系统的影响, 夏季副热带高压位置趋于偏南, 导致重庆市降水量、降水日数增加, 日照时间减少, 可能是重庆市气温维持下降趋势的重要原因。

夏季降水和云雾天气增多, 使得白天地面获得的太阳辐射量减少, 往往引起夏季最高气温降低; 而冬季云量和雾日增多, 使得夜间地面与大

气之间的长波辐射交换量减少, 地面有效辐射增大, 从而导致冬季最低气温增高。为了了解云、雾、降水对重庆气温的影响, 分别统计了重庆夏季、冬季气温与同期降水日数、降水量、云量、雾日及日照时数的相关系数, 通过对天气气候变化的综合分析探讨重庆市夏季最高气温降低、冬季最低气温升高的原因。

统计结果(表4)表明, 重庆市夏季气温与降水日数、降水量、云量之间存在明显的反相关关系, 而与日照时数呈显著的正相关关系; 其中平

均最高气温与降水及日照的相关最为密切, 平均最低温度的相关程度较低, 大都通过了信度为 5% 的显著性检验。影响日照条件的因素主要包括云量、大气中的水汽和气溶胶等。近 48 年来, 重庆夏季云量增多, 城市轻雾增加, 降水量和降水日数增多, 以致日照时数呈下降趋势。降水日数和降水量与日照时数之间存在明显的反相关关系, 反映了不同云天状况对日照时间的影响, 即当白天的阴雨天气增多时, 日照时间减少, 从而影响重庆市夏季气温特别是最高温度的变化。

图 2 给出了重庆市夏季降水量、降水日数 (日降水量 ≥ 0.1 mm 的日数)、日照时数和低云量的多年变化曲线。可见, 近 48 年来重庆市夏季降水量、降水日数、总云量、低云量均呈上升趋势, 分别增加了 136.26 mm、3.10 d、0.96%、13.87%, 而日照时数减少了 220.28 h。这些事实说明, 重庆市夏季气温的下降趋势伴随着云雨天气的明显增多以及日照时数的显著减少。

4.2 冬季气温变化的原因

近 57 年来, 重庆市冬季气温升高与全国大部分地区的气温上升是一致的。这种上升与大气环流的变异和调整有直接的关系。自 20 世纪 80 年代中后期以来, 冬季欧亚西风环流指数以正距平居多, 纬向环流偏强, 经向环流偏弱; 东亚大槽偏东、偏弱; 西太副高面积和强度自 20 世纪 70 年代后期出现由弱到强的转折之后, 以偏强为主, 副高西伸脊点位置偏西、脊线位置偏北 (唐国利等, 2006)。另外, 这种环流形势可能与赤道附近

西一中太平洋海温冷暖异常和 El Niño 事件有关, 在 20 世纪 90 年代的前 5 年里就出现了 3 次 El Niño 事件, 与之对应的是冷空气不易南下、东亚冬季风偏弱 (李清泉等, 1997)。上述这些有利于冬季气温偏高的因素在 20 世纪 90 年代表现得非常明显, 所以重庆市冬季气温变化与全国大部分地区一样出现增温趋势。由于大气环流的变异和调整, 重庆市雨水天气、日照以及雾日等随之发生变化, 从而影响冬季气温的变化。为此, 通过对冬季天气气候变化的综合分析来探讨重庆市冬季气温变化的原因。

重庆市冬季气温与降水日数、降水量之间存在反相关关系 (表 5), 平均气温、平均最低气温与雾日、云量和日照的相关程度较低, 基本上未通过信度为 5% 的显著性检验, 而冬季平均最高气温与云量、日照的相关程度较高。由图 3 可见, 近 48 年来重庆市冬季降水量、降水日数、日照时数均呈下降趋势, 分别减少了 2.01 mm、12.97 天、85.44 h, 而总云量和低云量增加了 1.6%、10.7%; 表明随着近年来冬季降水日数的减少、云量和轻雾日增多, 平均最低气温显著升高。

4.3 雾对气温变化的影响

位于长江、嘉陵江两江汇合处的重庆主城区及两江沿岸中小城区, 宽阔的江面提供了较充足的水汽, 地形闭塞, 空气温暖湿润, 风速小, 静风频率高, 为雾的形成提供了有利条件, 是世界闻名的“雾都”之一。雾直接影响能见度和太阳辐射等气象要素, 从而影响气温的变化。重庆市近 48 年来平均每年出现轻雾的天数占 83.35%, 出现雾的天数占 12.50%, 近年来雾日数总体呈逐年下降趋势, 而轻雾日数呈急剧上升趋势 (图 3a); 夏季和冬季雾日分别减少了 7.0 天和 13.2 天, 同时轻雾日数增加了 13.8 天和 15.4 天。可见, 重庆市全年轻雾所占日数多且变幅较大。所以, 分析轻雾与重庆市气温变化的关系具有实际意义。

表 4 重庆市夏季气温与其影响因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between summer temperature and its impact factors in Chongqing

	降水日数	降水量	日照时数	总云量	低云量	轻雾日数
T	-0.75*	-0.49*	0.73*	-0.82*	-0.71*	-0.39*
$T_{\max}$	-0.80*	-0.55*	0.82*	-0.84*	-0.77*	-0.42*
$T_{\min}$	-0.53*	-0.20	0.41*	-0.66*	-0.44*	-0.17

表 5 重庆市冬季气温与其影响因子的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between winter temperature and its impact factors in Chongqing

	降水日数	降水量	雾日	轻雾日数	总云量	低云量	日照时数
T	-0.31*	-0.26	-0.03	0.06	-0.27	-0.17	0.01
$T_{\max}$	-0.27	-0.29*	0.18	-0.19	-0.58*	-0.35*	0.35*
$T_{\min}$	-0.31*	-0.18	-0.21	0.26	0.02	0.03	-0.27

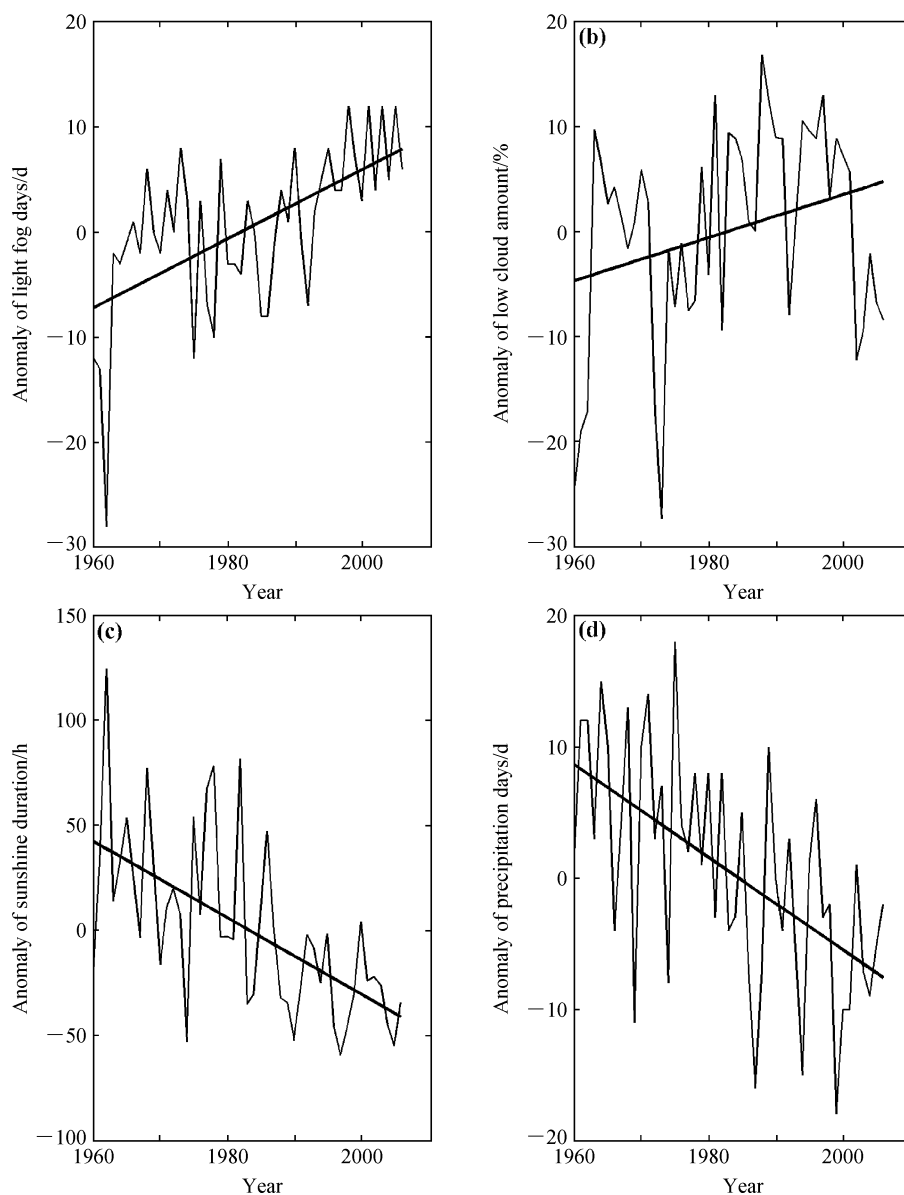


图3 1960~2007年重庆市冬季气温的影响因子的变化曲线及趋势:(a)轻雾日数;(b)低云量;(c)日照时数;(d)降水日数

Fig. 3 Time series of anomalies of (a) light fog days, (b) low cloud amount, (c) sunshine duration, and (d) precipitation days in winter and their trends in Chongqing during 1960–2007

根据重庆市近48年来历年气温和轻雾的资料,将夏季和冬季轻雾出现次数的距平值从小到大排列,前5个代表少轻雾年,后5个代表多轻雾年,并分别统计同期气温。结果表明:夏季多轻雾年的 T 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为27.50、31.82、23.91℃,少轻雾年的 T 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为28.09、33.05、24.19℃;冬季多轻雾年的 T 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为8.79、11.89、6.54℃,少轻雾年的 T 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为9.33、11.91、7.53℃。由此可

见,重庆市气温在少轻雾年明显高于多轻雾年,尤以夏季的最高气温和冬季的最低气温最为显著,表明雾对重庆市气温变化具有显著影响。

近20年来随着重庆市城市的扩大,工业的迅速发展,排放到空气中的污染物日益增多,再加上重庆独特的地理环境,使污染物不能及时扩散,从而导致重庆上空污染物浓度的迅速增加,气溶胶粒子的数浓度比80~90年代增加了几倍;气溶胶粒子浓度的增加,使雾滴数密度剧增,雾滴尺

度锐减,从市中心区向市郊雾滴数密度减少,而雾滴尺度增大(何友江等,2003)。高浓度的气溶胶粒子,在白天吸收太阳的直接辐射,致使白天近地层温度减小,边界层中上层温度升高,大气边界层层结有趋于稳定的趋势,对流减弱,水汽和气溶胶粒子向近地层堆积;在夜晚又削弱了地面的长波辐射,使近地层温度升高。对重庆市气溶胶粒子温度效应的计算表明,仅城市大气污染颗粒物影响夜晚长波辐射一项,可使气温上升 0.5°C 左右(李子华等,1996)。夜晚长波辐射减少,又直接影响了雾的生成。由于气溶胶粒子浓度的增加,引起城市热岛效应加剧,对雾和轻雾的形成和变化具有重要作用(马学款等,2007),而且重庆市的地形条件特殊,因此有必要对重庆市气温变化受城市热岛效应的影响做进一步分析。

4.4 城市热岛效应的影响

近百年来全球及全国气候变化最突出的特点就是显著的增暖趋势,比较公认的原因是人类活动造成温室气体的增加以及气候系统内部的年代际自然变化;许多学者对气候变暖的机制和原因进行了全面、深入的研究(王绍武,2001)。

众所周知,经济活动增加使城市的能源消耗增多,温室气体排放加暖了城市大气而形成城市热岛效应。对城市热岛的分析,目前较常用的方法是对同一时期城市气温与邻近参考站(郊县气象站)的气温进行比较;选择重庆以西的璧山县、以南的巴县作为参考站,距沙坪坝站直线距离分别为24、20 km。就各季节的温度来说,在这一有限距离内,山区站的温度分布可以认为是连续的(杨贤为等,1989)。两个参考站2004年的城市人口分别为13.97万、25.32万,气温受环境因素影响较小。为了消除海拔的影响,以1971~2000年作为气候参考期,将全部资料转化为距平值,并取其平均值进行热岛强度的比较。采用热岛强度倾向率即重庆城区气温倾向率,与参考站气温倾向率之差(陈正洪等,2007)进行分析。

表6给出了重庆市1960~2007年不同季节的热岛强度倾向率。结果表明,以平均气温 T 和平均最低气温 $T_{\min}$ 表示的热岛强度倾向率的季节变化基本一致,冬、春季城市热岛强度大于夏、秋季,冬季增温效应更显著;表明重庆市冬季最低气温的升高与冬季城市热岛强度的增大相关密切。

表6 1960~2007年重庆市热岛强度倾向率

Table 6 Heat island intensity trends in Chongqing during 1960 - 2007

	T	$T_{\max}$	$T_{\min}$
春季	0.07	-0.01	0.08
夏季	0.05	-0.09	0.06
秋季	0.02	-0.08	0.05
冬季	0.05	0.03	0.13

以平均最高气温 $T_{\max}$ 表示的热岛强度倾向率仅冬季表现为热岛效应,而春、夏、秋季均为冷岛效应;说明气溶胶粒子浓度增大、云雨天气增多、总云量和低云量增加、日照时间减少引起重庆市最高气温下降的辐射减弱效应主要表现在夏、秋季,对春季最高气温也有一定程度的影响。

同一季节中,重庆市最低气温的热岛强度倾向率最大,最高气温的热岛强度倾向率最小,平均气温居中,非对称性变化特征明显。就日变化而言,城市热岛强度夜晚最强,白天相对较弱。由于云雾和气溶胶含量的增加,夜晚阻碍了地面向外发射的长波辐射,减少了地表的能量损失,对近地层最低气温具有增温作用;白天气溶胶对低层大气的反向散射是最高气温降低、产生冷岛效应的主要原因。由于城市热岛的气候效应及其变化是一个非常复杂的问题,对气温变化的影响和作用还有待进一步深入研究。

5 结论

根据1924~2007年的长序列气温资料,对重庆市的气温变化趋势及其可能原因进行了分析。主要结果如下:

(1) 近84年来重庆市平均气温呈下降趋势,但近57年表现为微弱的上升趋势,与全国平均气温的线性变化存在差异。平均最高气温的降温趋势明显,对平均气温的影响较大;而平均最低气温呈升温趋势,使得气温日较差减小。极端最高、最低气温具有非对称性变化特征,夏季极端最高气温呈下降趋势,而冬季极端最低气温则表现为显著上升趋势。

(2) 20世纪80年代以来夏季副热带高压位置偏南,导致西南地区东部多云雨天气,总云量增多、降水量和降水日数增加、日照时数减少,可

能是重庆市夏季温度维持下降趋势的主要原因; 云雾降水对太阳辐射的削弱作用导致重庆市夏季最高气温降低。

(3) 冬季云量和轻雾日数增多、降水量和降水日数减少以及热岛强度增大, 可能是重庆市冬季最低温度升高的重要原因; 云雾对近地层长波辐射交换的阻碍作用、城市热岛的增温效应使得重庆市冬季最低气温显著升高。

参考文献 (References)

- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. 气象学报, 63 (5): 634 - 646. Chen Longxun, Zhou Xiuj, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (5): 634 - 646.
- 陈正洪, 王海军, 任国玉. 2007. 武汉市城市热岛强度非对称性变化 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 282 - 286. Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu. 2007. Asymmetrical change of urban heat island intensity in Wuhan, China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 282 - 286.
- 丁一汇, 戴晓苏. 1994. 中国近百年来温度变化 [J]. 气象, 20 (12): 19 - 26. Ding Yihui, Dai Xiaosu. 1994. Temperature variation in China during the last 100 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 20 (12): 19 - 26.
- 国家气象中心. 1990. 全国地面气候资料 (1961 - 1990) 统计方法 [G]. 北京: 国家气象中心, 6 - 22. National Climate Center. 1990. Statistical Method for Climate Changes of China's Mainland during 1961 - 1990 [G] (in Chinese). Beijing: National Climate Center, 6 - 22.
- 何友江, 朱彬, 马力. 2003. 重庆市冬季雾生消的物理特征 [J]. 南京气象学院学报, 26 (6): 821 - 828. He Youjiang, Zhu Bin, Ma Li. 2003. The physical process of Chongqing fog's genesis and dissipation in winter [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (6): 821 - 828.
- 黄嘉佑. 1995. 北京地面气温可预报性及缺测资料恢复的研究 [J]. 气象学报, 53 (2): 211 - 216. Huang Jiayou. 1995. A study of predictivity and reconstruction for missing records for temperature in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (2): 211 - 216.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响 [J]. 大气科学, 18 (4): 456 - 465. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impact of the convective activities over the western tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (4): 456 - 465.
- 李清泉, 丁一汇. 1997. 1991 - 1995 年 El Niño 事件的特征及其对中国天气气候异常的影响 [J]. 气候与环境研究, 2 (2): 163 - 177. Li Qingquan, Ding Yihui. 1997. The basic feature of the El Niño events during 1991 - 1995 and their anomalous influences on the weather and climate in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2 (2): 163 - 177.
- 李永华, 刘德, 朱业玉, 等. 2005. 重庆市气温及降水变化的奇异谱分析 [J]. 高原气象, 24 (5): 798 - 804. Li Yonghua, Liu De, Zhu Yeyu, et al. 2005. Singular spectrum analysis of surface air temperature and precipitation series in Chongqing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 798 - 804.
- 李跃清, 李崇银. 1999. 近 40 多年四川盆地降温与热带西太平洋海温异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 4 (4): 388 - 395. Li Yueqing, Li Chongying. 1999. The relationship between the cooling of air temperature in Sichuan basin and the anomalies of SST over tropical western Pacific during the last more than 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (4): 388 - 395.
- 李跃清, 李崇银. 2003. 青藏高原东侧地区夏季气温变化及其可能成因 [J]. 高原气象, 22 (增刊): 25 - 31. Li Yueqing, Li Chongyin. 2003. Variation of summer air temperature on the East Side of Qinghai-Xizang Plateau and its probable causes [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (Suppl.): 25 - 31.
- 李子华, 涂晓萍. 1996. 考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应 [J]. 大气科学, 20 (3): 359 - 366. Li Zihua, Tu Xiaoping. 1996. The influence of urban aerosols with humidity effect on temperature during night [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (3): 359 - 366.
- 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭, 等. 2005. 中国气候过渡带干旱化发展趋势与东亚夏季风、极涡活动相关研究 [J]. 气象学报, 63 (5): 740 - 749. Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting, et al. 2005. Correlation of drought development tendency on China's climate transition zone and activity of east Asia summer monsoon and polar vortex [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (5): 740 - 749.
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 1995. 中国近百年温度序列 [J]. 大气科学, 19 (5): 525 - 534. Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. 1995. Series of average air temperature over China for the last 100-year period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (5): 525 - 534.
- 刘德, 李永华, 何卷雄. 2003. 重庆市夏季气温及降水变化的小波分析 [J]. 高原气象, 22 (2): 173 - 178. Liu De, Li Yonghua, He Juanxiong. 2003. Wavelet analysis of variations of summer temperature and precipitation in Chongqing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (2): 173 - 178.
- 刘德, 李永华, 阳作明, 等. 2004. 重庆市年平均气温变化多时间尺度特征的诊断研究 [J]. 应用气象学报, 15 (2): 251 -

256. Liu De, Li Yonghua, Yang Zuoming, et al. 2004. A diagnostic analysis of multi-time-scale variations of temperature in Chongqing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 15 (2): 251–256.
- 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 2007. 我国西南地区 1960–2000 年降水资源变化的时空特征 [J]. *自然资源学报*, 22 (5): 783–792. Liu Xiaoran, Li Guoping, Fan Guangzhou, et al. 2007. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in Southwest China during 1961–2000 [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 22 (5): 783–792.
- 马学款, 蔡芎宁, 杨贵名, 等. 2007. 重庆市区雾的天气特征分析及预报方法研究 [J]. *气候与环境研究*, 12 (6): 795–803. Ma Xuekuan, Cai Xiangning, Yang Guiming, et al. 2007. Study on fog synoptic characteristics and fog forecast method in Chongqing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (6): 795–803.
- 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 2005. 近 54 年中国地面气温变化 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 717–727. Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziyang, et al. 2005. Changes of surface air temperature in China during 1951–2004 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 717–727.
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 791–798. Tang Guoli, Ren Guoyu. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 791–798.
- 唐国利, 丁一汇. 2006. 近 44 年南京温度变化的特征及其可能原因的分析 [J]. *大气科学*, 30 (1): 56–68. Tang Guoli, Ding Yihui. 2006. The changes in temperature and its possible causes in Nanjing in recent 44 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (1): 56–68.
- 唐佑民, 翟武全, 许金洪. 1997. 我国西南地区夏季降水异常与太平洋海温季节演变的关系 [J]. *海洋与湖沼*, 28 (1): 88–95. Tang Youmin, Zhai Wuquan, Xu Jinhong. 1997. The relation between the summer precipitation anomaly in Southwestern China and the seasonal SST variation in the Pacific Ocean [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 28 (1): 88–95.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 513–525. Tao Shiyang, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 17 (5): 513–525.
- 王绍武. 2001. 现代气候学研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 80–114. Wang Shaowu. 2001. *The Evolution on Modern Climatology* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 80–114.
- 杨贤为, 何素兰, 崔伟强, 等. 1989. 气象台站网合理分布概论 [M]. 北京: 气象出版社, 34–38. Yang Xianwei, He Sulan, Cui Weiqiang, et al. 1989. *The Outline on Optimum Spacing of Meteorological Station Networks* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 34–38.
- 赵宗慈, 王绍武, 罗勇. 2007. IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (3): 183–184. Zhao Zongci, Wang Shaowu, Luo Yong. 2007. Assessments and projections of temperature rising since the establishment of IPCC [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (3): 183–184.
- 周长艳, 李跃清, 彭俊. 2006. 高原东侧川渝盆地降水与水资源特征及变化 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1217–1226. Zhou Changyan, Li Yueqing, Peng Jun. 2006. The characteristics and variation of precipitation and water resource of Sichuan and Chongqing basin on the eastern side of the plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 1217–1226.