

黄群芳, 陆玉麒. 北京地区城市热岛强度长期变化特征及气候学影响机制 [J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1715-1723. [Huang Qunfang, Lu Yuqi. Long-term Trend of Urban Heat Island Intensity and Climatological Affecting Mechanism in Beijing City. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1715-1723.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.10.016

北京地区城市热岛强度长期变化特征 及气候学影响机制

黄群芳^{1,2}, 陆玉麒²

(1. 江苏第二师范学院城市与资源环境学院, 江苏 南京 210013; 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 选择北京地区为研究区, 基于1967~2016年城市站(北京站)和城郊农村站(密云站)的长期气象观测数据, 研究平均气温、最高气温、最低气温对应的城市热岛强度长期变化特征及其气候学影响机制。研究发现, 过去50 a平均气温和最低气温对应的城市热岛强度显著增加, 增温率分别为0.29℃/10a和0.45℃/10a, 而最高气温对应的城市热岛强度则没有明显变化趋势; 统计分析显示过去50 a北京地区相对湿度、风速和日照时数显著降低以及气温显著上升有利于城市热岛的形成, 强化城市热岛强度; 未来全球变暖和快速城市化背景下北京地区城市热岛效应将进一步加剧, 形成更频繁和持续时间更长的夏季城市高温热浪, 严重危及城市居民生产生活和生命健康。

关键词: 城市热岛强度; 长期趋势; 相对湿度; 风速; 气压; 北京地区

中图分类号: P463.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2018)10-1715-09

IPCC第五次评估报告表明, 近60 a来地面气温每十年上升0.12℃, 约为过去100 a气温增温率的2倍^[1]。相对于全球气候变暖, 作为土地利用/土地覆盖变化最激烈形式的城市地区经历了更剧烈的增温^[2-4], 形成了城市气温显著高于周边乡村和郊区的城市热岛现象。城市热岛效应广泛存在于全球各类、各级别城市中, 据研究, 全球超过1 100个城市、中国98.9%的城市都观测到了城市热岛效应^[5,6]。在当前城市快速发展的背景下, 2050年全球城市化率将达到70%^[7], 未来的城市热岛效应强度和发生范围将进一步强化, 可以预见, 城市热岛将成为当今世界面临的巨大挑战。因此, 在城市热岛效应被发现的100多年时间内, 国内外不同领域包括气象、城市规划、环境保护、园林设计和医疗卫生等专家学者从各个角度对城市热岛的形成和生态环境效应开展了大量的研究。在Web of Science数据库以“Urban heat island”作为关键词进行检索, 1997~2016年与城市热岛相关的研究论文呈现快速增长态势, 由1997年的20篇左右增加到2016年的500余篇, 翻了近30倍。

相对于全球气候变暖, 居民更容易受到区域和地区气候热环境的影响, 如全球变暖速度最快的10 a(2003~2012年)温度增长了0.78℃(相对于1850~1900年), 而城市热岛带来的短时增温可达15.4℃^[1,8]。城市高温会加剧大气环境污染、促进流行病的爆发、加剧夏季高温热浪, 从而对区域生态环境、人们生活健康带来重要的影响^[9-11], 甚至会造成重大人员伤亡^[12-14]。此外, 热岛带来的城市增温特别是极端高温热浪还会影响能源、交通、水消费和社会经济生活的各个方面^[15]。因此, 研究城市热岛的形成机制及对策建议对于区域气候变化的响应和适应、全球社会经济生活和城市生态系统的健康、持续发展至关重要^[16]。

已有的研究表明日最大热岛强度发生在反气旋、静风、少云的夜晚^[17,18], 有研究基于此理想条件筛选出的气象数据进行了城市热岛效应的气候学机制分析^[19-21], 但关于正常大气状态对城市热岛效应的长时间作用机制的认识还存在不足。有研究通过对城市热岛效应案例进行强弱分组并与气象条件进行关联来探讨气象因素对城市热岛效应的

收稿日期: 2017-12-23; **修订日期:** 2018-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(41430635)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41430635).]

作者简介: 黄群芳(1979-), 女, 湖南益阳人, 博士, 主要从事城市热岛效应与城市宜居研究。E-mail: flyingfangzi@163.com

影响^[22],但研究结果一定程度上也混淆了其他环境因素对城市热岛的影响。此外,一些研究通过对比典型强热岛日和弱热岛日地面气象要素的变化来得到影响城市热岛形成、减弱和消失的核心气象因子^[23],加强了典型气象要素对城市热岛效应发生、发展的认识,但有限的的数据限制了结果的说服力。因此,迫切需要丰富不同气候区、不同等级城市的城市热岛强度长期变化数据集和成因机制解释。

北京是京津冀城市群的核心城市,过去的许多研究已显示北京城区是典型的“热岛”,其热岛强度比中国沿海城市明显,其结果是造成北京冬季寒冷期缩短和夏季炎热期增强,未来城市高温热浪等灾害更加频繁^[13,24,25],但关于其长期气候学形成机制还不甚明了。因此,本文选择城市化快速发展的北京地区为研究对象非常具有代表性,基于1967~2016年长期气象观测数据,研究城市热岛强度长期变化特征,筛选和厘清其影响的主要气象因子,构建基于主要气象因子的城市热岛强度估算模型,以更好服务于区域气候变化的响应和适应研究,也为城市规划、园林景观设计 and 城市高温热浪的应对管理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域

研究基于城区的北京站和郊区的密云站开展研究,其中北京站(116°28'E, 39°48'N, 海拔31.3 m)位于北京市东南部高度城市化区域,周边高楼大厦环绕,土地利用以工业用地为主,是典型的城

市站(图1a)。密云站(116°52'E, 40°23'N, 海拔71.8 m)位于北京市东北部临近森林和水库的远郊区,周围建筑多为低矮平房(图1a),土地利用以农业用地和森林用地为主,属于典型乡村站(图1a)。此外,基于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的2010年人口分布数据也可以发现北京站人口密度显著高于密云站,其分别能作为城市站和乡村站代表(图1b)。由于2个站点海拔高度非常接近,因此本研究在开展比较分析时没有对数据进行海拔校正。

1.2 数据资料与方法

1957~2016年2个站点长期日观测数据均来自于中国气象局下属的中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>[2017-08-16])。考虑到1957~1966年日最大风速缺测较多,为了保证数据的连续性、一致性和完整性,选取1967~2016年数据进行研究。此外,中国气象局对中国气象数据网公布的数据进行严格质量控制,校正和调整了数据的不连续性,以确保资料的代表性、准确性和可比性^[26,27],也被广泛应用于各类研究和气候变化评价中^[21,23-25]。

城市热岛强度通过城区的北京站气温减去郊区的密云站气温得到,分别计算获得年日平均气温、年日最高气温和年日最低气温分别对应的城市热岛强度。在探讨城市热岛强度长期变化的气候学影响机制时,仅考虑利用城区北京站各气象要素与城市热岛强度进行趋势和统计相关分析。

1.3 统计分析

采用SPSS 16.0软件对数据结果进行统计分

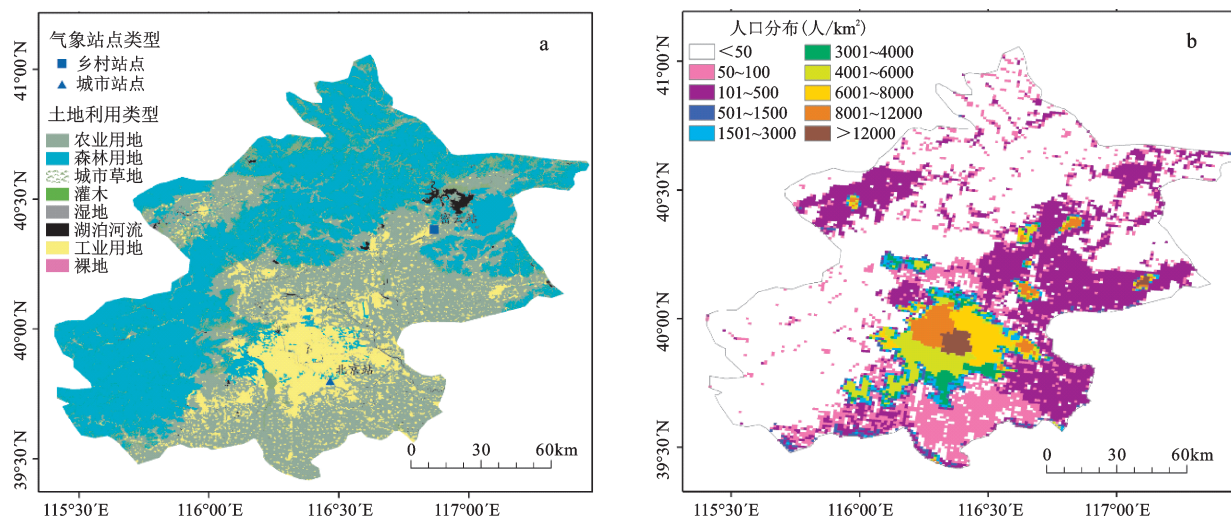


图1 气象站位置和北京市土地利用类型(a)及总人口(b)空间分布

Fig.1 Location of two meteorological stations and distributions of land use type (a) and total population (b) in Beijing City

析,包括线性趋势拟合,单要素线性相关分析和逐步多元线性回归分析。单要素线性相关分析用于阐明城市热岛强度与气象要素间是否存在显著相关,而多元线性回归分析用于从众多气象要素中遴选出影响最显著的关键气象要素,用于城市热岛强度的预测。

采用ArcGIS 9.2绘制北京地区土地利用和人口空间分布图,利用Origin 8.5软件绘制其他数据图。

2 结果与讨论

2.1 城市热岛强度和主要气象要素长期变化特征

北京城区和密云站长期气温观测数据显示,北京地区存在明显的城市热岛效应(图2)。整体而言过去50 a北京地区平均气温和最低气温对应的热岛强度显著增加,热岛强度增温率分别为 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.45^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,城市夜间增温更明显(图2a、2c)。可以看出,不同时段城市热岛强度变化也存在一些波动,未表现出均一的增加趋势,如1980年之前是一个缓慢的增加过程,1980年之后城市热岛强度快速增加,在1997~2003年城市热岛强度曾出现停滞甚至有时下降,但在2004年后又呈现逐渐增加趋势。此外,2011~2016年北京地区城市最低气温热岛强度为 3.01°C (图2c),说明当前城区夜间气

温比乡村要高 3°C ,这一数值与以往关于北京城市热岛强度研究结果较为一致^[28]。相反,过去50 a白天最高气温对应的热岛强度变化不大,没有显著的增加趋势,城市和乡村站最高气温相差约 0.5°C (图2b)。

北京地区夜间最低气温城市热岛强度明显高于白天最高气温城市热岛强度这一研究结论与国际上同类研究结果一致^[17,29],平均气温城市热岛强度 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的增温率与雅典平均气温城市热岛强度 $0.21\sim 0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的增温率比较接近^[29]。此外,北京作为世界上快速城市化地区和大都市聚集区,其目前城市热岛强度与国际上已高度城市化的大都市聚集区比较接近^[30],如日本东京都市区20世纪90年代初,晴朗静风的夏季夜间城市热岛强度为 3°C ,白天的城市热岛强度为 1.0°C ^[31,32],同样在欧洲雅典,夜间最低气温热岛强度在 3°C 以上^[29],而在纽约都市区夏秋季城市热岛强度为 3°C ,冬春季为 4°C ^[33]。但与一些中小城市相比,北京地区城市热岛强度要明显高得多,如临近的廊坊市晴朗无风时城市平均热岛强度最大,只有 1.25°C ^[19],而济宁市城市热岛强度仅为 0.79°C ^[20],反映了随着城市等级和密集程度的增加,城市热岛强度明显增加,相应的未来受夏季城市高温热浪影响的风险也在增加。

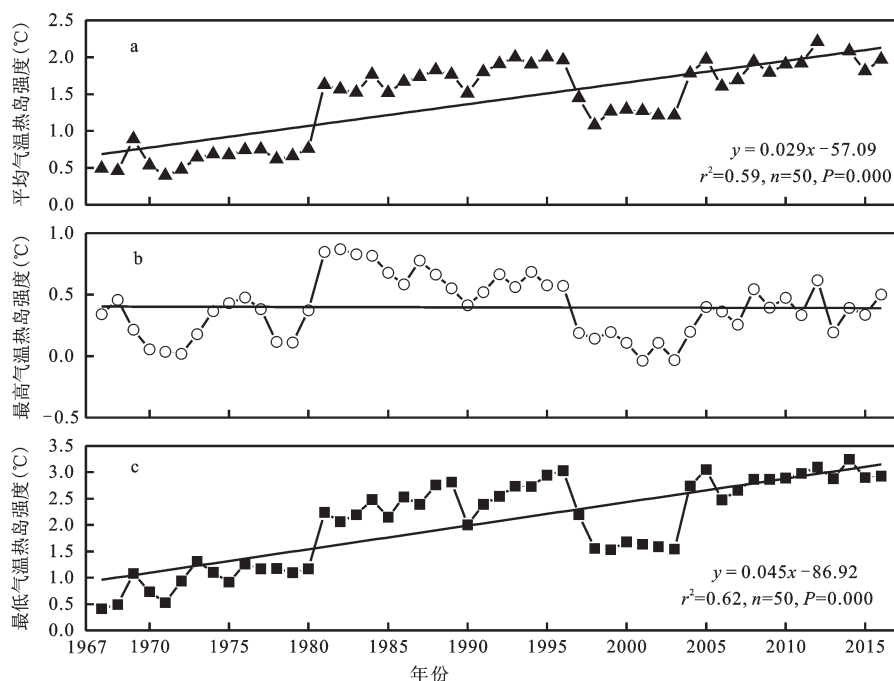


图2 日平均气温(a)、日最高气温(b)和日最低气温(c)计算得到的城市热岛强度长期变化

Fig.2 Long-term trends of urban heat island intensities of daily mean temperature (a), daily maximal temperature (b), and daily minimal temperature (c)

城市热岛的形成与气象条件密切相关,晴朗少云、静风、气压梯度小等天气条件会促进城市热岛效应的形成和发展^[34,35]。反过来,城市化建设改变了城市的下垫面状况,坚硬、不透水下垫面的增加及建筑物的增多、增密、增高,导致城市下垫面粗糙度增大,也会改变城市的风速、相对湿度和气温等气象条件进而影响到城市热岛效应。北京城区站长期气象观测数据显示,过去 50 a 北京市气象条件也发生了明显变化,主要表现为日照时数、风速和相对湿度的显著降低(图 3b、3c、3e),和平均气温、最低气温和最高气温的显著增加(图 3d),北京市的降水和气压呈现轻微降低趋势(图 3a、3f),但统计检验显示不显著。日照时数显著下降与全球变暗和北京地区雾霾污染密切相关^[36,37],而风速的显著降低与全国范围内南北增温差异以及城市建筑物引起地面粗糙度变化有关^[38,39]。

2.2 城市热岛强度与主要气象要素间相关分析

城市热岛强度主要受3方面因素影响:①城

市物理与形态特征,包括城市建筑材料的反射率、城市街谷结构、城市周边地形、城市用地组成;② 气象条件,包括风速、云量、相对湿度、降水、大气稳定性、热对流状况等;③ 人为热排放:工业能源消费产生的热量、交通道路车辆废热、居民生活排热及人类自身新陈代谢产生的热量。在既定城市下垫面条件下,一定时间点的热岛强度主要受背景气候和天气条件的影响,因此本文主要分析城市热岛强度与主要气象要素间的相关性,探讨城市热岛强度长期变化的气候学影响机制。

根据线性相关分析结果,对于平均气温和最低气温热岛强度而言,除了降水以外的其他气象要素均与之存在显著线性关系,其中与相对湿度线性相关的决定系数最高,其次是最低温、平均温、最大风速和平均风速;相比较而言,最大风速线性相关决定系数要高于平均风速,最低气温线性相关决定系数要高于平均气温和最高气温(表1、图4)。而对于最高气温热岛强度,只有相对湿

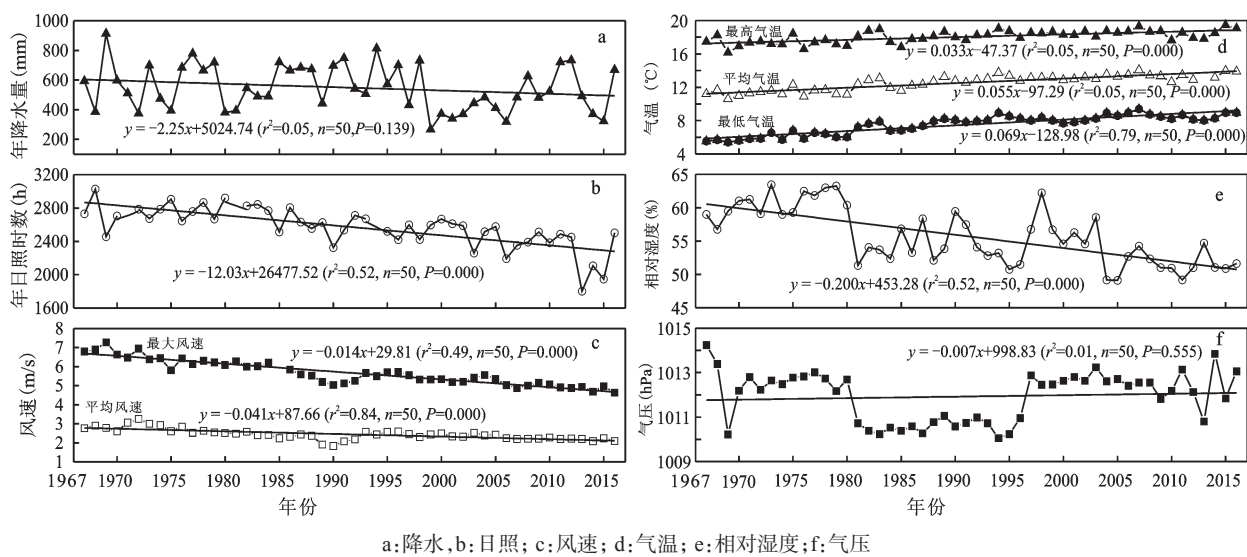


图3 主要气象要素长期气候学变化特征

Fig.3 Long-term climatology of main climatological factors

表1 城市热岛强度与城区北京站主要气象要素间的线性相关决定系数和显著性水平

Table 1 Determination coefficient and significance level of linear relationships between urban heat island intensity of daily mean temperature, daily maximal temperature, and daily minimal temperature and main meteorological factors of urban station (Beijing station)

[illegible]

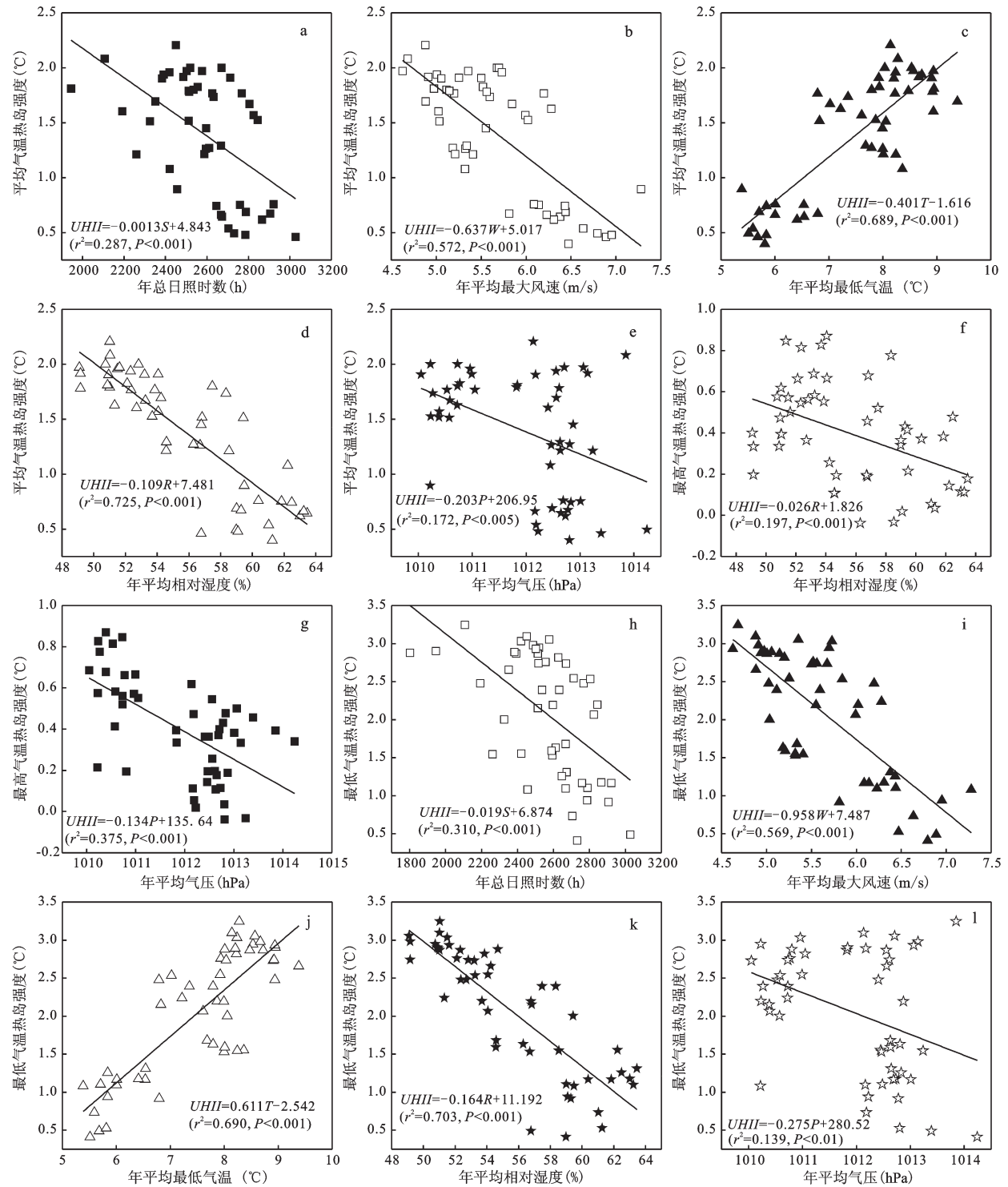


图4 城市热岛强度与气象要素关系

Fig.4 Linear relationships between urban heat island intensities and climatological factors

度和平均气压与之存在显著线性关系,且与平均气压的相关性更好(表1、图4)。整体而言,城市热岛强度与日照时数、风速、相对湿度和气压存在负相关,而与气温则存在正相关。据 IPCC 第五次报

告情景预估未来全球气候将继续变暖^[1],因此在未来全球变暖背景下,可以预见北京城市化过程中城市热岛效应还将进一步加强,进而强化夏季城市高温热浪强度、频次和持续时间,给城市居民健

康带来极大危害^[13,40]。因此,未来城市规划和建设中应充分考虑城市热岛效应影响,通过优化城市布局、进行合理道路系统规划、能源规划和生态系统规划等措施减缓城市热岛效应影响。

2.3 城市热岛强度多元线性回归模拟

为进一步遴选影响城市热岛强度的关键气象要素,本文对城市热岛强度与主要气象要素进行了逐步多元回归分析,考虑到最大风速和最低气温相关性要更好,多元线性逐步回归风速和气温分别取最大风速和最低气温进行分析。结果表明,影响平均气温和最低气温热岛强度的核心气象要素依次是相对湿度、最大风速和气压,3个要素对城市热岛强度的总解释率分别为92.4%和87.6%。而对于最高气温热岛强度,影响最大的气象要素依次是气压、相对湿度和日照时数,3个要素对城市热岛强度的总解释率52.5%。与单要素线性相关分析相比,多元逐步回归遴选出来的3个关键气象要素对城市热岛强度的解释率显著上升(表1),特别是平均气温和最低气温城市热岛强度的解释率都在87%以上,由此得到如下多元线性回归模型,以便对未来城市热岛强度进行预测。

$$UHII_{Mean} = -0.065RH - 0.397WS_{Max} - 0.160AP + 168.90 \quad (r^2 = 0.924, P < 0.001, n = 50) \quad (1)$$

$$UHII_{Min} = -0.101RH - 0.572WS_{Max} - 0.201AP + 213.93 \quad (r^2 = 0.876, P < 0.001, n = 50) \quad (2)$$

式中, $UHII_{Mean}$ 、 $UHII_{Min}$ 分别为平均气温和最低气温城市热岛强度, RH 、 WS_{Max} 和 AP 分别为北京城市站平均相对湿度、最大风速和平均气压。

为了描述3个气象要素对城市热岛强度的组合影响,本文研究了平均气温、最低气温和最高气温城市热岛强度随3个关键气象要素的变化(图5)。图中显示城市热岛强度与3个关键气象要素均呈负相关关系,相对干燥的空气、静风、微风条件有利于城市热岛效应的形成,对应的城市热岛强度大。综合起来,相对湿度、最大风速和气压是影响北京城市热岛强度的关键气象要素。相对湿度、风速和云量是影响城市热岛强度的关键气象要素^[17,30],因云量数据的缺失无法判断其对北京市城市热岛强度的影响,但相对湿度和风速对城市热岛强度的影响与以往研究结果一致,并突出了气压对北京市城市热岛强度的影响。

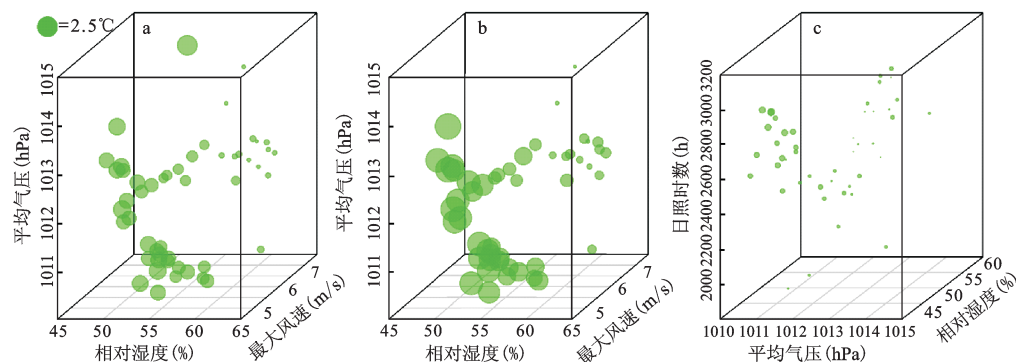
3 结论

利用北京站和密云站1967~2016年的长期气象观测数据分析了北京市热岛强度的长期变化趋势并探讨其气候学形成机制,结果如下:

1) 过去50 a,北京地区平均气温和最低气温的城市热岛强度显著增加,并且最低气温的城市热岛强度增温率明显高于平均气温的城市热岛强度,其增温率分别为0.45℃/10a和0.29℃/10a,而最高气温的城市热岛强度没有明显变化趋势。

2) 日照时数、风速、平均相对湿度和平均气压与平均气温和最低气温的城市热岛强度均存在不同程度的显著负相关,而气温与平均气温和最低气温的城市热岛强度则存在显著的正相关,反映随着全球气候变暖城市热岛强度存在增加趋势。

3) 平均相对湿度、最大风速和平均气压是影



a: 平均气温热岛强度随相对湿度、最大风速、气压变化; b: 最低气温热岛强度随相对湿度、最大风速、气压变化;

c: 最高气温热岛强度随气压、相对湿度、日照时数变化

图5 城市热岛强度随关键气象要素变化

Fig.5 Urban heat island intensity change with key meteorological factors

响北京地区平均气温和最低气温城市热岛强度的控制性气象因子,而平均气压、平均相对湿度和日照时数是影响最高气温城市热岛强度的核心气象因子。

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的张毅博和邓建明帮助绘制了部分图件。

参考文献(References):

- [1] Stocker T F, Qin D H, Plattner G K. Climate change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Summary for Policymakers (IPCC, 2013).
- [2] Huang Q, Lu Y. The effect of urban heat island on climate warming in the Yangtze River Delta urban agglomeration in China[J]. International journal of environmental research and public health, 2015, 12(8): 8773-8789.
- [3] Stone B. Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities: 1951-2000[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2007, 27 (13): 1801-1807.
- [4] Zhou L, Dickinson R E, Tian Y et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [5] Peng J, Ma J, Liu Q et al. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 487-497.
- [6] Stewart I D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(2): 200-217.
- [7] United Nations. World urbanization prospects: the 2011 revisions, population division [R]. 2012: 14
- [8] Mihalakakou G, Santamouris M, Papanikolaou N et al. Simulation of the urban heat island phenomenon in Mediterranean climates[J]. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161(2): 429-451.
- [9] 钱佳丽, 朱昊辰, 贺文智, 等. 上海的雾霾天气特征及影响因素[J]. 上海节能, 2015(8): 424-430. [Qian Jiali, Zhu Haochen, He Wenzhi et al. Shanghai fog and haze weather characteristics and influencing factors. Shanghai Energy Conservation, 2015 (8): 424-430.]
- [10] Xu J, Chang L, Yan F et al. Role of climate anomalies on decadal variation in the occurrence of wintertime haze in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599: 918-925.
- [11] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1134-1147. [Yao Yuan, Chen Xi, Qian Jing. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1134-1147.]
- [12] Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T et al. Impact of regional climate change on human health[J]. Nature, 2005, 438 (7066): 310.
- [13] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004, 305 (5686): 994-997.
- [14] Ward K, Lauf S, Kleinschmit B et al. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 527-539.
- [15] Santamouris M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 82: 100-113.
- [16] Huang Q, Lu Y. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131(3-4): 1055-1067.
- [17] Arnds D, Böhner J, Bechtel B. Spatio-temporal variance and meteorological drivers of the urban heat island in a European city[J]. Theoretical and applied climatology, 2017, 128(1-2): 43-61.
- [18] Szegedi S, Kircsi A. The effects of the synoptic conditions on development of the urban heat island in Debrecen, Hungary[J]. Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis, 2003, 36(37): 111-120.
- [19] 王清川, 郭立平, 张绍恢. 不同气象条件下廊坊城市热岛效应变化特征[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(6): 44-48. [Wang Qingchuan, Guo Liping, Zhang Shaohui. Urban heat island effect under different meteorological conditions over Langfang Hebei Province. Journal of Meteorology and Environment, 2009, 25 (6): 44-48.]
- [20] 王晓默, 张翠翠, 董宁, 等. 不同气象条件下济宁城市热岛效应的变化特征[J]. 南京信息工程大学学报, 2016, 8(2): 160-165. [Wang Xiaomo, Zhang Cuicui, Dong Ning et al. Urban heat island effect under different meteorological conditions in Jinan of Shandong Province. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2016, 8(2): 160-165.]
- [21] 李丽光, 梁志兵, 王宏博, 等. 不同天气条件下沈阳城市热岛特征[J]. 大气科学学报, 2011, 34(1): 66-73. [Li Liguang, Liang Zhibing, Wang Hongbo et al. Urban heat island characteristics in Shenyang under different weather conditions. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(1): 66-73.]
- [22] Morris C J G, Simmonds I. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2000, 20(15): 1931-1954.
- [23] 李兴荣, 胡非, 舒文军, 等. 北京秋季城市热岛效应及其气象影响因子[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(3): 291-299. [Li Xiongrong, Hu Fei, Shu Wenjun et al. Characteristics of urban

- heat island effect and its meteorological influencing factors over Beijing in autumn. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(3): 291-299.]
- [24] Liu W, Ji C, Zhong J et al. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, 87(1-4): 213-221.
- [25] You Q, Jiang Z, Kong L et al. A comparison of heat wave climatologies and trends in China based on multiple definitions[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48(11-12): 3975-3989.
- [26] Li Q, Dong W. Detection and adjustment of undocumented discontinuities in Chinese temperature series using a composite approach[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(1): 143-153.
- [27] Li Q, Liu X, Zhang H. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(2): 260-268.
- [28] 宋艳玲, 张尚印. 北京市近40年城市热岛效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 126-129. [Song Yanling, Zhang Shangyin. The study on heat island effect in Beijing during last 40 year. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 126-129.]
- [29] Founda D, Pierros F, Petrakis M et al. Interdecadal variations and trends of the Urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 161: 1-13.
- [30] Kim Y H, Baik J J. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 79(3-4): 151-164.
- [31] Kimura F, Takahashi S. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment[J]. *Atmospheric Environment*, 1991, 25(2): 155-164.
- [32] Yamashita S. Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in Metropolitan Tokyo[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(3): 429-435.
- [33] Gedzelman S D, Austin S, Cermak R et al. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, 75(1-2): 29-42.
- [34] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471. [Peng Baofa, Shi Yishao, Wang Hefeng et al. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1461-1471.]
- [35] Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large City[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(2): 169-182.
- [36] Wild M. Global dimming and brightening: A review[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D10): D00D16.
- [37] Yang Y H, Zhao N, Hao X H et al. Decreasing trend of sunshine hours and related driving forces in North China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 97(1-2): 91-98.
- [38] Vautard R, Cattiaux J, Yiou P et al. Northern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11): 756-761.
- [39] Xu M, Chang C P, Fu C et al. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D24): doi:10.1029/2006JD007337.
- [40] 李双双, 杨赛霓, 张东海, 等. 近54年京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素[J]. *应用气象学报*, 2015(5): 545-554. [Li Shuangshuang, Yang Saini, Zhang Donghai et al. Patiotemporal variability of heat waves in Beijing-Tianjin-Hebei region and influencing factors in recent 54 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015(5): 545-554.]

Long-term Trend of Urban Heat Island Intensity and Climatological Affecting Mechanism in Beijing City

Huang Qunfang^{1,2}, Lu Yuqi²

(1. College of Urban, Resources and Environmental Science, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, Jiangsu, China;

2. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Urban heat island (UHI) has an important effect on urban eco-environment, living and production, and physical and mental health of the residents. In addition, urban warming especially summer heat wave caused by UHI significantly affects many aspects of the global economy, such as energy and water consumption, transportation, and social economy. Understanding of long-term trend of urban heat island intensity and its climatological driving mechanism will help the rational urban planning, urban livable construction, and urban sustainable development. Beijing is the center of the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, and has experienced a rapid urbanization process in the past few decades. This study aims to elucidate the long-term trends of UHI intensities of mean air temperature, minimum air temperature, and maximum air temperature and the climatological driving mechanism based on 50 years (1967-2016) meteorological observation data from urban station (Beijing station) and rural station (Miyun station). In the past five decades, the UHI intensities of mean air temperature, and minimum air temperature showed a significant increasing trend with the increasing rates of 0.29°C/decade ($r^2=0.59$, $P<0.001$) and 0.45°C/decade ($r^2=0.62$, $P<0.001$) respectively. In contrast, no marked variability trend was observed for the UHI intensities of maximum air temperature. Statistical analysis has shown that relative humidity, wind speed, and sunshine duration decreased significantly and air temperature increased significantly in Beijing over the past 50 years, which is conducive to the formation of UHI and the enhancement of UHI intensity. Multiple stepwise linear regressions showed that relative humidity, maximum wind speed, and atmospheric pressure were the key climatological factors controlling UHI intensities of mean air temperature and minimum air temperature, which could explain 92.4% and 87.6% of variabilities respectively. Atmospheric pressure, relative humidity, and sunshine duration were the key climatological factors controlling UHI intensities of maximum air temperature. Under the background of global warming and rapid urbanization, UHI effect in Beijing will further intensify, resulting in more frequent and prolonged summer urban heat waves, which will seriously endanger urban residents' production, life and health. Therefore, it is necessary to consider the effects of UHI on the future urban planning and construction. By optimizing urban layout, carrying out reasonable road system planning, energy planning and ecosystem planning and other measures, we can alleviate UHI effects and reduce high temperature and heat waves harm caused by UHI.

Key words: urban heat island intensity; long-term trend; relative humidity; wind speed; atmospheric pressure; Beijing City