

赵彩萍,周晋红,李兆奇,等. 城市化对太原暴雨变化的影响[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 109-118. [ZHAO Caiping, ZHOU Jinhong, LI Zhaoqi, et al. Influence of Urbanization on the Change of Rainstorm in Taiyuan[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1): 109-118], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0109

城市化对太原暴雨变化的影响

赵彩萍,周晋红,李兆奇,李艳红

(山西省太原市气象局,山西 太原 030082)

摘要:利用太原1981—2016年城市化发展与7个国家气象站降水资料、59个区域气象站2008—2015年气温、降水资料,分析了城市化与暴雨时空分布变化的关系及其影响机理。结果表明:(1)近36 a来,太原暴雨具有明显的局地性和年代际特征。太原单站暴雨日数占总暴雨日数的61.4%,1990年代较1980年代局地暴雨日数增加较快;1990年代中期以后,区域性暴雨的日数快速增多,范围扩大。1980—2010年代,城区暴雨明显多于县区,降水时间更集中,且城区暴雨东、西部存在明显差异。(2)太原城市化各项发展指数与短时暴雨发生频次均存在显著正相关,而城市人口增长和空间的扩大使得暴雨显著增多。(3)城市化使中心城区成为明显的热岛,城郊间的温度梯度增大。城市热岛的存在,使中心城区大气层结较其他区域更加不稳定,热力强迫在城区产生的中尺度热低压或边界层辐合线有利于触发强对流,从而产生短时暴雨。另外,在天气尺度背景下,热岛平均扰动场通过与偏东风(盛行风)相互作用,使得边界层平均热力稳定度在城区东部减小、西部增加,太原三面环山的地形结构强化了城区与山区间的温度梯度,使得城区东部雨强加大、短时暴雨易发。城市摩擦效应通过延长天气系统在城区滞留时间,也增大了城区暴雨的发生概率。

关键词:城市化;暴雨;变化;影响

文章编号:1006-7639(2019)01-0109-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0109

中图分类号:P461

文献标志码:A

引言

随着城市化进程的加快,城市下垫面被越来越多的钢筋、水泥、沥青等构成的建筑物和道路覆盖,人类生产生活产生了大量的人为热源,使得城市热岛等现象愈来愈显著,也改变了城市局地的能量平衡、边界层结构和大气成分,导致局地天气、气候及环境的变化^[1-4]。已有的城市气候研究主要集中在城市热岛方面,如朱家其等^[5]利用台站资料分析上海市城市热岛特征发现,上海城市热岛的日平均强度7月大约为2.6℃,1月在1℃以下;陈燕等^[6]利用边界层数值模式对杭州地区城市热岛现象模拟表明,杭州地区夏季的城市热岛现象较强,春、秋季次之,冬季最弱;李艳红等^[7]采用城郊气温对比方法研究太原城市热岛效应表明,太原热岛效应秋、冬季较强,春、夏季较弱,市区热岛强度有显著的日变化

特征,子夜至凌晨最强,午后最弱。可见,不同地区城市化造成的影响并不相同。

城市化对降雨量影响方面的研究也有不少。如HUFF等^[8]分析1941—1968年美国圣路易斯城市化对降水的影响、CHANGNON等^[9-10]在1968年开展的著名METROMEX计划(大城市气象观测试验),结果表明城市化使得城区上空和城区下风方向降水量增加,这种城市化效应具有明显的季节和日变化特征,通常在夏季和午后更明显;随着城区面积的增大,城市化使得降水增强效应明显。另一些研究表明城市化使得强降水的强度和概率明显增加^[11-13]。但北京城市化发展对区域气候影响的分析表明^[14-16],城市化使得北京地区降水量呈下降趋势,城区下降幅度比郊区明显,且在夏季下降最明显;并指出城市化使降水减少的机制可能是空气污染加剧、气溶胶增多、云滴减少导

收稿日期:2018-03-12;改回日期:2018-07-02

基金项目:山西省气象局2016年项目“太原短时强降水时空分布特征及预报研究”(SXKMSTQ20165227)和2018年项目“山西春玉米干旱及其影响研究”(SXKQNNY20185146)共同资助

作者简介:赵彩萍(1963—),女,山西榆社人,高级工程师,主要从事城市防灾减灾研究工作。E-mail:tyzcp@126.com。

致降水云减少。说明,城市化对降水时空分布和降水量变化的影响具有明显的局地性特征和地域差异。

暴雨是太原主要灾害天气之一,随着城市化的不断推进,近年来,暴雨导致的城市内涝事件屡有发生^[17],已成为城市防灾减灾的重要内容。城市化对太原暴雨产生了何种影响?这种影响在不同区域有怎样的差异?本文对太原城市化发展与暴雨时空分布变化的关系以及造成暴雨区域分布差异的可能影响机制进行探讨,旨在提高城市暴雨预报准

确率,为城市科学防灾减灾提供支持。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料有:太原市7个国家气象站(太原、小店、尖草坪站代表城区,其余站为县区)1981—2010年逐日降水观测资料及59个区域气象站2008—2015年5—9月逐日气温、降水资料,气象站点分布见图1;1986—2016年Micaps资料;1981—2016年《山西统计年鉴》和太原市统计局人口统计数据。

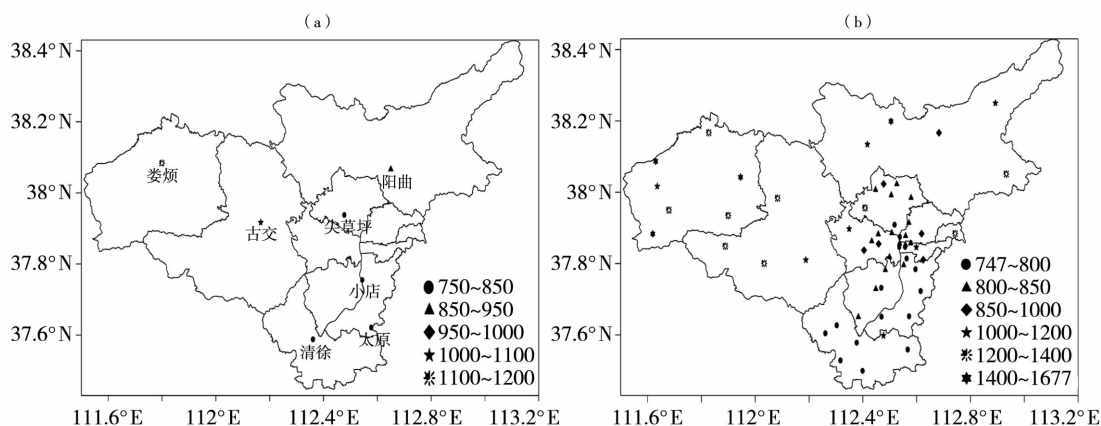


图1 太原市国家(a)及区域(b)气象站点及海拔高度(单位:m)分布

Fig. 1 Distribution of national (a) and regional (b) meteorological stations and the altitude (Unit:m) in Taiyuan

定义:日降水量 ≥ 50 mm为一个暴雨日;同日3站及3站以上出现暴雨为区域性暴雨;降水强度 ≥ 20 mm \cdot h $^{-1}$ 为一次短时暴雨(强对流天气);单站或多站同时出现暴雨为一个暴雨过程。

1.2 方法

利用太原城市发展与国家气象站降水资料,采用统计、线性回归、相关检验等方法分析暴雨的时空分布特征,研究城市化发展与暴雨变化的关系。

采用太原59个区域气象站气温、降水资料,通过计算空间距平^[18]分析城市化环境下的城市局地气候的空间特征。为尽可能消除测站海拔高度上存在的差异、大气环流背景本身年际变化对平均气温的影响,将区域气象站平均气温按照 0.6 °C \cdot (100 m) $^{-1}$ 的垂直递减率统一订正到城区平均海拔高度,然后计算2008—2015年太原地区59站的平均气温(降水量)与同期各站平均气温(降水量)的差值(即空间距平值)。

应用热流量方程,分析热岛环流对城市边界层热力稳定度的影响。取 x 坐标轴沿天气尺度环境风场方向,不考虑非绝热项和摩擦力影响的湍流大气的热流量方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: k 为垂直方向的湍流系数;采取小扰动法^[18],把气流分为基本气流(\bar{u} 、 \bar{w})和扰动气流(u' 、 w'),并取 $\theta = \bar{\theta} + \theta'$,带入(1)式,按基本量、扰动量及基本量与扰动量相互作用进行分解、化简,得到:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = k \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$u' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + w' \frac{\partial \theta'}{\partial z} = k \frac{\partial^2 \theta'}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \theta'}{\partial z} + w' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

因太原5—9月平均风速仅为 1.3 m \cdot s $^{-1}$,且城市热岛特征明显,故重点基于(3)、(4)式来讨论热岛环流热力特征及其对边界层热力稳定度的影响。

2 太原地理气候及城市化概况

太原地处黄土高原中部,晋中盆地北端。市境西、北、东三面环山,汾水中贯,地形北高南低呈簸箕形,城区位于中南部的河谷平原。市境总面积 6988 km 2 ,海拔 $746 \sim 2711$ m;城区总面积

1460 km²,平均海拔 800 m。

太原属暖温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,春、秋季变温迅速,夏季雨热同季,降水集中。年平均降水量 415 mm,5—9 月降水量约占全年的 81%,是暴雨、强对流天气多发时段,也是城市防灾减灾的关键时期。

太原作为山西省的省会、全国能源重化工基地,是一座高城市化率城市。图 2 为 1981—2016 年太原城市化发展指数的年变化。可以看出,1981 年以来,太原城市化进程不断推进,全市常住人口由 210.9 万增加到 434.4 万,人口大量向城镇聚集,县区人口增长缓慢且在 2010 年达 73.4 万后逐年减少,2016 年较 1981 年仅增加 9.3 万;建成区面积由

1981 年的 150 km² 扩大到 2016 年的 345 km²,城区不断向外扩张,城市化率也由 73.1% 增至 84.6%,城六区高达 93.4%,直逼一线城市。与此同时,1981—2016 年,太原地区生产总值(GDP)快速增长,由 24.2 亿元增长到 3002.9 亿元;城市用电量、住宅竣工面积逐年增加,2014 年达最高值分别为 219.5×10^8 kW·h 和 504×10^4 m²,较 1981 年分别增长了 6.7 倍和 453 倍,之后受老工业基地转型和政策调控双双有所回落;民用汽车拥有量则在 2014 年突破百万辆之后仍保持年 12 万辆以上的增速。城市的快速发展致使城区地面不透水面积逐年增加,人为热源急速增多,地表粗糙度快速增大。城市环境发生的较大变化,必将对局地气候产生影响。

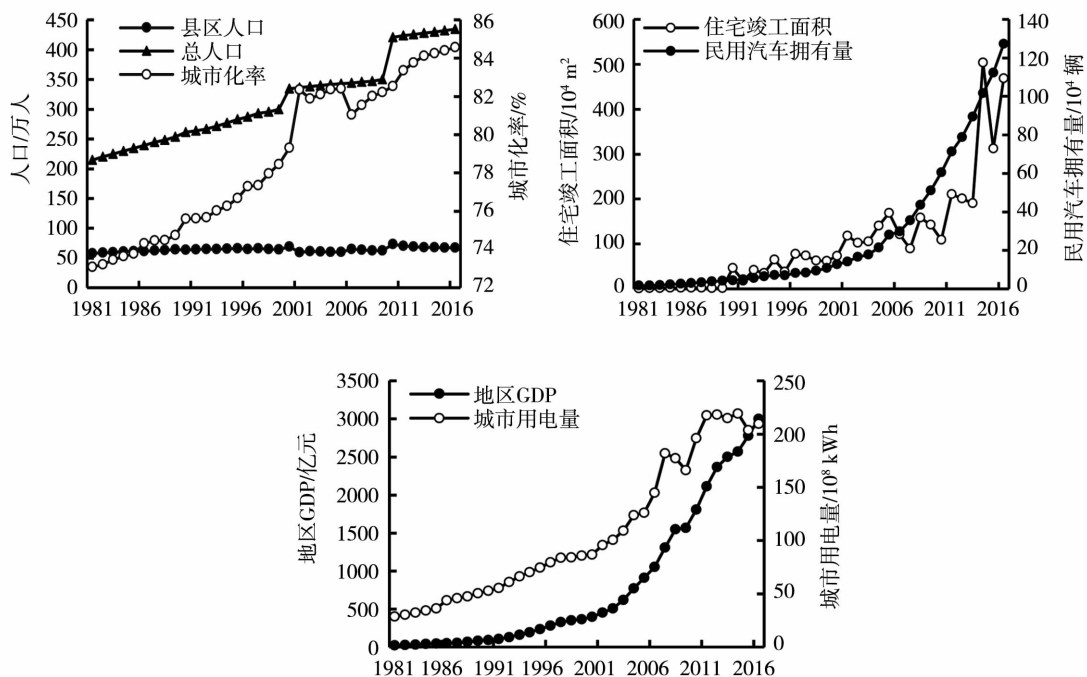


图 2 1981—2016 年太原城市化发展指数的年变化

Fig. 2 The yearly changes of urbanization development index in Taiyuan during 1981 - 2016

3 暴雨天气的时空分布

3.1 暴雨天气的时间变化

图 3 为 1981—2016 年太原市国家气象站暴雨累计日数和暴雨过程频次的月变化。可以看出,暴雨最早出现在 5 月(1985 年 5 月 4 日),最晚出现在 10 月(1991 年 10 月 2 日);7—8 月是暴雨多发时期,占暴雨总日数的 72.7%,7 月最多。36 a 来,太原共出现暴雨过程 70 次,其中 7—8 月出现 53 次,占暴雨过程总数的 75.7%。

从太原暴雨日降水起止时间看(表略),城区 62% 以上的暴雨集中在 12 h 之内,19% 的暴雨集中

在 6 h 之内;县区 50% 以下的暴雨集中在 12 h 之内,其中古交 37% 的暴雨集中在 12 h 以内。说明城区暴雨,降水时间更集中。

太原市 1981—2016 年短时暴雨出现时间统计(表略)显示,短时暴雨出现在 5—9 月,7—8 月出现的短时暴雨约占总次数的 78.3%,以 7 月最多。一日中,短时暴雨常出现在 14:00—22:00,以 16:00—17:00 最多,具有明显的日变化特征。

表 1 列出 1981—2016 年太原区域暴雨出现时间、区域、暴雨日最大降水量分布和主要影响系统的统计结果。太原区域性暴雨出现在 6—9 月,7—8 月最易出现区域性暴雨,占年总次数的 81.3%;1996 年

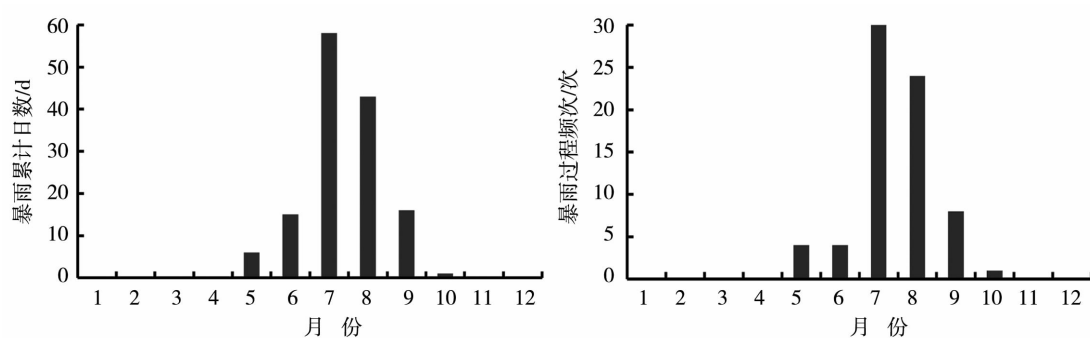


图3 1981—2016年太原市暴雨累计日数(a)和暴雨过程频次(b)的月变化

Fig. 3 The monthly change of accumulative days (a) and occurring frequency (b) of rainstorm in Taiyuan during 1981 - 2016

表1 1981—2010年太原区域性暴雨出现时间、区域、日最大降水及主要影响系统

Tab. 1 Occurrence time, area, maximum daily precipitation and main impact system of the regional rainstorm in Taiyuan during 1981 - 2010

时间	出现区域	最大降水量/mm	主要影响系统
1981-08-20	观象台、小店、尖草坪、清徐、阳曲、娄烦	72.5(小店)	—
1983-09-07	观象台、小店、尖草坪、清徐、阳曲	71.3(尖草坪)	—
1989-07-17	观象台、尖草坪、阳曲	63.2(观象台)	西南涡、副高、西南急流
1993-08-04	观象台、小店、清徐	73.9(观象台)	西北涡、切变线、副高
1996-08-04	观象台、小店、尖草坪、清徐、阳曲	76.9(观象台)	热带低压、副高、东风急流
2001-07-27	观象台、小店、清徐、娄烦	70.7(小店)	西南涡、切变线、西南急流
2002-06-09	观象台、小店、尖草坪、阳曲、古交、娄烦	62.5(小店)	高空槽、副高、西南急流、东南急流
2005-08-16	观象台、小店、尖草坪、清徐	85.2(清徐)	高空槽、副高、东南急流
2006-08-30	观象台、尖草坪、古交、娄烦	55.7(娄烦)	切变线、副高、西南急流
2009-07-08	观象台、小店、尖草坪、清徐、阳曲、古交、娄烦	94.8(小店)	西北涡、切变线、西南急流
2009-08-21	尖草坪、阳曲、古交、娄烦	68.6(阳曲)	切变线、副高、西南急流
2009-09-06	观象台、小店、尖草坪、阳曲	65.2(尖草坪)	切变线、副高、东南急流、东北急流
2012-07-31	观象台、小店、清徐、阳曲	70.1(清徐)	高空槽、副高、东南急流
2013-07-09	小店、尖草坪、清徐、阳曲、古交	70.0(小店)	切变线、东北急流
2014-07-09	观象台、小店、尖草坪、娄烦	63.0(娄烦)	切变线、副高、西南急流
2016-07-19	观象台、小店、尖草坪、清徐、阳曲、古交	133.0(小店)	高空槽、副高、西南急流

注：“—”表示资料缺失

之后,区域性暴雨较之前明显增多。区域性暴雨过程中,暴雨区位于城区的次数明显多于山区,最大降水量有68.8%出现在城区,最强的区域性暴雨出现在2016年7月19日,小店区最大。分析1986—2010年太原区域暴雨高低空主要影响系统及其配置,80%以上的区域暴雨与副热带高压、低空偏南(东)急流有关,是由其与低涡(槽)、切变线等共同影响造成,暴雨常常出现在低涡(槽)的一、四象限,850 hPa与700 hPa暖式切变线之间或附近,中、低空急流的左侧。50%以上的区域暴雨降水前有地面辐合线生成并触发(表略)。

3.2 暴雨天气的空间分布

图4为1981—2016年太原各地暴雨日数与短时暴雨频次的分布。可以看出:太原暴雨日数大致存在东部(城区、清徐、阳曲)多、西部(古交、娄烦)少的空间分布特征,观象台最多,古交最少,两地暴雨日数相差近一倍。短时暴雨呈明显的平原多、山区少及城区显著多于县区的分布特征。统计各地暴雨日的降水性质和各年代短时暴雨的频次(表略)得到,城区、清徐县平均47.5%的暴雨日伴有雷暴等对流性天气,观象台对流暴雨高达59.1%;其他县区伴有雷暴等对流性天气的暴雨日只有16.3%,

古交仅为 10.2%。无论那个年代,城区短时强对流天气均较县区偏多 30% 以上。即,城区短时强对流天气更易发,暴雨的对流性更强。

统计 1981—2016 年太原暴雨日出现站数及最大降水量年际变化可以看出(表略),太原出现的 70 个暴雨日中,单站暴雨有 43 次,占暴雨总日数的 61.4%;2 站同日出现暴雨的有 11 次,占比 15.7%;

3 站以上的区域暴雨日有 16 次,占比 22.9%,其中,7 站同时出现暴雨的只有 1 次,不足暴雨总数的 2%。说明太原暴雨以局地暴雨为主。1980—1990 年代,局地暴雨日数增加较快;1990—2000 年代,区域性暴雨日由 2 次增加到 7 次,2010 年代以来,区域暴雨仍保持较高的频次。1980—2010 年代,年代际暴雨日降水量极值不断被刷新,极端性持续增强(表 1)。

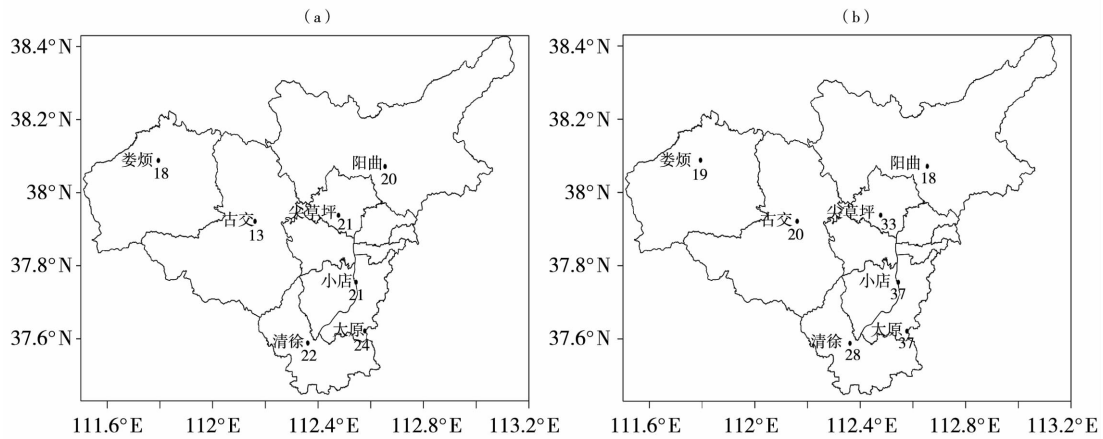


图 4 1981—2016 年太原各地暴雨日数(a,单位:d)与短时暴雨频次(b,单位:次)分布
 Fig. 4 Distribution of rainstorm days (a, Unit: d) and the occurring frequency of short-time rainstorm (b, Unit: time) in Taiyuan during 1981 - 2016

4 城市化对暴雨变化的影响

4.1 城市化对局地气候的影响

城市化不仅造成城市及其周边气温的升高,还可能通过热岛效应与流场的作用对城市降水产生影响^[18]。孙继松等^[19]指出,对于经、纬度不超过 2° 的内陆城市,区域内降水参量(降水量和降水日数)的年际绝对变化主要是由于大气环流背景差异造成的。各测站降水参量与区域平均之间的相对变化,能够在很大程度上表征局地环境对降水的影响。

4.1.1 城市化环境下的热岛效应

图 5 为太原市 2008—2015 年 5—9 月平均气温空间距平分布。可以看出,太原中南部河谷平原大部分地区平均气温为正距平,其他地区为负距平区。正距平区中,中心城区、清徐西部、尖草坪西北部分别有一个闭合的暖中心,平均气温距平为 1.6、0.8、0.6 °C,这种增温效应从暖中心向四周扩散,形成城市热岛,中心城区的热岛最强、范围最大。值得注意的是,这种向外扩散的过程明显受地形的阻挡,造成山区与城区之间的温度梯度明显加大。中心城区热岛中心与东、西两侧山区间的最大温差分别为 3.4 °C 和 3.1 °C;清徐西部热岛中心与山区最大温差达 2.8 °C,尖草坪西北部热岛中心与山区的最大温差

为 2.3 °C;而城区与平原之间的温度梯度并没有加强,甚至有所减弱。说明,城市热岛效应可能只存在于近地面边界层大气中,城区的变暖趋势并不代表整个对流层都在升温,因此,在分析城市热岛效应的影响时,需关注城市所处的地形背景。

4.1.2 城市化环境下的降水分布

图 6 为太原市 2008—2015 年 5—9 月降水量的

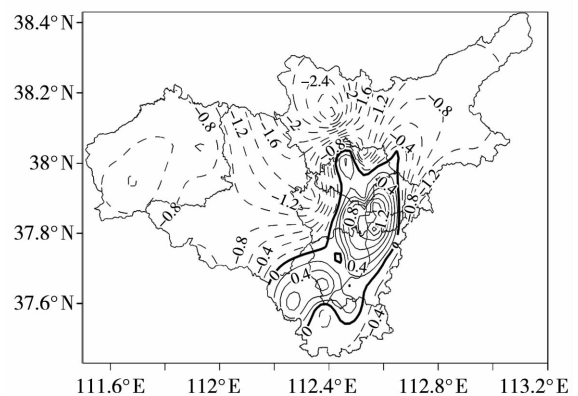


图 5 太原市 2008—2015 年 5—9 月平均气温空间距平分布(单位:°C)
 Fig. 5 Distribution of mean temperature spatial anomaly in Taiyuan from May to September during 2008 - 2015 (Unit: °C)

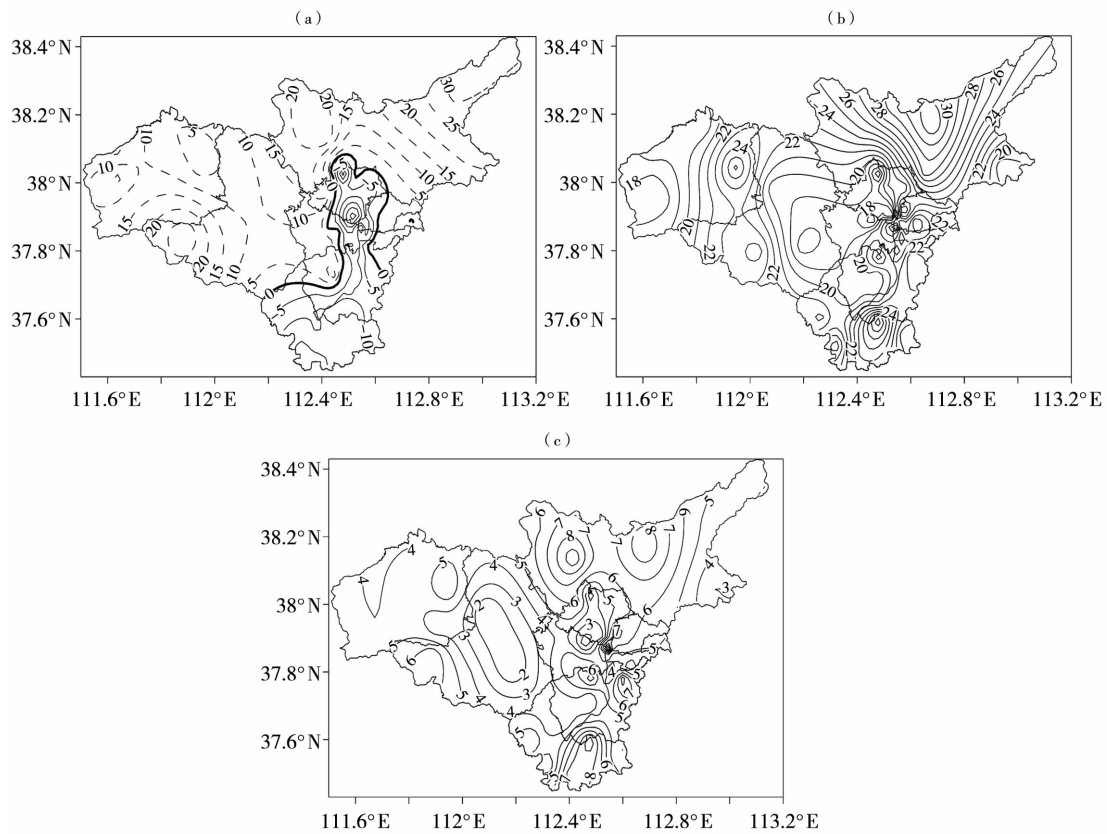


图6 太原市2008—2015年5—9月降水量的空间距平百分率(a,单位:%)、平均最大雨强(b,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)及短时暴雨频次(c,单位:次)分布

Fig.6 Precipitation days spatial anomaly percentage (a, Unit:%), mean maximum rain intensity (b, Unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) and the occurrence frequency of short-time rainstorm (c, Unit:times) in Taiyuan from May to September during 2008-2015

空间距平百分率、平均最大雨强及短时暴雨频次分布。可以看出,降水量距平百分率的正负距平分界线基本上沿山脉走向,东、西部偏向平原一侧分布;相对区域平均而言,5—9月太原中南部河谷平原大部降水量为负距平,属于相对干区,且城区有2个干岛中心,分别位于中心城区和尖草坪西北部,降水量依次偏少29%、24%;清徐南部也存在一个降水量偏少26%的干岛;其他地区降水量为正距平,是相对湿区。与图5对比发现,城市化环境下,城区是相对的暖区和干区,中心城区是太原市最强的城市热岛,也是最明显的城市干岛。

由图6可见,在相对湿区,平均最大雨强与短时暴雨频次的变化均与降水距平的大小有较好的正对应关系;但在相对干区,分布则较复杂,除大致存在东部雨强大、短时暴雨多及西部雨强小、短时暴雨少的截然相反的分布特征外,不同的干岛中心对应的雨强和短时暴雨分布也不相同,位于中心城区和清徐的干岛,其东部均有雨强大值区和短时暴雨易发区与之对应,但在尖草坪的干岛东部与之对应的却

是雨强小、短时暴雨少发的区域。综上所述,太原中南部河谷平原东部较西部强对流天气更易发生,降水强度更大;中心城区与清徐干岛东部是城区中短时强对流天气最易发、雨强增加最显著的区域。

4.2 城市化指数与暴雨变化的关系

4.2.1 城市化指数与短时暴雨频次的关系

太原位于季风气候区,暴雨的年际绝对变化与季风的强弱和大尺度环流背景的差异密切相关,比较而言,短时暴雨对城市化影响更为敏感。1981—2016年太原城市发展指数与短时暴雨频次之间相关系数统计(表2)显示,地区GDP、住宅竣工面积、民用汽车拥有量与短时暴雨频次的相关关系通过了0.05($\alpha_{0.05} = 0.3291$)的显著性检验,城市化率、城市用电量与短时暴雨频次的相关系数也通过了0.10的显著性检验。

4.2.2 区域人口与短时暴雨变化的关系

人口分布在很大程度上反映了城市化的程度,如人口的迁移集中必然伴随着城市经济活动的集中和能源消费的增长等。图7为1981—2016年太原

表 2 1981—2016 年太原城市化发展指数与短时暴雨频次的相关系数

Tab.2 The correlation coefficient between the occurrence frequency of short-time rainstorm and urbanization development index of Taiyuan during 1981-2016

城市发展指数	相关系数
城市化率	0.2942
地区 GDP	0.3404
城市用电量	0.3020
住宅竣工面积	0.3828
民用汽车拥有量	0.3436

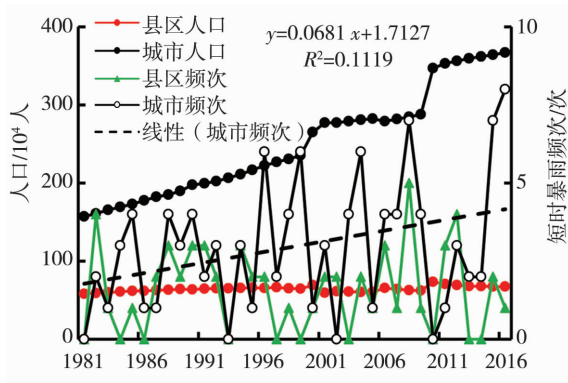


图 7 1981—2016 年太原区域人口与短时暴雨频次的年变化

Fig.7 The annual variation of regional population and occurrence frequency of short-time rainstorm in Taiyuan during 1981-2016

区域人口与短时暴雨频次的年变化。可以看出,36 a 来,太原不同区域人口与短时暴雨频次变化趋势相同。城市人口持续增加,城区短时暴雨频次呈明显增加趋势,变化趋势为 $0.68 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,且通过 0.05 的显著性检验;县区人口增长缓慢(清除受当地人类活动影响较大,不加入统计),短时暴雨频次无明显上升趋势。说明城市化发展有使城区对流暴雨增多、雨强增大的作用。

4.2.3 城市空间扩大与短时暴雨的关系

城市住宅竣工面积的增加包括两方面,一是建成区面积的扩大,二是建筑物高度的升高。城市在这两个方向上的变化使城市“冠层”的高度和表面积加大,对热岛效应产生较大影响,并通过边界层稳定度的变化对降水产生影响。图 8 为 1981—2016 年太原市住宅竣工面积与短时暴雨频次的关系,可以看出,二者线性相关通过了 0.05 的显著性检验。

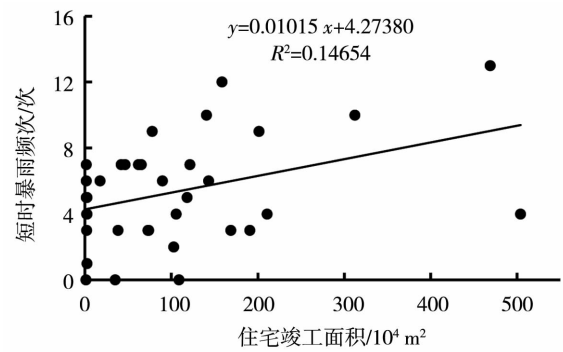


图 8 1981—2016 年太原住宅竣工面积与短时暴雨频次的关系

Fig.8 The correlation between residential completed area and occurrence frequency of short-time rainstorm in Taiyuan during 1981-2016

5 城市化对太原暴雨影响机制

5.1 热岛环流特征及对边界层热力稳定度的影响

5.1.1 扰动量相互作用的影响

假设城市热岛在一定高度内不存在明显的水平变化,扰动风场为均匀分布,由公式(3)求解可得:

$$\frac{\partial \theta'}{\partial z} = \frac{V_z}{k} u' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + e^{\frac{V_z}{k} w'} \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial \theta'}{\partial z}$ 为城市边界层热力扰动稳定度; $\frac{V_z}{k} u' \frac{\partial \theta'}{\partial x}$

反映热岛水平扰动气流、扰动温度梯度对 $\frac{\partial \theta'}{\partial z}$ 的影响; $e^{\frac{V_z}{k} w'}$ 反映的是热岛垂直扰动气流对稳定度的影响。

城市热岛的存在使上游低层冷的扰动气流流向城区, $\frac{\partial \theta'}{\partial x} > 0, u' > 0$; 下游则相反, $\frac{\partial \theta'}{\partial x} < 0, u' < 0$, 热岛区域内的空气因辐合上升到达一定高度 (V_z) 后向冷区辐散,使上、下游 $\frac{\partial \theta'}{\partial z} > 0$ 层结趋于稳定; 热岛中心的区域 $u' \approx 0, \frac{\partial \theta'}{\partial x} \approx 0$, 对层结稳定度影响很小。

而 $e^{\frac{V_z}{k} w'}$ 恒为正值,总是使层结趋于稳定。说明,城市热岛产生的热力扰动有利于城区及上、下游的边界层层结趋于稳定,但城区较郊县区弱;夏季午后,中心城区的上升运动可能触发对流降水,但层结不稳定将很快趋于减弱,这可能是太原中心城区短时强降水多发的原因之一。

5.1.2 平均扰动温度与平均气流相互作用的影响

为讨论热岛环流的平均影响,取 x 轴沿平均气流(盛行风)方向,对式(4)各项取时间平均,并假设 $\overline{u'} \approx 0, \overline{w'} \approx 0$ 且 $\overline{w} \neq 0$, 得到:

$$\frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial z} = -\frac{\bar{u}}{\bar{w}} \frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial x} \quad (6)$$

$\frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial z}$ 为城市边界层平均热力扰动稳定度。公式

(6)描述平均热力扰动稳定度与平均气流、平均水平扰动温度之间的关系。①当 $\bar{w} > 0$,天气形势背景为上升运动,若水平环境风上游为冷平流, $\bar{u} > 0$, $\frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial x} > 0$,则 $\frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial z} < 0$,即将造成平均热力扰动层趋于不稳定;下游为暖平流, $\bar{u} > 0$, $\frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial x} < 0$, $\frac{\overline{\partial\theta'}}{\partial z} > 0$,平均扰动层结趋于稳定。②当 $\bar{w} < 0$,天气形势背景为下沉运动,上游为冷平流,平均热力扰动层结趋于稳定;下游为暖平流,趋于不稳定。

5.1.3 平均扰动气流与环境平均温度相互作用的影响

取 x 轴沿边界层天气尺度环境风场方向,并假设 $\bar{u} \cong 0$, $\bar{w} \cong 0$ 且 $\bar{w}' \neq 0$;对(4)式各项取时间平均还可得到:

$$\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial z} = -\frac{\bar{u}'}{\bar{w}'} \frac{\overline{\partial\theta}}{\partial x} \quad (7)$$

$\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial z}$ 为边界层平均热力稳定度,公式(7)描述边界层平均热力稳定度与平均扰动气流、环境平均水平温度间的关系。

①当 $\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial x} > 0$,在边界层内,城区位于冷区前,城市上游 $\bar{u}' > 0$, $\bar{w}' < 0$, $\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial z} > 0$;城市下游 $\bar{u}' < 0$, $\bar{w}' < 0$, $\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial z} < 0$;即当城区位于冷槽前时,热岛环流与较大尺度环流背景温度场的作用,在城市上游边界层平均热力稳定度增加,下游不稳定程度增加。②当 $\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial x} < 0$,在边界层内,城区位于暖区前,城市上游 $\bar{u}' > 0$, $\bar{w}' < 0$, $\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial z} < 0$;城市下游 $\bar{u}' < 0$, $\bar{w}' < 0$, $\frac{\overline{\partial\theta}}{\partial z} > 0$;即当城区位于暖脊前时,上游边界层平均热力稳定度减小,下游平均热力稳定程度增加。

太原地区出现大雨以上量级的降水时,边界层盛行偏东风;暴雨日,太原大多处于副高西北部与低槽(涡)前的偏南暖湿气流中,天气形势背景为上升运动。应用公式(6)第①种情况与公式(7)第②种情况可知,平均扰动场与平均环境场相互作用的结果使得边界层平均热力稳定度在上游(东部)减小、下游(西部)增加,城区东部边界层内呈现不稳定发展,较西部易发生对流性强降水。

5.2 影响机制分析

(1)城市化形成的城市热岛,一方面使城市高低空温差加大,形成热力层结不稳定;城乡扰动温度差与扰动气流相互作用,使城区边界层扰动稳定度较郊区低,热力强迫产生的中尺度热低压或边界层辐合线,在夏季可能造成较强的上升运动,触发对流性降水,但上升运动将同时使得中心城区不稳定层结很快趋于减弱,故当水汽条件较好时,中心城区易产生短时暴雨和较大的雨强。另一方面,在天气背景为上升运动时,边界层平均扰动温度与环境流场(盛行风)相互作用,使得边界层平均热力扰动稳定度在城区东部减小、西部增加;当城区位于低槽(涡)前暖平流区时,平均扰动气流和环境平均水平温度相互作用使得边界层平均热力稳定度在上游(东部)减小、下游(西部)增加;二者均使得东部边界层内不稳定发展,因而,太原城区东部较西部易发生对流降水,降水强度更大;同时,太原三面环山的特殊地形结构增大了城区与山区间的温度梯度,处于盛行风(偏东风)上游的东部,较强的温度梯度有利于中心城区以东边界层中尺度辐合和垂直风切变的加强,更易于强对流的触发和维持,增大降水强度,致使城区东、西部短时暴雨和雨强出现了截然不同的分布。(2)城市摩擦效应通过影响系统移速增大了城区暴雨发生概率。城市高度不一的建筑加大了下垫面粗糙度,使得摩擦系数增大;大量的人为热源易在城区产生热湍流,使得移向城区的天气系统移速减慢,在城区滞留时间加长,城区降雨时间延长,加大了暴雨天气发生的概率。(3)凝结核效应。城区大气中多细小颗粒物和 SO_2 等气体,这些含硝酸盐和硫酸盐类的物质,在水汽丰沛的情况下易吸收水汽成为凝结核,可起到强化成雨机制、增加雨量的作用^[20]。

6 结论

(1)近36 a来太原暴雨具有明显的局地性和年代际变化特征。单站暴雨占总暴雨日数的61.4%,1990年代较1980年代局地暴雨增加较快;1990年代中期以后,区域暴雨快速增多,暴雨出现范围扩大。1980—2010年代,城区暴雨明显多于县区,且降水时间更集中,对流性更强;区域暴雨过程中,城区降水量较县区大,暴雨的极端性不断增强。

(2)城市化环境下,5—9月,太原中南部河谷平原呈现“暖”、“干”化特征,北、中、南部分别出现了一个热岛和干岛;城区东部雨强大、短时暴雨多,西部雨强小、短时暴雨少。中心城区是最强的城市热

岛,中心气温偏高 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;也是最明显的城市干岛,干岛中心降水量偏少 30% ;还是城区中短时暴雨易发区和雨强增加最显著的区域。

(3)近36 a来,城市化对太原短时暴雨变化影响较大。地区GDP、住宅竣工面积、民用汽车拥有量等城市发展指数与短时暴雨频次呈显著正相关;城市人口的增长和城市空间的扩大使暴雨显著增多。

(4)城市化造成的热岛效应,扰动量相互作用总是使城市边界层层结趋于稳定,中心城区热力强迫产生的较强上升运动在触发对流性降水的同时也将使不稳定层结快速趋于减弱,这可能是中心城区短时暴雨多发的原因之一。当太原位于槽前偏南暖湿气流中,天气背景为上升运动时,平均扰动场与环境场相互作用,使得边界层热力稳定度在城区上游(东部)减小,下游(西部)增加,太原三面环山的地形结构强化了城郊区间的温度梯度,加强了边界层的中尺度辐合和垂直风切变,利于强对流的触发与维持,是夏季最大雨强与短时暴雨在太原城区东、西部不同分布的主要原因。城市化产生的摩擦效应,通过延长天气系统滞留时间,增大了城区暴雨发生概率。

参考文献:

- [1] 寿亦萱,张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报,2012,70(3):338-353.
- [2] 蒋维楣,陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究[J]. 大气科学,2007,31(1):37-47.
- [3] 董春卿,郭媛媛,赵桂香,等. 太原城市下垫面扩张对边界层特征影响的个例研究[J]. 干旱气象,2014,32(6):916-925.
- [4] 王建鹏,薛春芳,黄少妮,等. 城市化及人为热对西安市气象要素影响差异敏感性分析[J]. 干旱气象,2015,33(3):434-443.
- [5] 朱家其,汤绪,江灏. 上海市城区气温变化及城市热岛[J]. 高原气象,2006,25(6):1154-1160.
- [6] 陈燕,蒋维楣,吴润,等. 利用区域边界层模式对杭州市热岛的模拟研究[J]. 高原气象,2004,23(4):519-528.
- [7] 李艳红,李智才,周晋红,等. 基于自动站资料的太原城市热岛研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(12):173-179.
- [8] HUFF F A, CHANGNON S A. Climatologically assessment of urban effects on precipitation at St. Louis[J]. Journal of Applied Meteorology, 1972,11(5):823-842.
- [9] CHANGNON S A. Rainfall changes in summer caused by St. Louis [J]. Science, 1979,205(4404):402-404.
- [10] CHANGNON S A, SHEALY R T, SCOTT R W. Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis[J]. Journal of Applied Meteorology, 1991,30(1):126-134.
- [11] SHEPHERD J M, PIERCE H, NEGRI A J. Rainfall modification by major urban areas; observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002,41(7):689-701.
- [12] SHEPHERD J M. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes[J]. Journal of Arid Environments, 2006,67(4):607-628.
- [13] 王建鹏,孙继松,王式功,等. 盆地地形下西安城市热岛效应对周边降水的影响[J]. 干旱气象,2011,29(2):168-173.
- [14] 刘熙明,胡非,李磊,等. 北京地区夏季城市气候趋势和环境效益的分析研究[J]. 地球物理学报,2006,49(3):690-697.
- [15] 赵娜,刘树华,虞海燕. 近48 a城市化发展对北京区域气候的影响分析[J]. 大气科学,2011,35(2):373-385.
- [16] 郑思轶,刘树华. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响[J]. 气候与环境研究,2008,13(2):1249-1329.
- [17] 赵彩萍,荆肖军,李艳红,等. 城市暴雨内涝预报研究[J]. 科技情报开发与经济,2008,18(29):114-116,121.
- [18] 王建鹏,孙继松,王式功,等. 热岛效应造成的城市边界层热力稳定度变化及其对降水的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(4):2280-2283,2372.
- [19] 孙继松,舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学,2007,31(2):311-320.
- [20] 杨士弘,廖重斌,郑宗清. 城市生态环境学[M]. 北京:科学出版社,1997.

Influence of Urbanization on the Change of Rainstorm in Taiyuan

ZHAO Caiping, ZHOU Jinhong, LI Zhaoqi, LI Yanhong

(*Taiyuan Meteorological Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 030082, China*)

Abstract: The relationship between urbanization and spatial – temporal distribution of rainstorms, and effect of urbanization on variation characteristics of heavy rain in Taiyuan were studied based on urbanization factors and precipitation data of 7 national meteorological stations in Taiyuan from 1981 to 2016, and temperature, precipitation data of 59 regional meteorological stations in Taiyuan during 2008 – 2015. The results are as follows: (1) There was obvious local and inter – decadal characteristics of heavy rain in Taiyuan in recent 36 years. Rainstorm days at single station in Taiyuan accounted for 61.4 percent of total rainstorm days. The number of local rainstorms increased rapidly in the 1990s compared with the 1980s. While after the mid of 1990s, the regional rainstorm days increased rapidly, and the scope expanded. During 1980 – 2010, rainstorm days in urban were more than those in counties, precipitation time was more concentrated, and there was obvious difference of heavy rainfall between the western and eastern in urban areas. (2) There was obviously positive correlation between each development index of urbanization and short term rainstorm, while urban population growth and expansion of space made rainstorms increase dramatically. (3) Urbanization made city center become apparently heat island, and increased temperature gradient between city and county area. The existence of urban heat island made the atmospheric stratification more unstable in central urban than that in other areas. Meso – scale thermal low pressure or boundary layer convergence line generated by thermal forcing were in favor of triggering convection. So it was easy to produce short – term rainstorm and heavy rainfall. Moreover, under the synoptic scale background, the mean turbulence field of the heat island made average thermodynamic stability of boundary layer decrease in the east, while increase in the west of Taiyuan, which was interacted with easterly winds (prevailing wind). The topographic structure surrounded by mountains on three sides in Taiyuan made the temperature gradient between city and mountain area increase, and enhance rain intensity in the eastern part of the city area, and more prone to short term rainstorms. The effect of urban friction make the probability of heavy rain increase by prolonging stay time of weather systems in urban area.

Key words: urbanization; rainstorm; change; influence

~~~~~

(上接第 108 页)

## The Circulation Classification and Characteristics of Heavy Rainfall in Gannan Plateau

WANG Chengfu<sup>1</sup>, XIE Rui<sup>2</sup>, JI Zhejun<sup>1</sup>, AO Zejian<sup>1</sup>,

LUO Wangjun<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>1</sup>, WEI Juanjuan<sup>1</sup>, JIN Manhui<sup>1</sup>

(1. *Gannan Meteorological Bureau of Gansu Province, Hezuo 747000, Gansu, China*;  
2. *Tianshui Meteorological Bureau of Gansu Province, Tianshui 741000, Gansu, China*)

**Abstract:** Total 53 heavy rainfall events were identified by historical hourly precipitation from 181 regional stations and automatic meteorological stations over Gannan Plateau during 2013 – 2016. Corresponding synoptic characteristics were analyzed and extracted from the satellite imagery, radar observation and historical weather data. The results show that heavy rainfall always occurred during the rainy season, especially in July and August. The synoptic situations of heavy rainfall were mainly divided into five patterns including west wind trough, subtropical high – pressure borderline, strong shear in low vortex, wind shear between two high systems and wind shear in high systems, but the westerly trough was dominant. The emphasis of the prediction procedure of heavy rainfall was different among these five synoptic conditions. Under the situation of westerly trough, contribution of large – scale environment played an important role. The precipitation could last long time with weak intensity (less than  $15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ). However, forecast about subtropical high – pressure borderline, strong shear in low vortex, wind shear between two high systems should be focused on the prediction of short – term heavy precipitation over the plateau. The real – time observation of short – term heavy rainfall could provide an important basis for the prediction of these three types of extreme rain events.

**Key words:** Gannan plateau; heavy rainfall; conceptual model; satellite imagery; radar