

白莹莹,张焱,何泽能,等.2013.城市化进程对重庆都市圈降水空间分布的影响.气象,39(5):592-599.

城市化进程对重庆都市圈降水空间分布的影响^{* 1}

白莹莹^{1,2} 张焱³ 何泽能² 杨世琦² 吴铮² 赵磊²

1 重庆市气候中心,重庆 401147

2 重庆市气象科学研究所,重庆 401147

3 重庆市气象台,重庆 401147

提 要: 利用重庆 17 站逐日气象观测资料、重庆统计数据,采用降水量空间标准化方法,研究了城市化进程不同阶段对重庆都市圈降水空间分布的影响。结果表明:重庆城市化进程能够以 1997 年为界限被划分为城市化缓慢发展阶段和快速发展阶段,都市圈年降水量变化的空间差异与城市化进程的速度有关。比较两个阶段的差值,发现随着城市化进程的加快,核心都市圈年降水量、降水强度、中雨和暴雨日数都有所增加,呈明显的“城市雨岛”特征。从季节差异来看,夏季降水以主城区及其北侧郊区降水增加,冬季降水以主城区及其南侧郊区增加为主,可能是因为城乡温度梯度与环境风场相互作用,导致不同季节降水分布的区域差异,使得主城区及其下风方向降水增加,且以下风区增加最为显著。

关键词: 重庆, 城市化, 都市圈, 标准化相对降水

中图分类号: P463

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.05.007

Influence of Urbanization Process on the Spatial Distribution of Rainfall over Chongqing Metropolitan Region

BAI Yingying^{1,2} ZHANG Yan³ HE Zeneng² YANG Shiqi² WU Zheng² ZHAO Lei²

1 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

2 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

3 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: Daily meteorological observation data of 17 stations and yearly statistical data of Chongqing were employed to diagnose the influence of urbanization on the spatial distribution of rainfall over Chongqing metropolitan region by adopting the method of spatial standardization of precipitation. The results showed that the period of 1970–2009 was divided into two stages by the year 1997, that is the slow developing stage of urbanization and the quick developing stage of urbanization, and spatial difference of annual rainfall over the metropolitan region has relations with the acceleration of urbanization. Comparing the difference of the two stages, it is found that with the fast development of urbanization, the annual rainfall amount, rainfall intensity and the frequency of moderate and torrential rains has got increased, showing the distinct feature of urban “rain-island”. In addition, as far as seasonal difference is concerned, urbanization has exerted different influence on spatial distribution of precipitation over the metropolitan region in Chongqing in summer and winter. The urban areas and the suburb in the north of the city see more rains over summer time while the increase of precipitation happens in the urban areas and its suburb in the south in winter. Such spatial distribution of rainfall in different seasons is possibly caused by the interaction between seasonal prevailing wind and the temperature gradient of urban areas and suburbs so that the rainfall in the urban and its downwind areas has increased significantly, especially in the downwind areas.

Key words: Chongqing, urbanization, metropolitan region, standard relative rainfall

* 国家自然科学基金(40975058)、重庆市自然科学基金计划(CSTC2010BB7335 和 CSTC2012JJA20015)、中国气象局成都高原所开放基金(LPM2012001)和重庆气象局青年基金(QNJJ201206)共同资助

2012 年 5 月 18 日收稿; 2012 年 8 月 6 日收修定稿

第一作者:白莹莹,主要从事区域气候变化研究.Email:byying113@126.com

引言

重庆面积广,人口众多,辖区(市)县多,特别是1997年被直辖后,城市规模迅速膨胀,城市人口急剧增长,城市建筑物越来越密集,以及机动交通工具的成倍增长,显著地改变着整个城市的生态与环境,引起了社会的广泛关注。对于城市化的影响,近年来围绕我国主要大城市作了相关研究,得到了一些有意义的结论(胡文志等,2009;李兴荣等,2006;司鹏等,2010)。目前针对重庆的研究大多关注于城市热岛效应,并取得了一些成果,揭示了重庆市城市热岛的主要变化规律及温度分布情况(任启福,1992;李子华等,1993;何泽能等,2008;2010)。

关于城市化对降水分布的影响,已有一些学者作了针对北京(王喜全等,2007;2008)、上海(梁萍等,2011)、天津(俞烜等,2008)等大城市的降水城郊差异研究。研究表明,随着城市化规模的扩大,北京冬季城市热岛效应增强,冬季降水的空间分布变化则由城市化缓慢期的“城市湿岛”转变为城市化快速期的“城市干岛”(王喜全等,2007;2008);上海地区城市化进程的快慢对冬、春季降水量的空间分布没有明显影响,但夏、秋两季(特别是夏季)降水量的空间差异呈现显著的雨岛效应(梁萍等,2011);天津在20世纪70年代初期之后雨岛效应更加明显,且受降水的丰枯影响较大,丰水年雨岛现象明显,枯水年雨岛消失(俞烜等,2008)。

虽然针对北京、上海、天津等大城市的研究很多,但这些城市地形平坦,不像重庆地形条件复杂。重庆市位于四川盆地东南部,境内地形复杂、地势起伏,以丘陵、山地为主,周围地形特殊,北有巴山屏障,南为七曜山藩篱,西为平行岭谷开阔地带,东有巫山阻隔。独特的地形条件和地理位置,使得重庆区域内气候差异显著;“大城市大农村”的格局,也说明区域内的城市化步伐不同;因此重庆城市化进程具有其独特的特点,有必要进行深入研究。2007年重庆决策层确立了“一小时经济圈”和渝东北、渝东南“一圈两翼”区域发展新格局,重庆市共有39个区县,“一小时经济圈”是以重庆主城区特大城市为中心、以1小时车程为半径的区域,涵盖22个区县,形成一个具有明显聚集效应、具备竞争优势的西部地区最大城市群。作为新兴的大都市,其降水的空间分布与城市化进程的关系如何?与北京、上海等其

他大都市有何差异?为了弄清城市化进程对重庆城区的影响,选取“一小时经济圈”作为研究对象,一方面由于该圈主要涵盖了重庆西部地区,区域内海拔高度落差较东南部和东北部山区小,且均属于同一气候区,因此地形条件和气候特征差异相对较小;另一方面,该圈涵盖了重庆区域内主要的经济主体和产业聚集区,能反映城市化发展的主要影响。

1 资料和方法

1.1 资料

重庆都市圈的范围选用“一小时经济圈”涵盖的22个区(县),包括核心都市圈9区和长寿、合川、涪陵、永川、江津、万盛、璧山、綦江、荣昌、南川、大足、潼南及铜梁13个区(县),其中核心都市圈包括主城区6区及近郊北碚、渝北、巴南3区,主城区的代表站为沙坪坝站(见图1)。

所用资料包括:(1)1970—2009年重庆地区17个站点的逐日观测资料,包括降水、平均气温、相对湿度等,站点分布情况见图1;(2)1980—2009年的统计数据,包括人口密度、地区生产总值、能源消费和耕地面积。其中,资料(1)来源于重庆市气象局,资料(2)来源于重庆市统计年鉴。

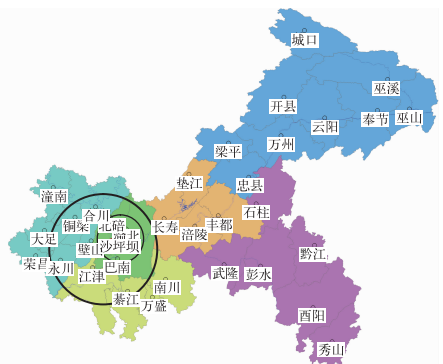


图1 重庆都市圈(一小时经济圈)及核心都市圈(主城区)的范围

Fig. 1 The range of metropolitan region (“One Hour Economic Circle”) and the core metropolitan region (main city zone) of Chongqing

1.2 方法

孙继松等(2007)曾指出:对于经度和纬度跨度不超过 2° 的内陆区域而言,其气候变化区域性特征可以认为是基本一致的,而区域内各测站降水参量(降水量、降水日数)与区域平均降水参量之间的空

间相对变化,可以被认为能够在很大程度上表征局地环境差异对降水系统的影响。基于此,采用空间标准化方法,研究城市化进程对城市降水空间分布的影响,一方面可以平滑极端降水的影响,由于降水在空间分布上的随机性和弱相关性(相比于地面气压场和温度场而言),极端洪涝年和极端干旱年以及偶然性突发强降水,对降水量均值影响很大,直接比较台站的绝对降水量,不是一个好的特征量;另一方面可在一定程度上扣除区域气候变化的影响,降水的分布不但可以在一个时期内进行比较,也可以在两个时期进行比较。标准化相对降水量的定义参考文献(王喜全等,2008)的定义,将降水相对于其均值和标准差进行标准化,得到

$$R_{ni} = (P_{mi} - P_n) / \sigma_n^P$$

$$n = 1961, \dots, 2000; i = 1, \dots, 14 \quad (1)$$

式中, R_{ni} 为相对降水量, P_{mi} 为降水量, P_n 为年均降水量, σ_n^P 为降水量年标准差, n 为年号, i 为降水站号。

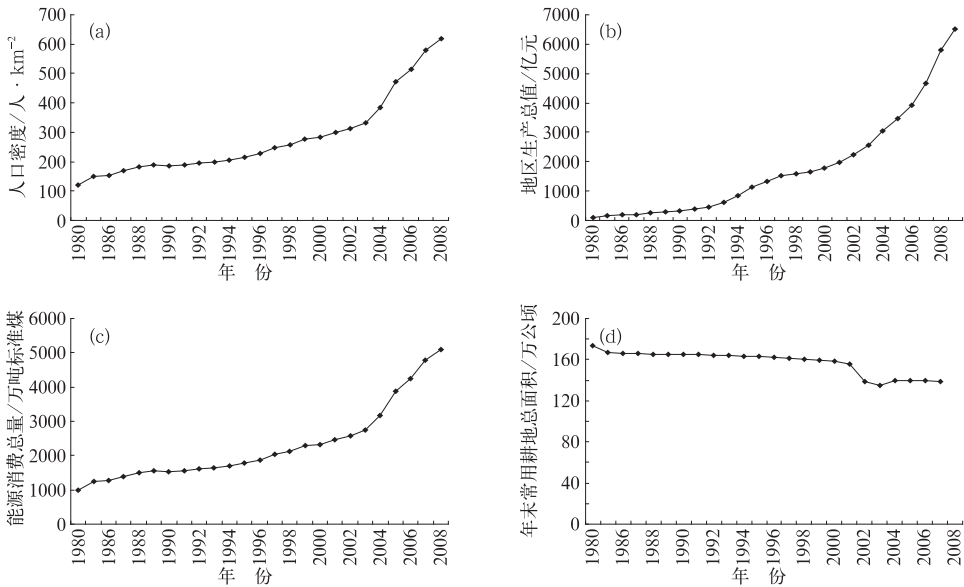


图 2 1980—2009 年重庆地区人口密度(a)、地区生产总值(b)、能源消费总量(c)和年末常用耕地面积(d)的变化
Fig. 2 (a) Population density, (b) local gross domestic product, (c) total energy consumption and (d) cultivated area of Chongqing region during 1980—2009

界,将 1970—2009 年划分为 1970—1997 和 1998—2009 年前后两个阶段,并分别称之为城市化缓慢发展阶段和快速发展阶段。前后两阶段的变化趋势表明,后一时期的的人口密度、地区生产总值、能源消费总量变化趋势显著,均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验。

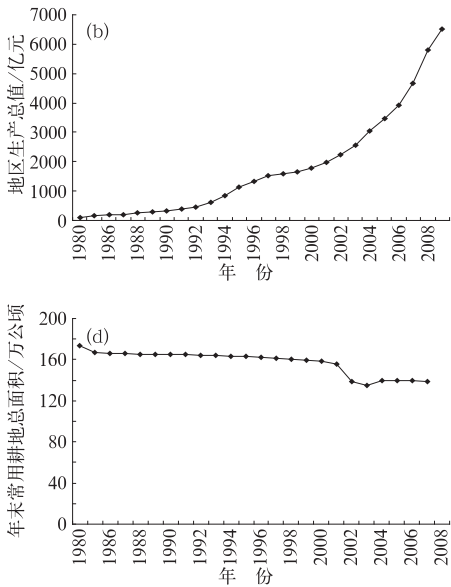
2.2 重庆都市圈降水变化

从重庆都市圈区域内年平均绝对降水量来看(图 3a),近 40 年降水总体变化趋势不明显,但是小

2 重庆都市圈城市化进程阶段划分

2.1 相关统计数据分析

人口密度、地区生产总值、能源消费的快速增长与城市化进程的快速发展密切相关。因此,根据反映城市化进程速度的人口密度、地区生产总值、工业能源终端消费及耕地面积的变化来划分城市化进程的不同阶段。图 2 给出了这 4 个指标的变化情况,20 世纪 90 年代末期开始重庆地区人口密度、地区生产总值、能源消费总量的快速增长,M-K 突变检验的结果显示,人口密度、地区生产总值以及能源消费总量的突变均发生在 1997 年(图略),而耕地面积则在 90 年代末发生明显减少,突变发生在 1994 年(图略)。综合考虑以上统计指标,以及 1997 年重庆直辖开始的大规模的城市建设,以 1997 年作为分



波分析结果显示在 1997 年后出现了周期的显著变化,1997 年后 3~5 年振荡显著增强(图略),可见降水在 1997 年前后发生了显著变化,但是从时间均值及总体趋势不能反应出该变化,参照式(1)计算了区域年平均空间标准差(图 3b),发现城市化缓慢发展阶段,降水量空间标准差变化趋势不显著,而进入快速发展阶段后,空间标准差呈增加趋势。由此说明,随着城市化进程加快带来的城郊差异的增大,使得降水量空间差异也增大。

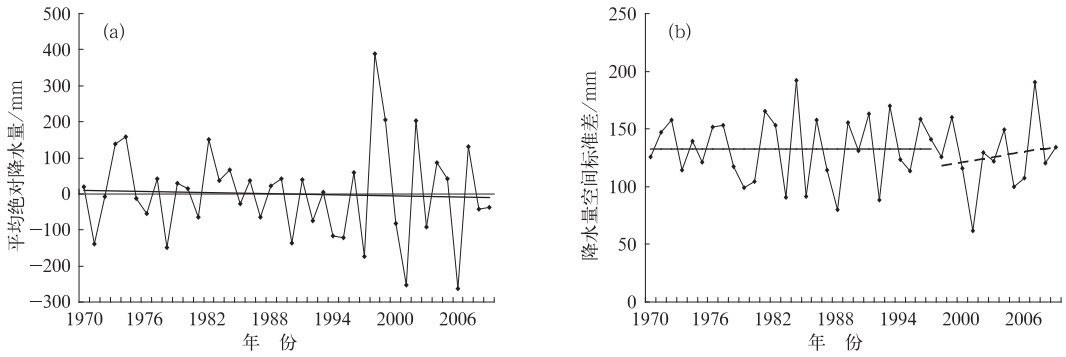


图 3 1970—2009 年重庆都市圈年平均绝对降水量(a)、降水量空间标准差(b)距平序列及趋势
 Fig. 3 Time anomaly series and trends of (a) annual absolute rainfall, (b) spatial standard difference of Chongqing metropolitan region during 1970—2009

3 城市化进程对重庆都市圈降水空间分布的影响

3.1 相对降水量变化

根据式(1)分别计算了 1970—1997(图 4a)和 1998—2009 年(图 4b)多年平均的标准化相对降水量,对比前后两个时期的降水量分布可以发现,在城市化缓慢发展阶段,整个都市圈内,降水呈西少东多

分布,在城市化快速发展阶段,其分布格局与缓慢发展阶段基本一致,仍然是西少东多,但在核心都市圈范围内,相对降水量变化最为显著,可以看出随着城市化进程的加快,核心都市圈内除巴南站外,其他站点相对降水量显著增加,且降水偏多的范围也进一步扩大,呈现了降水向核心都市圈集中的趋势。图 4c 是图 4b 和 4a 的差值,从差值场可以看出城市化进程快慢的显著影响,核心都市圈内降水增多,而其外围的郊区一圈,70%的站点,相对降水量减少,呈现“城市雨岛”特征。

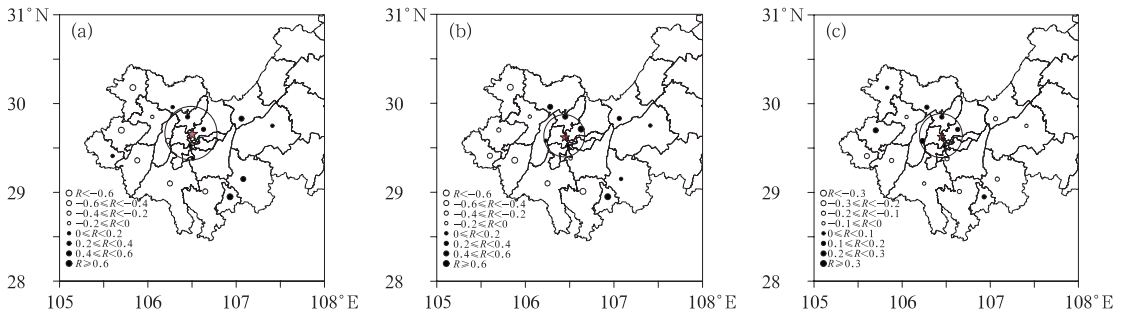


图 4 重庆都市圈年平均标准化相对降水量分布
 (a)1970—1997 年,(b)1998—2009 年,(c)两个阶段的差

(实心圆表示相对降水偏多,空心圆表示降水偏少,偏多偏少的程度与圆圈的直径成正比,下同)

Fig. 4 Distribution of annual average standard relative rainfall amount in Chongqing metropolitan region, (a) from 1970 to 1997, (b) from 1998 to 2009, (c) differences between the two stages. (Solid circle represents more relative rainfall and hollow circle represents less relative rainfall)

3.2 降水强度变化

3.2.1 相对降水强度变化

将相对降水量除以雨日(日降水量大于 0.1 mm 定义为雨日)得到相对降水强度(图 5),发现其分布与图 4a 和 4b 相类似,比较两个阶段的差异,其西弱东强的分布基本一致,但在城市化快速发展阶段,核心都市圈内的相对降水强度量级增大,特别是

这个时期快速发展的渝北、北碚等近郊,使得核心都市圈与其外围的差异增大,降水强度更为集中。

3.2.2 不同量级降水变化

分别计算了不同级别降水日数在城市化进程快速发展阶段和缓慢发展阶段的差值(图 6)。小雨和大雨日数在两个时间段的差值分布呈现全区一致的变化趋势,即:小雨日数在整个都市圈内显著减少(图 6a),大雨日数显著增加(图 6c),区域内站点之

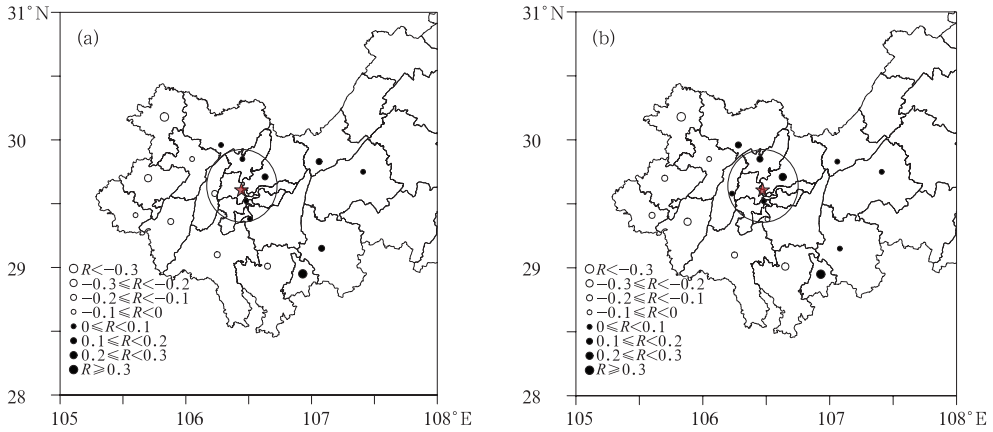


图 5 重庆都市圈年平均标准化相对降水强度
(a)1970—1997 年,(b)1998—2009 年

Fig. 5 Distribution of annual average standard relative rainfall intensity in Chongqing metropolitan region, (a) from 1970 to 1997, (b) from 1998 to 2009

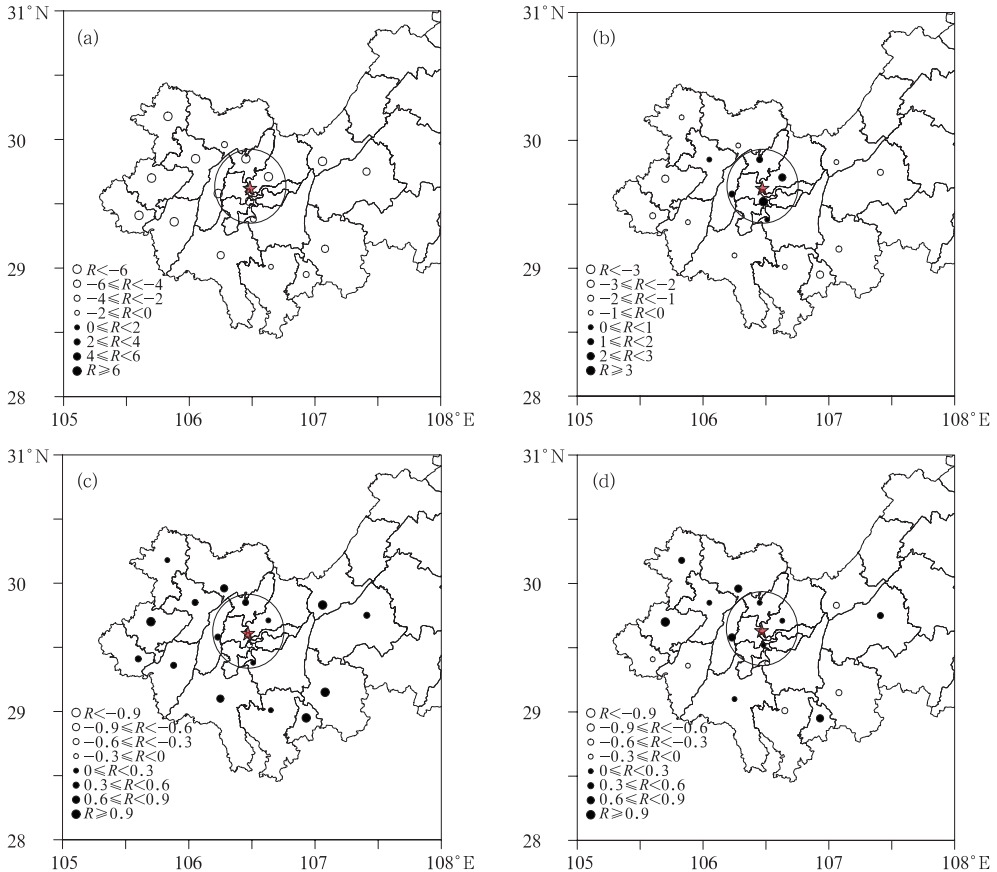


图 6 1970—2009 年重庆小雨(a),中雨(b),大雨(c)和暴雨(d)不同级别降水日数城市化
进程快速发展阶段和缓慢发展阶段差值

Fig. 6 Differences of (a) light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain and (d) torrential rain
between rapid developing period and slow developing period during 1970—2009

间差异不大,这种整个区域一致性的变化可能是由于区域气候变化引起的。随着城市化进程的加快,中雨和暴雨日数则呈现显著的区域差异(图 6b 和

6d),核心都市圈内,中雨和暴雨日数显著增加,由此说明城市化进程对降水日数的影响主要表现在中雨和暴雨以上的强降水日数上。

3.3 不同季节降水量空间差异

3.3.1 相对降水量季节差异

重庆城市化进程改变了重庆都市圈年降水量的空间分布,而年降水量是由各季节降水累加而成,城市化进程对各季节降水量空间分布的影响情况如何?各季节有何差异?图 7 给出了春、夏、秋、冬四季在城市化进程不同阶段相对降水量的分布情况。在城市化缓慢发展阶段,都市圈内春、秋、冬季降水分布相类似,呈东西分布,西少东多,以北碚、沙坪坝、巴南为界;夏季降水在区域内分布较为分散,主

城区降水偏少。进入城市化快速发展阶段,春季和夏季降水都呈现了增多的趋势,核心都市圈范围内降水增加,特别是夏季,尤以主城区及其北部郊区降水增加最为显著,呈现了城区多郊区少的城市雨岛效应(图 7f);秋、冬季降水则在此阶段呈现减少的趋势,但冬季主城区及其南侧降水有增加趋势(图 7h)。利用非参数检验方法中的符号检验法,分别对不同季节降水分布差异进行检验,发现夏、秋、冬三季均可通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,其中以夏季和冬季的差异最为显著,说明两个阶段夏、冬季降水分布呈现显著差异。

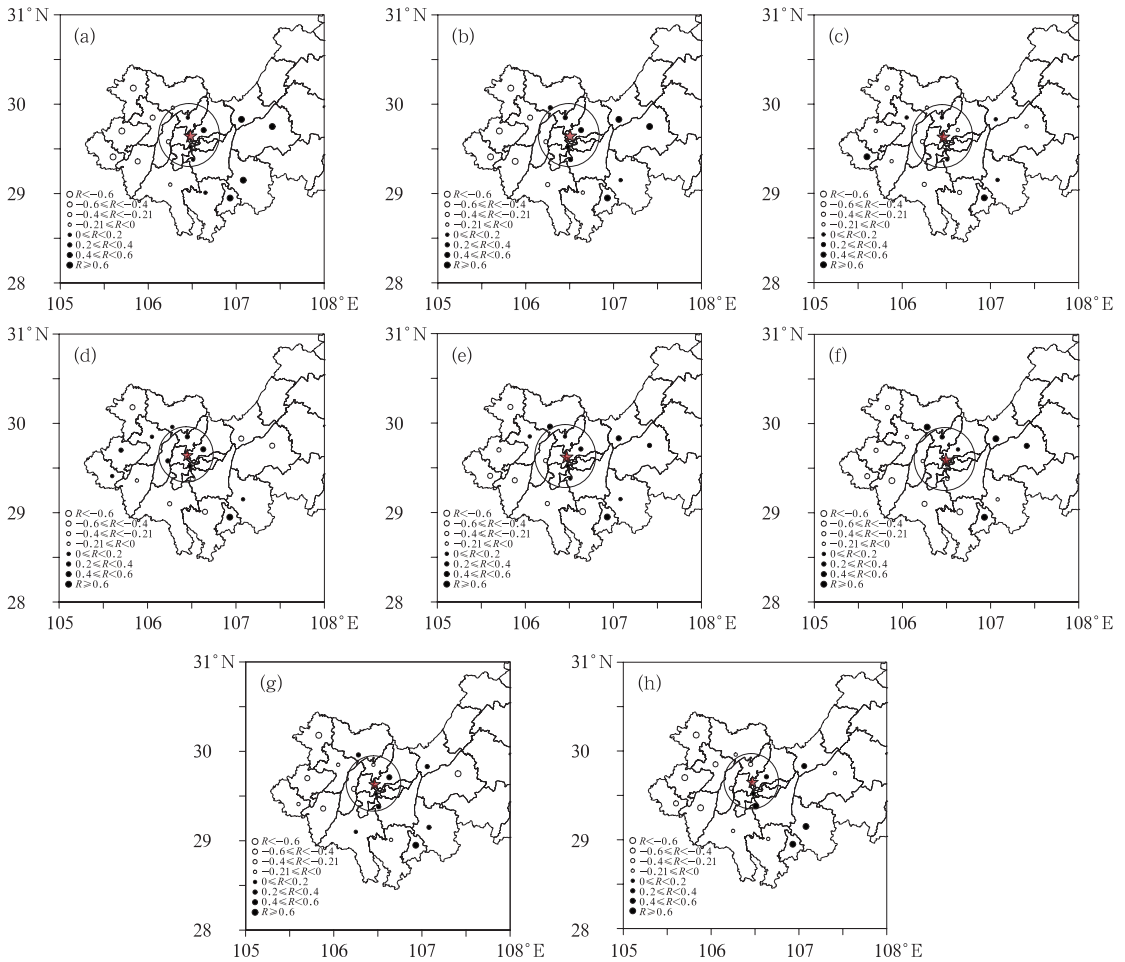


图 7 1970—1997 年(a)~(d)和 1998—2009 年(e)~(h)的春、夏、秋、冬季标准化相对降水量
 Fig. 7 Distribution of annual standard relative rainfall amount in spring, summer, autumn and winter, the average from 1970 to 1997 (a—d)and the average from 1998 to 2009 (e—h)

图 8 分别给出了城市化快速发展阶段和缓慢发展阶段夏(图 8a)、冬(图 8b)两季相对降水量的差值。可以发现,夏季降水以主城区及其北侧郊区降水增加,冬季降水以主城区及其南侧郊区增加为主,且最大值均不在主城区的沙坪坝站,降水中心夏季

位于北侧郊区,冬季位于南侧郊区。
 3.3.2 降水空间分布季节性差异成因初步分析
 以上分析表明:城市化造成了重庆都市圈降水空间分布特征的变化,这种变化以夏季和冬季最为显著。造成这种变化的原因是什么?

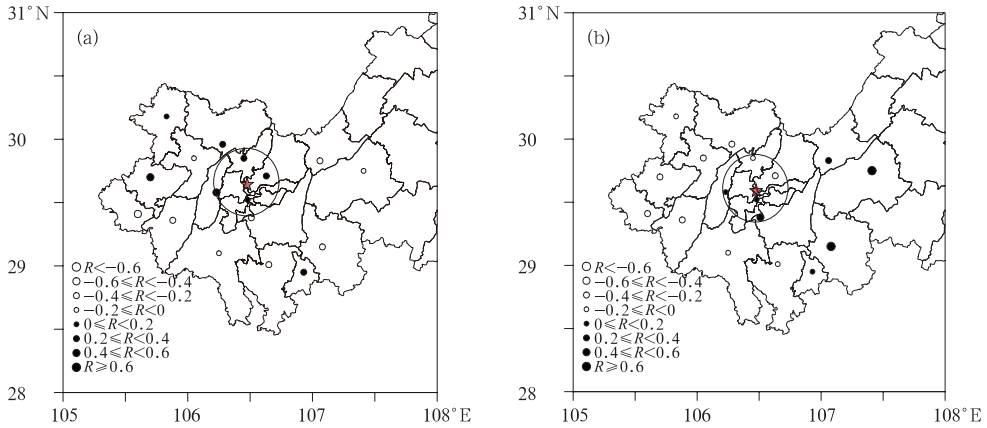


图 8 1970—2009 年夏季(a)、冬季(b)相对降水量城市化进程快速发展阶段和缓慢发展阶段的差值
Fig. 8 Differences of relative precipitation amount in (a) summer and (b) winter between rapid developing period and slow developing period during 1970—2009

20 世纪 70 年代, Huff 等(1999)提出了控制坐标方法。按照平均引导气流方向将城市和周边地区分为了 4 个区域:上风向控制区、城市中心区、下风向控制区和最小影响区,并指出城市下风向控制区是城市对降水的最大影响区域。基于此方法, Shepherd 等(2002)利用 TRMM 卫星资料分析了美国一些大城市 1998—2000 年夏季的降水分布,发现大城市下风 30~60 km 处的月降水率平均增加 28%,市区增加约为 5.6%。江志红等(2011)利用 CMORPH 资料分析了长三角地区降水分布特征,发现长三角城市效应主要表现在夏半年,城市中心和下风向地区的夏半年降水强度比上风向地区增加 5%~15%,最大值通常位于城市中心下游 20~70 km。孙继松等(2007)指出热岛效应和季节性变化的环境风场间相互作用是导致降水变化的原因:盛行风的下游方向,温度梯度产生的边界层内垂直上升运动有利于局地降水过程的发生,而在上游方向则相反。

为反映出城市化进程所造成的热岛效应,选取沙坪坝和北碚站分别代表主城区和城郊站,沙坪坝站是主城区的代表站,资料序列连续没有迁站记录,北碚站距离沙坪坝站较近,是邻近的几个郊区站中资料序列连续没有迁站记录的测站,因此选取沙坪坝和北碚这两个测站分别作为城区站和郊区站,分析两站夏、冬季平均气温差,从而近似反映重庆的热岛效应(图 9)。夏季和冬季城郊平均气温差均呈增加趋势,冬季的差异更为显著,温差的趋势系数接近于夏季的 2 倍,说明重庆的热岛效应明显。重庆处于东亚季风区,又受东北—西南向平行岭谷地形影响,夏季盛行偏南风,冬季盛行偏北风。根据孙继松等(2007)给出的简化热岛环流公式 $\frac{\partial D}{\partial z} = -\frac{\lambda}{u} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\omega}{u} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ 进行讨论:其中 D 为水平散度,在时间平均状态下,忽略公式右边第二项(湍流扩散

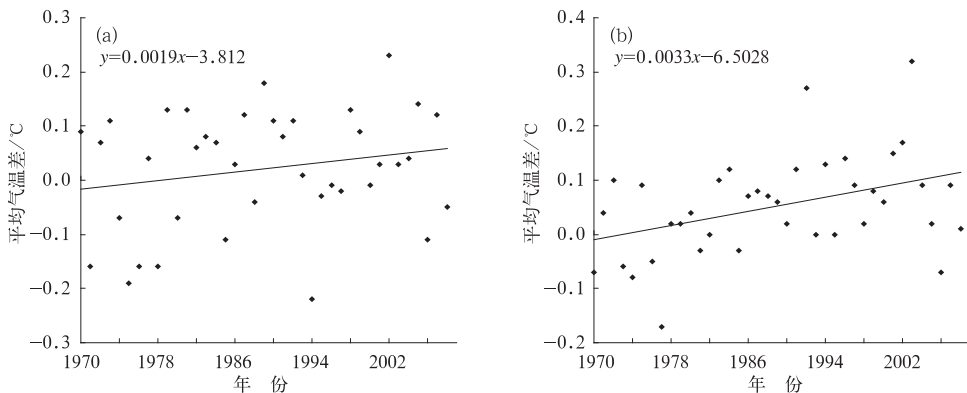


图 9 1970—2009 年沙坪坝和北碚的夏季(a)、冬季(b)平均气温差回归曲线
Fig. 9 Regression curves of temperature difference between Shapingba Station and Beibei station in (a) summer and (b) winter during 1970—2009

项)的影响,水平散度的垂直变化受平均温度梯度和水平风速大小的制约。由于热岛效应是沿城市中心区向四周逐渐减弱的,夏季时,重庆主城区北侧郊区位于城市热岛下游 $\frac{\partial \theta}{\partial x} < 0$,水平散度随高度增大,表现为低层辐散气流随高度增强,或者辐合气流随高度减弱,根据质量方程,边界层的垂直运动表现为上升气流,有利于局地降水过程发生降水增加;而重庆主城区南侧位于城市热岛上游,水平散度随高度变化正好相反,边界层内的垂直运动表现为下沉气流,不利于降水的产生。冬季时,主城区南侧郊区位于城市热岛下游,城区南侧边界层内产生上升运动,有利于降水增多。随着城市热岛效应的显著加强,边界层内的垂直上升运动速度也变得越大,这就使得冬、夏两季降水空间分布表现为主城区上风方向降水减少,下风方向降水趋于增加的分布特征(图8)。无论是 Huff 等(1972)提出的控制坐标方法,还是孙继松等(2007)提出的热岛效应对降水分布的可能影响机制,都指出在城市化快速发展阶段,城市热岛效应加强,城市化对降水分布的影响有利于在城区及其盛行风向下风区降水增加。我们的结果与之基本一致。

4 结 论

(1)相关统计数据表明,在1997年前后,重庆人口密度、地区生产总值、工业能源终端消费及耕地面积等数据发生了显著的变化。以其作为分界,将1970—2009年划分为1970—1997和1998—2009年前后两个阶段,并分别称之为城市化缓慢发展阶段和快速发展阶段。

(2)随着城市化进程加快带来的城郊差异的增大,降水量空间差异也增大。重庆都市圈年降水量变化的空间差异与城市化进程的速度有关,核心都市圈相对降水量增加,而其外围的郊区一圈,大多降水减少,呈现城市雨岛特征。

(3)比较城市化缓慢发展和快速发展两个阶段的差值,随着城市化进程的加快,核心都市圈的相对降水强度显著增强,特别是这个时期快速发展的渝北、北碚等近郊,使得核心都市圈与其外围的差异增大,降水强度更为集中。虽然小雨和大雨日数的分布整体呈减少或增加趋势,没有体现出明显的城市效应,可能是由于区域气候变化造成的,但核心都市

圈内中雨和暴雨日数显著增加,由此说明城市化进程对降水日数的影响主要表现在中雨和暴雨以上的强降水日数上。

(4)从季节差异来看,夏季降水以主城区及其北侧郊区降水增加,冬季降水以主城区及其南侧郊区增加为主,且最大值均不在沙坪坝站,降水中心夏季位于主城区北侧郊区,冬季位于主城区南侧郊区,即城区及其下风方向降水增加,且以下风区增加最为显著。其原因可能是由于重庆都市圈冬、夏盛行风向不同,热岛效应和季节性变化的环境风场间相互作用导致不同季节降水分布的区域差异,有利于城区及盛行风向下风区降水增加。

参考文献

- 何泽能,李永华,陈志军,等. 2008. 重庆市 2006 年夏季城市热岛分析. 热带气象学报, 24(5): 38-43.
- 何泽能,李永华,白莹莹. 2010. 重庆市 2006 年夏季城市热岛数值模拟研究. 安徽农业科学, 38(5): 2464-2465.
- 胡文志,梁延刚,雷惠雯,等. 2009. 香港城市与郊区气候差异分析. 气象, 35(2): 71-79.
- 江志红,唐振飞. 2011. 基于 CMORPH 资料的长三角城市化对降水分布特征影响的观测研究. 气象科学, 31(4): 355-364.
- 李兴荣,胡非,舒文军,等. 2006. 近 15 年北京夏季城市热岛特征及其演变. 气象, 32(8): 42-46.
- 李子华,唐斌,任启福. 1993. 重庆市区冬季热岛和湿岛效应的研究. 地理学报, 48(4): 358-366.
- 梁萍,丁一汇,何金海,等. 2011. 上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究. 热带气象学报, 27(4): 475-483.
- 任启福. 1992. 重庆城市热岛效应. 重庆环境科学, 14(3): 37-41.
- 司鹏,李庆祥,李伟. 2010. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测. 气象, 36(2): 13-21.
- 孙继松,舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究. 大气科学, 31(2): 1-10.
- 王喜全,王自发,齐彦斌,等. 2007. 城市化与北京地区降水分布变化初探. 气候与环境研究, 12(4): 489-495.
- 王喜全,王自发,齐彦斌,等. 2008. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响. 中国科学(D辑): 地球科学, 38(11): 1438-1443.
- 俞炬,杨贵羽,周祖昊,等. 2008. 天津夏季降水演变规律及其城市效应. 地理科学进展, 27(5): 43-48.
- Huff F A, Changnon S A. 1972. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis. J Appl Meteor, 11(5): 823-842.
- Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. 2002. Rainfall modification by major urban areas; Observation from space born rain radar on the TRMM satellite. J Appl Meteor, 41(7): 689-701.
- Von Storch H, Francis W Z. 1999. Statistical Analysis in Climate Reserch. Cambridge: Cambridge University Press, 99-126.