

doi: 10.6046/gtzyyg.2017.01.27

引用格式: 孟丹, 宫辉力, 李小娟, 等. 北京7·21暴雨时空分布特征及热岛-雨岛响应关系[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 178-185. (Meng D, Gong H L, Li X J, et al. Spatiotemporal distribution of the rainstorm and the relationship between urban heat island and urban rain island in Beijing on July 21, 2012[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(1): 178-185.)

北京7·21暴雨时空分布特征及热岛-雨岛响应关系

孟丹¹⁻⁵, 宫辉力¹⁻⁵, 李小娟¹⁻⁵, 杨思遥¹⁻⁵

(1. 水资源安全北京实验室, 北京 100048; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048; 4. 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 5. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 以新中国成立以来北京地区发生单日最大降雨的2012年“北京7·21暴雨事件”作为研究对象, 采用热带降雨观测计划(tropical rainfall measuring mission, TRMM)降雨数据、气象观测降雨数据和中分辨率成像光谱仪(MODIS)的地表温度(land surface temperature, LST)产品, 利用空间插值、空间降尺度、精度评价及相关分析等方法分析北京7月21日暴雨的时空分布特点, 定量研究城市“热岛-雨岛”时空响应关系。结果表明: 从空间分布来看, 强降雨发生北京南部; 从TRMM的3h降雨数据来看, 随着时间推移最强雨带自西向东推进; 经气象数据验证, 降尺度的TRMM 3B42数据精度有所提高; LST对暴雨的影响表明热岛与雨岛在空间分布上存在一致性, 且在雨强最大时段两者相关性最好。

关键词: 城市热岛; 城市雨岛; 热带降雨观测计划(TRMM); 中分辨率成像光谱仪(MODIS); 地表温度(LST)

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2017)01-0178-08

0 引言

近年来, 随着大城市的不断扩容, 百年一遇的暴雨连续发生, 城市内涝成为城市管理最薄弱的环节之一。城市规模及范围的扩大改变了地区气温和大气环流, 城市热岛效应和高空快速气流形成明显的温度和气压差异, 造成极端暴雨事件, 城市内涝频发。2007年7月17日, 重庆市受暴雨袭击, 那场115 a一遇的暴雨造成42人死亡, 12人失踪, 直接经济损失27亿元。1 d后, 济南市又遭厄运, 34人在暴雨中遇难。2010年5月7日凌晨, 广州市遭遇50 a一遇的大雨。2011年6月18日, 武汉市遭受强降雨, 6月23日北京1 h的降雨量达到128 mm, 超百年一遇。2012年7月21日10:00开始北京市自西向东出现了强降雨。监测数据显示, 截止到7月22日6:00, 全市平均降雨量170 mm, 城区平均降雨量215 mm, 最大降雨量出现在房山河北镇, 达460 mm, 突破历史纪录, 为新中国成立以来最大一次降雨过程。截至7月22日17:00, 北京市因这次

暴雨死亡37人。

早在2003年, 美国宇航局戈达德航天飞行中心Shepherd博士就发表论文称, 城市热岛效应是引起可观测降水异常的主要因素^[1]。周淑贞^[2]研究上海城市气候提取“五岛”效应, 这“五岛”之间存在着紧密的相互制约关系。城市热岛强, 能促使城区相对湿度降低, 夜间凝露量减小, 有利于干岛、湿岛的昼夜交替。热岛辐合气流和热力湍流有助于城区低云量的增多, 并能诱导对流雨在城区增幅, 对混浊岛和雨岛的形成较为有利。掌握城市气候中的“五岛”效应, 对城市的防暑降温、汛期排涝和大气污染的防治等都有重要的指导作用^[3]。张富国等^[4]也早在1991年就对北京城区的“雨岛”“湿岛”“干岛”特征进行分析, 得出干、湿岛现象并非由于降水差异而形成, 而与城区下垫面结构与性质密切相关, 与水体面积、热岛强度有直接关系。乔林认为, 城市化导致的热岛效应也是加大雨量的因素之一, 北京作为人口超过2 000万的特大城市, 城市热岛效应显著, 在2012年北京7月21日降雨过程中, 正是由于地面热力大, 产生对流运动, 使得云系不断地新生和发

收稿日期: 2015-07-29; 修订日期: 2015-09-20

基金项目: 北京市教育委员会科技计划面上项目“北京地区热力景观驱动机制及情景模拟”(编号: 01310028011)资助。

第一作者: 孟丹(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事遥感与GIS在资源环境方面的应用研究。Email: mengd811@gmail.com。

通信作者: 李小娟(1965-), 女, 教授, 博导, 主要从事资源环境遥感监测与时态GIS设计开发等方面的研究。Email: xiaojuanli@vip.sina.com。

展,加大了降雨强度^[5]。郑祚芳等^[6]分析了北京地区降水的大尺度变化趋势及局地降水的城市效应特征,得出城市化缓慢期城市对降水影响不明显,而快速发展期则表现出显著的雨岛效应,城市化不仅使雨岛效应增强,还对城市下风向降水有一定影响。越来越多的研究表明,城市热岛效应不仅造成城市及其周边地区气温升高,还可能通过流场作用,对降水过程产生影响。

本文选取典型大都市北京在新中国成立以来最大一次降雨过程发生日2012年7月21日的降雨情况作为研究对象(以下简称“北京7·21暴雨”),由于暴雨当天无法利用热红外遥感影像获取地表温度,并且暴雨对地表降温作用十分显著,所以选取暴雨前的地表温度与暴雨当天的降雨量作为数据源,探讨城市热岛-雨岛时空响应关系,为城市雨-热关系研究提供借鉴。

1 研究区概况

北京地形西北高,东南低。西部为西山,属太行山脉;北部和东北部为军都山,属燕山山脉。北京属典型的北温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春秋短促。全年无霜期180~200 d。1955—1975年的年平均降雨是680 mm。降水季节分配很不均匀,全年降水的80%集中在夏季6—8月份。

随着北京城市化的迅速发展,城市规模不断扩大,从而出现了以城市化为主要特征的大规模土地利用/覆盖变化。与此同时,随着国民经济的快速发展,工商企业、各种机动车辆的增多以及冬季取暖、夏季空调降温的需要,耗费的能源也日渐增多,所排放的人为热量也迅速增加。

2 数据源及其预处理

2.1 TRMM 数据

热带降雨观测计划(tropical rainfall measuring mission, TRMM)是由美国国家宇航局和日本国家空间发展局共同研制,于1997年成功发射的第一颗专门用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫星。TRMM数据应用范围趋于多元化,包括水文过程模拟、降雨分布的特征分析、天气过程分析、潜热分析以及流域旱涝分析与侵蚀力计算等^[7-13]。

TRMM 3B42 V7降雨数据空间范围为 $S50^{\circ} \sim N50^{\circ}$, $W180^{\circ} \sim E180^{\circ}$,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为3 h。3B42融合了多个微波遥感数

据,数据质量高于以往数据产品,从而被推荐为科学研究的数据产品^[14]。骆三等^[15]采用中国673个气象站逐6 h降水资料检验同期TRMM测雨产品3B42的精度,得出了卫星资料日平均降水和降水频率空间分布与台站资料非常类似的结论,相关系数分别达到0.79和0.84,说明TRMM数据具备一定准确性与可靠性。

本文采用的TRMM降雨数据为2012年7月21日3B42 V7数据产品,日降雨量由3 h降雨强度数据计算得到。

2.2 MODIS 地表温度数据

本文所选用的遥感影像数据是MYD11A1, MYD11A2的日地表温度(land surface temperature, LST)及8 d合成LST数据集,8 d合成数据有效地减少了LST数据的系统噪声,消除了云、大气、太阳高度角等的部分干扰,可保证数据质量,空间分辨率为1 km。由于暴雨发生在2012年7月21日,为研究地表温度对暴雨的影响,选用2012年7月11—18日的8 d合成LST数据产品,代表暴雨前研究区地表温度状况。数据来源于美国USGS数据中心。

利用ENVI插件Modis_conversion_toolkit处理工具对MODIS数据进行子集提取、图像镶嵌、数据格式转换和投影转换等预处理步骤(投影坐标为WGS_1984_UTM_Zone_50N)。

2.3 气象站观测数据

降水数据来自北京20个常规气象观测站的地面气象观测资料。利用ArcGIS的Geostatistical Analyst模块对降水数据进行克里金插值,像元大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,采用UTM投影。

2.4 DEM 数据

DEM数据采用SRTM(shuttle radar topography mission)的90 m分辨率数据,为与其他数据匹配,重采样至1 km,并由DEM数据计算了坡度和坡向。

3 研究方法

3.1 TRMM 降雨资料的降尺度及精度评价

统计降尺度方法的基本原理为:采用统计经验方法建立大尺度气象变量与区域气象变量之间的线性或非线性关系,通过在不同尺度影像之间建立基于某一特征量的函数关系,从而针对栅格影像进行尺度转换分析。基于上述统计降尺度原理,参照马金辉等^[16]的降尺度方法,得到最终的降尺度降水量数据。采用线性判定系数(R^2)来评价TRMM降水量与站点观测值的线性拟合优度,并采用均方根误差(RMSE)来评价TRMM降水量与站点观测值的偏

差大小,即

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (2)$$

式中: Y_i 为线性拟合值; \bar{y} 为观测平均值; y_i 为观测值; x_i 为 TRMM 降水估计值; n 为对比记录总数。

3.2 热岛 - 雨岛关系研究

在对 TRMM 降尺度分析的基础上,选取不同尺度下(原始尺度及降尺度)的 TRMM 数据(日降雨数据和 3 h 降雨数据)分别与 MODIS 的 LST 数据(8 d 合成 LST 及地表温度分级数据)做相关分析,探究降雨 - 温度两者在时空序列的响应关系。由于在限定的研究区内,高温区域对应热岛区域,降雨量高值区域对应雨岛区域,所以在本研究中热岛、雨岛分别代表高温区和降雨量高值区。

4 结果与分析

4.1 北京 7·21 暴雨时空分布特征分析

4.1.1 北京 7·21 暴雨总降雨量空间分布特征

利用气象数据采用克里金插值方法得到的北京 7·21 降雨量分布和利用 TRMM 数据得到的分布图如图 1 所示。由图可知,降雨量在 100 mm 以上的面积约占北京市总面积的 80%,超过 200 mm 的地区大多位于北京南部,包括房山、大兴、城近郊区、城区以及平谷和顺义。全市降雨量最大点位于房山

区,城近郊区降雨量最大点位于石景山区。以房山区霞云岭气象站为例,降雨从 10:00 开始,18:00 结束,历时 9 h,单小时最大降雨发生在 16:00,累计降雨量接近 400 mm。

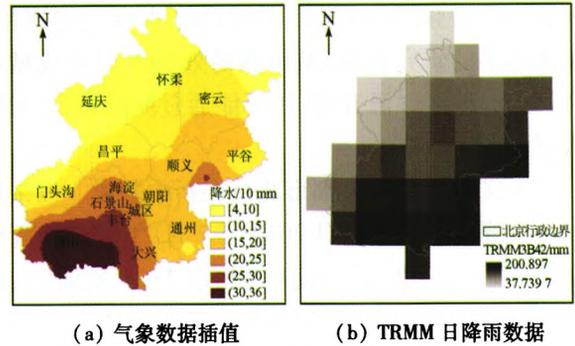


图 1 北京 7·21 暴雨降雨量分布
Fig.1 Distribution of precipitation on July 21 in Beijing

TRMM 数据全天降雨量范围 37.73 ~ 200.90 mm,在数值上整体低于气象插值的降雨量(范围是 40.03 ~ 363.5 mm)。原因在于气象插值降雨量数据源是单点的气象观测数据,而 TRMM 数据空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,对极值数据起到了平滑作用。但整体降雨量分布特征与气象插值结果一致,可反映出不同区域降雨量的差异。降雨量在西北山区较小,延庆、怀柔北部降雨量最低,在东南平原较大,最大降雨量出现在房山南部。全天降雨量的空间分布主要呈从南向北递减的趋势。

4.1.2 基于 TRMM 数据的 3 h 降雨分析

北京 7·21 暴雨主要集中在上午 10:00—次日 2:00^[17],结合 TRMM 降雨监测数据,选取 2012 年 7 月 21 日的中心时间分别是 11:00, 14:00, 17:00, 20:00, 23:00 以及次日 2:00 的 TRMM 3B42 V7 3 h 降雨数据分析整个降雨过程(图 2)。

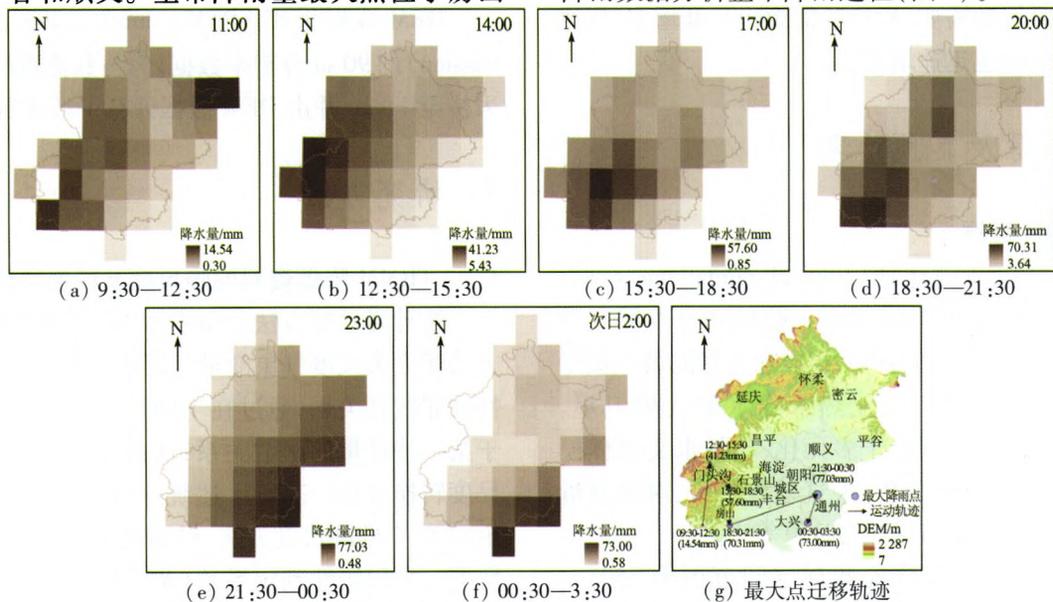


图 2 北京 7·21 暴雨 TRMM 3 h 总降雨量分布及最大点迁移轨迹

Fig.2 Distribution of precipitation by TRMM data interpolation on July 21 migration route of the maximum point

从图 2(a)–(f)可知: 11:00 前后北京范围内整体雨量较小,仅房山西部和密云东部降雨量相对较大,雨量最大值为 14.54 mm; 14:00 前后雨量明显增大,最大降雨点移至门头沟,降雨主要集中在北京西部山区; 17:00 前后雨量进一步增大,最大降雨点仍位于北京西南部; 此后雨团向东北方向移动,最大雨量持续超过 70 mm; 20:00 前后降雨中心较分散,降雨量整体增大; 23:00 前后雨带整体向北京东南方向移动,呈自东南向西北雨量递减的趋势; 至次日 2:00 前后,降雨逐渐移出北京,最大雨量点位于北京东南部。

从 TRMM 3 h 降雨量最大点迁移轨迹(图 2(g))可明显看出雨带呈自西向东的推进过程。

4.2 TRMM 数据精度分析及降尺度

4.2.1 TRMM 降尺度数据结果

通过 SPSS 软件,建立多元线性回归方程,即

$$P = F(X, Y, Z, S, A) + \varepsilon, \quad (3)$$

式中: P 为降雨量; X, Y, Z, S, A 依次为横纵坐标、高程、坡度、坡向; ε 为残差。

北京 7 月 21 日降雨数据降尺度分析结果如图 3 所示。

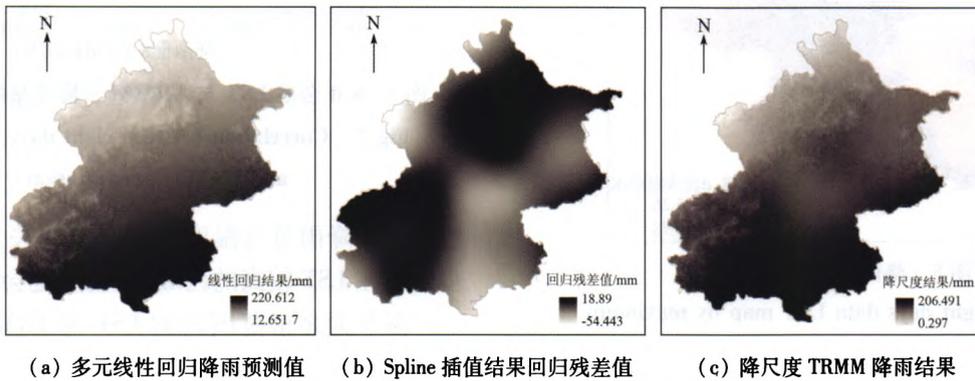


图 3 北京 7·21 暴雨 TRMM 降尺度降雨数据

Fig. 3 Downscaling TRMM precipitation data on July 21

图 3(a)为 SPSS 多元线性回归得到的降雨量,线性回归预测结果与原 TRMM 数据之间的判定系数 R^2 为 0.890 1,线性回归的预测结果与原数据有较大相关性,但依然存在残差。采用马金辉^[16]的降尺度方法,使用样条函数方法对残差数据进行空间插值,回归残差如图 3(b)所示。去除残差后的降尺度最终结果如图 3(c)所示,降尺度的 TRMM 数据

空间分辨率有所提升,便于后续与 MODIS 数据进行热岛-雨岛的相关分析。

4.2.2 气象站数据对 TRMM 数据的精度评价

为检验 TRMM 数据精度,选用区域内 20 个常规气象站日降雨量数据,分别与原始 TRMM 及降尺度后 1 km 空间分辨率的 TRMM 数据进行回归,得到一元线性回归方程及判定系数 R^2 (图 4)。

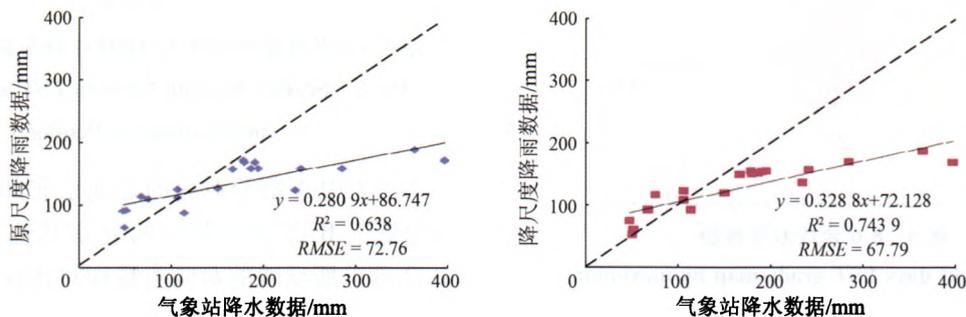


图 4 气象站数据与 TRMM 数据相关分析

Fig. 4 Correlation between the meteorological data and the TRMM precipitation

TRMM 降雨量与气象数据的降雨量呈正相关,但是 TRMM 降雨量明显低于气象观测的降雨量。原尺度两者差值的 $RMSE$ 为 72.76,判定系数 R^2 为 0.638; 降尺度后两者差值的 $RMSE$ 为 67.79,判定系数 R^2 为 0.744。通过降尺度,TRMM 数据与气象站点观测数据相关性有所提高,且 $RMSE$ 降低,提高

了 TRMM 数据的精度。因此在后续的热岛-雨岛相关关系分析中选用降尺度后的 TRMM 数据。

就 TRMM 月降雨数据的精度评价而言,本研究精度并不高,这与 Duan^[18]发现“黑海地区 3B43 月尺度数据精度远高于 3B42 日尺度数据”的结论一致。原因可能在于日降雨数据,时间跨度比较小,所

测得的日降雨量数据会比整月累加的降雨量数据误差要大。

4.3 热岛 - 雨岛的相关分析

4.3.1 LST 空间分布及城市热岛分析

MODIS 地表温度数据选用暴雨前 8 d 合成 LST (图 5), 代表北京市 7·21 降雨前的地表温度状况。

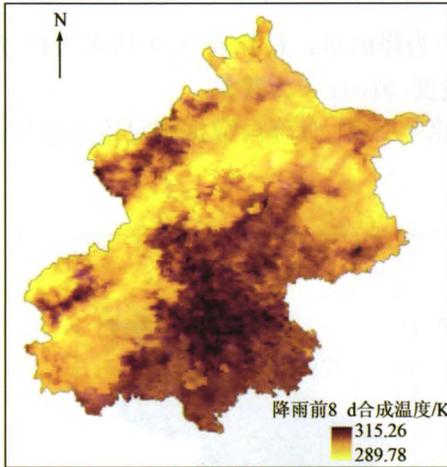


图 5 降雨前 8 d 合成 LST

Fig. 5 Eight days data LST map by maximum value composite before the rainstorm

将 8 d 合成 LST 数据按自然断点分类法划分为 5 个温度等级(图 6), 温度等级越高的区域 LST 越高。

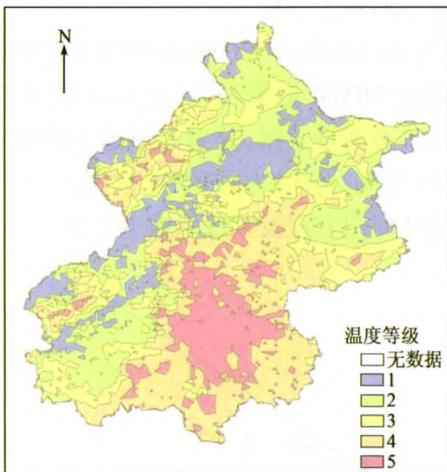


图 6 8 d 合成温度等级

Fig. 6 Eight days LST grade map by maximum value composite

对地表温度分级可平滑原始数据的波动, 虽然分级后的温度信息没有原始 LST 信息丰富, 但能更好地表现温度空间分布整体趋势。城郊区之间存在比较大的温度差, 可见在北京市存在明显的城市热岛效应。而且此次降雨前期, 天气状况比较平稳, 无大风或大雨天气, 使得城市热岛效应更加明显。城市热岛现象在城郊之间形成的水平温度梯度可导致在迎风坡产生中尺度垂直切变, 促进降雨的发

展^[19]。

4.3.2 LST 与 TRMM 降雨数据相关分析

在 ArcGIS 软件中选取北京范围内 100 个随机点, 初步判断 8 d 合成 LST 与降尺度 TRMM 日降雨量数据的相关性(图 7)。

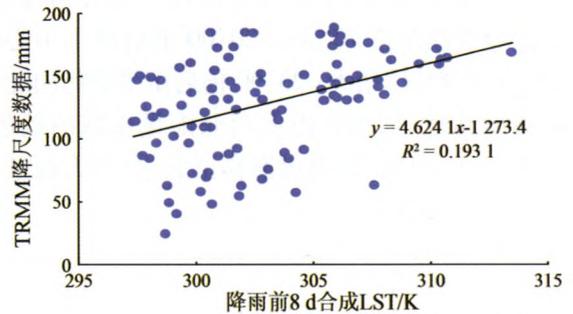


图 7 8 d 合成 LST 与 TRMM 日降雨量的相关分析

Fig. 7 Correlation between eight days data LST and TRMM precipitation

可见降雨量与温度之间呈正相关关系, 可以初步判定在 LST 较高的区域, 降雨量也会随之增高。

图 8 为北京范围内的 LST 与 TRMM 降尺度数据散点图。

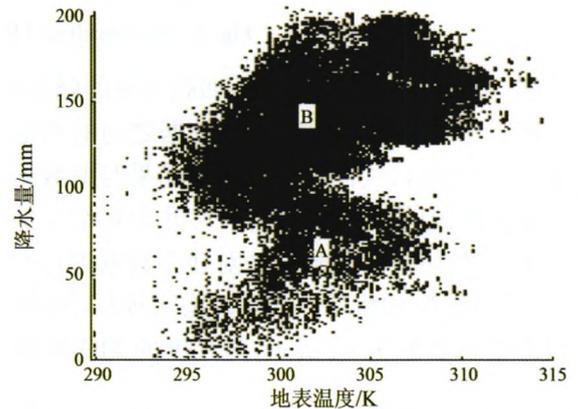


图 8 北京范围内 LST 与 TRMM 降雨量数据散点图

Fig. 8 Scatter diagram between LST and TRMM precipitation in Beijing

图 8 中 A 部分对应的是北京北部山区, 降雨量普遍低于 B 部分所对应的北京其他区域, 可以看出, 2 部分所反映的对应关系相对比较独立, 但总体上降雨量会随着 LST 的增加而增大。

具体判断 TRMM 3 h 降雨数据与降雨前 LST 的相关性, 选取原始 TRMM 数据的栅格中心点, 对 3 h 降雨量与降雨前的 LST 进行相关分析。结果显示不同时段降雨量与 LST 相关性的差异较大, 在降雨初期由于雨团主要集中在北京西部, 降雨量与 LST 相关性很低, 随着降雨影响范围的扩大, 在 23:00 降雨量达到最大, 同时降雨量与降雨前 LST 相关性最高(图 9)。

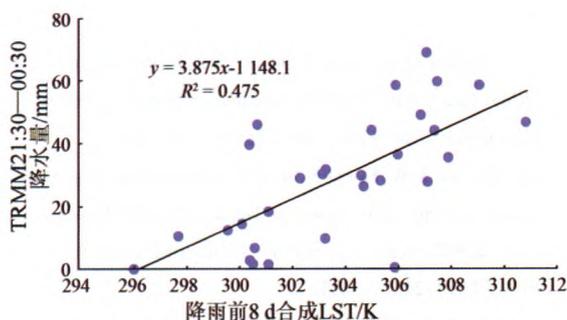


图 9 23:00 降雨量与 8 d 合成 LST 相关分析

Fig. 9 Correlation between precipitation and eight days data LST on around 23:00

23:00 降雨量与 LST 的判定系数 R^2 为 0.475, 高于日降雨量与 LST 的相关性, 而后随着雨强减弱, 两者相关性也减弱。总的来说, 降雨量与 LST 的相关性在短时强降雨期间达到最大, 而雨强较低时, 雨岛的空间分布与热岛的关系并不密切。

4.3.3 LST 与 TRMM 降雨量相关分析

城市热岛造成了不同区域 LST 的差异, 按照温度等级划分结果, 统计每个温度等级地区的 TRMM 数据 7 月 21 日降雨及 3 h 降雨均值, 并计算温度等级与降雨量的决定系数 R^2 (表 1, 图 10)。

表 1 不同温度等级对应的平均降水量及两者的决定系数

Tab. 1 Average precipitation in different LST grade and R^2

降水时间段 温度等级	2012 年 7 月 21 日						
	日降水量/mm	3 h 降水均值(中心时间)/(mm·h ⁻¹)					
1	106.81	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00	次日 02:00
2	120.63	2.04	8.07	7.22	10.06	5.98	1.48
3	126.23	2.19	7.44	8.56	10.92	7.02	1.77
4	152.13	2.12	7.17	8.13	10.38	8.27	2.19
5	153.39	1.77	6.16	8.37	10.57	13.57	6.17
R^2	0.936	(-) ^① 0.574	(-)0.913	0.713	0.161	0.916	0.774

①(-)表示该 R 值为负数。

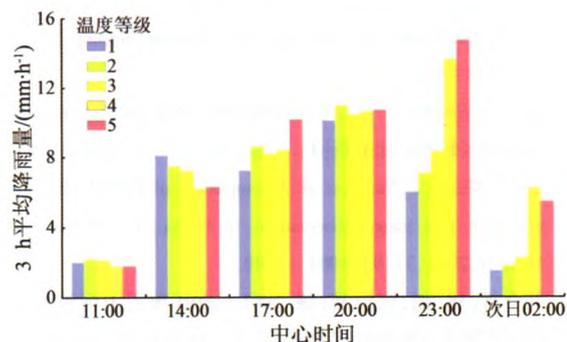


图 10 不同温度等级对应的 3 h 平均降水量

Fig. 10 Average precipitation per three hours in different LST grade

总体上, 随着温度增加, 温度等级升高, 降雨量增加。TRMM 日降雨数据与温度等级的相关性较高, 决定系数为 0.936, 但是 TRMM 3 h 数据与温度的相关性不稳定。从表 1 可知, 降雨初期的 11:00 和 14:00 出现降雨与温度呈现负相关, 分析原因在于降雨前期雨强较弱, 主要集中在北京的西南部, 因此北京城区 LST 对此段时间的降雨无明显影响。此后降雨逐渐覆盖整个北京范围, 在 23:00 雨强达到最大值, 此时 LST 与降雨量的相关性显著提高, 决定系数为 0.916, 而后雨强减弱, 相关性也随之下降。这与第 4.3.2 节分析得到的结论吻合, 表明雨岛与热岛在空间分布上存在一致性; 降雨过程中, 热岛-雨岛相关性随着雨强变化而变化, 且相关性最强出现在雨强最大时段。不同之处在于分级后的地表温度等级数据与降雨量的相关性整体有所

提高。

5 结论

本文以北京 2012 年 7 月 21 日暴雨事件为背景, 通过对多时相的 TRMM 降雨数据降尺度, 获取高空间、高时间分辨率的降雨数据, 并结合气象数据分析暴雨的时空分布特点, 定量研究北京 7·21 暴雨时的热岛-雨岛相关关系, 主要研究结论如下:

1) 由气象观测数据插值得出北京 2012 年 7 月 21 日有 80% 的区域降雨量在 100 mm 以上, 超过 200 mm 的地区大多位于北京南部; 随着时间推移, 最强雨带自西向东推进。

2) TRMM 降雨量与气象观测降雨量呈正相关, 但 TRMM 降雨量明显低于气象观测数据。经气象数据验证表明, TRMM 数据进行降尺度运算后测得的降雨量精度能有所提高。

3) 在原尺度、降尺度 TRMM 降雨数据与 MODIS 温度数据 LST 都存在相关性, 且降尺度后两者相关性增加; 不同温度等级与降雨量的相关性较强; 并在雨强最大时刻两个相关性达到峰值, 说明在以上几种尺度下热岛与雨岛的时空分布存在一致性。

城市对降水的影响问题, 国际上存在着不少争论。国内外有研究证实城市及其下风向确有“雨岛效应”。本文是对上述观点的一次验证, 但是在“水-热”相互作用机理方面还有欠缺, 城市“热岛-雨岛-

混沌岛”应该协同研究,城市暴雨形成机理应该深层次地挖掘。今后将加强这些方面的研究。

参考文献(References):

- [1] Shepherd J M, Burian S J. Detection of urban - induced rainfall anomalies in a major coastal city [J]. *Earth Interactions*, 2003, 7 (4): 1 - 17.
- [2] 周淑贞. 上海城市气候中的“五岛”效应[J]. *中国科学: B 辑*, 1988, 18(11): 1226 - 1234.
Zhou S Z. Five islands effects of Shanghai urban climate [J]. *Science China Chemistry*, 1990, 33(1): 67 - 78.
- [3] 刘晓英. 城市的五岛效应和风的特征分析[J]. *宁夏农林科技*, 2012, 53(4): 121 - 123.
Liu X Y. Study on five island effect and wind characteristics of city [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2012, 53(4): 121 - 123.
- [4] 张富国, 姚华栋, 张华林, 等. 北京城区的“雨岛”“湿岛”与“干岛”特征分析[J]. *气象*, 1991, 17(2): 43 - 46.
Zhang F G, Yao H D, Zhang H L, et al. Characteristics analysis of rain island, dry island and wet island in Beijing [J]. *Meteorological Monthly*, 1991, 17(2): 43 - 46.
- [5] 孙楠. 聚焦北京7·21特大暴雨[N]. *中国气象报*, 2012-07-24. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/201207/t20120724_179464.html.
Sun N. Focus on the storm on July 21 in Beijing [N]. *China Meteorological Newspaper*, 2012 - 07 - 24. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/201207/t20120724_179464.html.
- [6] 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 北京地区降水空间分布及城市效应分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 522 - 529.
Zheng Z F, Gao H, Wang Z W, et al. Analysis on spatial distribution of precipitation in Beijing and its city effect [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 522 - 529.
- [7] 赵文静, 张宁, 汤剑平. 长江三角洲城市带降水特征的卫星资料分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(3): 668 - 674.
Zhao W J, Zhang N, Tang J P. Analyses on precipitation characteristics in the Yangtze River Delta City Belt based on the satellite data [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(3): 668 - 674.
- [8] 赵志轩, 严登华, 王浩, 等. 基于 WEP 模型和 TRMM_PR 的唐家山堰塞湖入湖径流预报[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 848 - 856, 861.
Zhao Z X, Yan D H, Wang H, et al. Predicting inflows to Tangjia-shan barrier lake based on WEP model and TRMM precipitation data [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(7): 848 - 856, 861.
- [9] 傅云飞, 刘奇, 自勇, 等. 基于 TRMM 卫星探测的夏季青藏高原降水和潜热分析[J]. *高原山地气象研究*, 2008, 28(1): 8 - 18.
Fu Y F, Liu Q, Zi Y, et al. Summer precipitation and latent heating over the Tibetan plateau based on TRMM measurements [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2008, 28(1): 8 - 18.
- [10] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 121 - 126.
Du L T, Tian Q J, Huang Y, et al. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 121 - 126.
- [11] Zhu Q, Chen X W, Fan Q X, et al. A new procedure to estimate the rainfall erosivity factor based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(9): 2437 - 2445.
- [12] 李相虎, 张奇, 邵敏. 基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(9): 1164 - 1170.
Li X H, Zhang Q, Shao M. Spatio-temporal distribution of precipitation in Poyang Lake Basin based on TRMM data and precision evaluation [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(9): 1164 - 1170.
- [13] 冯海涛, 于国荣, 杨具瑞. 基于 TRMM 3B43 V7 数据的云南降水与干旱监测及精度评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4): 89 - 96.
Feng H T, Yu G R, Yang J R. Precipitation and drought monitoring based on TRMM 3B43 V7 data and precision evaluation in Yunnan [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(4): 89 - 96.
- [14] Hall D K, Foster J L, Salomonson V W, et al. Development of a technique to assess snow - cover mapping errors from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 432 - 438.
- [15] 骆三, 苗峻峰, 牛涛, 等. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. *气象*, 2011, 37(9): 1081 - 1090.
Luo S, Miao J F, Niu T, et al. A comparison of TRMM 3B42 products with rain gauge observations in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(9): 1081 - 1090.
- [16] 马金辉, 屈创, 张海筱, 等. 2001—2010 年石羊河流域上游 TRMM 降水资料的降尺度研究[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1423 - 1432.
Ma J H, Qu C, Zhang H X, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on DEM in the upstream of Shiyang River Basin during 2001 - 2010 [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1423 - 1432.
- [17] 谌芸, 孙军, 徐珺, 等. 北京7·21特大暴雨极端性分析及思考(一): 观测分析及思考[J]. *气象*, 2012, 38(10): 1255 - 1266.
Chen Y, Sun J, Xu J, et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part 1: Observation and thinking [J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(10): 1255 - 1266.
- [18] Duan Z, Bastiaanssen W G M, Liu J Z. Monthly and annual validation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) products in the Caspian Sea Region for the period 1999 - 2003 [C] // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Munich, Germany: IEEE, 2012, 3696 - 3699.
- [19] 魏东, 杨波, 孙继松. 北京地区深秋季节一次对流性暴雨天气中尺度分析[J]. *暴雨灾害*, 2009, 28(4): 289 - 294.
Wei D, Yang B, Sun J S. Meso-scale analysis of heavy rainfall event occurred in the late autumn 2007 in Beijing [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2009, 28(4): 289 - 294.

Spatiotemporal distribution of the rainstorm and the relationship between urban heat island and urban rain island in Beijing on July 21, 2012

MENG Dan¹⁻⁵, GONG Huili¹⁻⁵, LI Xiaojuan¹⁻⁵, YANG Siyao¹⁻⁵

- (1. *Beijing Laboratory of Water Resource Security, Beijing 100048, China*; 2. *College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China*; 3. *Urban Environmental Processes and Digital Modeling Laboratory, Beijing 100048, China*; 4. *Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOST, Beijing 100048, China*; 5. *Beijing Municipal Key Laboratory of Resources Environment and GIS, Beijing 100048, China*)

Abstract: In this paper, the authors selected July 21, 2012, the biggest rainfall day since the founding of People's Republic China in Beijing, as the study target. The rainfall data from both Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and meteorological observations and MODIS LST products were mainly used to study the spatiotemporal distribution of rainstorm and the relationship between urban heat island (UHI) and urban rain island (URI). The spatial interpolation, spatial downscaling, accuracy assessment and correlation analysis were used in the study. Some conclusions have been reached. Firstly, the heavy rainfall area was located mainly in southern Beijing. The rainfall process moved from west to east, as shown by tracking the rainfall maxima of 3 h TRMM data. Secondly, the accuracy of TRMM data was improved by downscaling, as evidenced by the fact that the correlation between TRMM data and observational data was improved and RMSE decreased simultaneously. Finally, the spatial distribution of URI is consistent with UHI and the correlation between the two can produce optimal result in the maximum rainfall periods.

Keywords: urban heat island (UHI); urban rain island (URI); tropical rainfall measuring mission (TRMM); moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS); land surface temperature (LST)

(责任编辑: 邢宇)