基于移动测量的城市空间形态对夏季午后城市热环境影响研究

Impacts of Mobile Survey-based Urban Spatial Forms on Summer Afternoon Thermal Environments

周雪帆 陈宏 * 吴昀霓 许华华

ZHOU Xuefan, CHEN Hong*, WU Yunni, XU Huahua

中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2018)10-0021-06
DOI：10.14085/j.fjyl.2018.10.0021.06
收稿日期：2018-05-09
修回日期：2018-08-27

周雪帆/1984年生/女/湖北人/博士/华中科技大学讲师/湖北省城镇化工程技术研究中心/研究方向为建筑与城市热环境（武汉 430074）
ZHOU Xuefan, born in 1984 in Hubei Province, Ph.D., is a lecturer in the School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Engineering and Technology Research Center of Urbanization. Her research focuses on buildings and urban thermal environment(Wuhan 430074).

陈宏/1967年生/男/湖北人/博士/华中科技大学教授/湖北省城镇化工程技术研究中心/研究方向为建筑与城市热环境（武汉 430074）
通信作者邮箱（Corresponding author Email）：chhwh@hust.edu.cn
CHEN Hong, born in 1967 in Hubei Province, Ph.D., is a professor in the School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Engineering and Technology Research Center of Urbanization. His research focuses on buildings and urban thermal environment (Wuhan 430074).

吴昀霓/1992年生/女/湖北人/华中科技大学在读硕士研究生/研究方向为建筑与城市热环境（武汉 430074）
WU Yunni, born in 1992 in Hubei Province, is a graduate student in the School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology. Her research focuses on buildings and urban thermal environment (Wuhan 430074).

许华华/1982年生/男/湖北人/华中科技大学在读博士研究生/研究方向为建筑与城市热环境（武汉 430074）
XU Huahua, born in 1982 in Hubei Province, is a doctoral student in the School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology. His research focuses on buildings and urban thermal environment (Wuhan 430074).

摘要：城市空间形态是城市特殊微气候形成的主要因素之一。本研究旨在通过分析2016年及2017年武汉和郑州夏季移动实测数据，探讨不同气候区（夏热冬冷地区和寒冷地区）、不同用地属性（商业和住宅）以及不同城市空间形态指标（天空开阔度、绿化覆盖率、建筑高度和建筑密度）对夏季午后城市热环境形成的影响机理，并基于非线性回归分析，研究城市空间形态各项指标与夏季午后气温的相关性。结果显示，在夏季午后，建筑的遮阴效果是对城市气温影响最为关键性的因素。特别是在郑州，建筑密度和天空开阔度2个因素最为关键，具有显著的相关性。相比之下，武汉气温值与建筑遮阴效果的相关性低于郑州，说明干热环境下太阳辐射对气温的高低起决定性因素，而湿热环境下却并不显著。

关键词：风景园林；城市空间形态；用地功能；天空开阔度；城市热环境
基金项目：国家自然科学基金青年项目（编号51708237）；国家自然科学基金重点项目（编号51538004）；57届中国博士后基金（编号2015M572144）；华中科技大学自主创新基金（编号0118220100）

Abstract: Urban spatial form is a key factor contributing to the formation of urban distinct microclimate. By analyzing the mobile measurement meteorological data of Wuhan and Zhengzhou in 2016 and 2017, this paper explores the impacts of different climate zones (hot-summer and cold-winter zones, cold areas), different land use categories (commercial and residential), different urban spatial form indexes (sky view rate, greening rate, building height, building density) on the urban thermal environment in summer afternoons. And based on nonlinear regression analysis, it also evaluates the correlations between the urban spatial form indexes and summer afternoon air temperatures. The results showed that the shading effect of buildings is the most crucial factor on summer afternoon temperatures. In Zhengzhou in particular, building density and sky ratio are the most important, with significant correlations. In comparison, the correlation of temperatures and building shading effect in Wuhan is less obvious than in Zhengzhou. It shows that solar radiation plays a decisive role in the rise and fall of temperature in the dry and hot environment, while it is less significant in a hot and humid environment.

Keywords: landscape architecture; urban spatial form; land use function; sky view rate; urban thermal environment
Fund Items: National Natural Science Fund Youth Project (No. 51708237); State Key Program of National Natural Science of China (No. 51538004); the 57th China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (No. 2015M572144); the Independent Innovation Fund of Huazhong University of Science and Technology (No. 0118220100)

1 研究背景

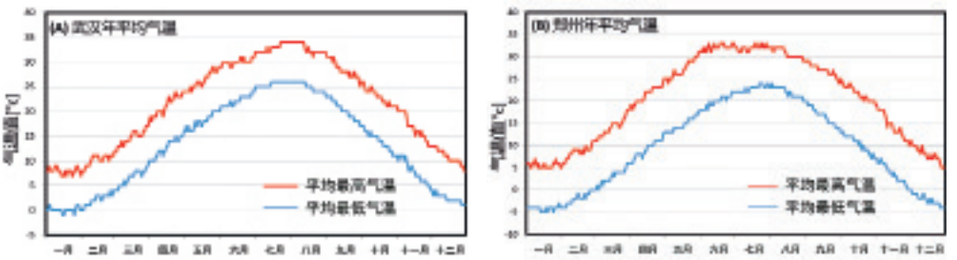
由于城市人口急速增长，城市规模快速扩张，导致城市内热量得失变化，从而形成特殊的城市微气候。其中最典型的就是城市热岛效应，即城市气温普遍高于郊区气温的一种现象[1]，是城市高温化趋势的集中表现。导致城市热岛的原因很多，包括高密集人群活动带来的高人工热排放[2]，不透水、高蓄热人工下垫面材质的增多[3]，城市形态紧凑化[4]，建筑高度增加[5]，绿化

覆盖率减小[6-7]等。然而，从前人研究中可以发现，虽然引起城市高温化的原因大同小异，但由于城市的气候特点、地理位置、海拔高度、城市规模、用地情况都不尽相同，所以不同城市热岛效应形成的主要原因也存在差异。

D. Gercek等[8]利用遥感技术对土耳其Izmit市热岛形成原因进行了分析，发现Izmit市夜晚热岛强度主要受交通排热的影响，而白天的热岛强度却和天空开阔度（Sky View Factor）、绿化覆盖率、建筑材料反射率和吸收率存在直接关系。Ariane Middel等利用ENVI-met[9]和RayMan[10]对美国亚利桑那州Phonix市热环境进行模拟，发现紧凑化的城市形态对于Phonix市这类亚热带沙漠气候城市的热岛现象有极大的缓解作用，特别是天空开阔度对干热地区的热环境存在关键影响。S.B. Ali等[11]对印度Bhopal市热岛问题进行研究，发现绿化覆盖率为0.5的区域和邻近城区温度差高达5.6℃。Tania Sharmina等[12]用ENVI-met模拟研究街道高宽比（H/W）和天空开阔度对孟加拉国首都Dhaka市热岛强度的影响。Sachiho A. Adachi等[13]利用中尺度气象模拟工具WRF对东京市热环境进行模拟分析，发现紧凑化的城市中心区空间形态对热岛效应存在恶化作用，而城市周边区域采用紧凑化的空间形态却有缓解热岛效应的作用和意义。Dhirgham Alobaydia等[14]利用ENVI-met对伊拉克巴格达市热环境进行模拟，发现街道高宽比（H/W）越大，干热地区城市地表温度、气温越低。在另一干热城市沙特阿拉伯的Riyadh市也发现类似的结论，Mohammed A. Bakarmana和Jae D. Changa[15]利用实测手段发现高宽比（H/W=2.2）较大的街道比高宽比（H/W=0.42）较小街道温度低10%左右。

Yong Xu等[16]利用遥感技术收集资料建立香港九龙区城市3D模型，研究建筑密度、建筑高度、容积率、迎风面积比及天空率对湿热区域热岛效应的影响。类似的，刘琳等[17]利用实测手段研究深圳市天空开阔度、街道高宽比、建筑占地面积、透水路面比率、非透水路面比率、建筑平均高度、地理粗糙等级、表面吸热量、表面反射率9个参数对热岛效应的影响程度，并发现深圳市热环境受地理粗糙等级影响最为显著，其次为街道高宽比、表面吸热量、建筑平均高度等，而其余参数对深圳市热环境影响较小。杨春华等[18]利用遥感技术对重庆市热岛效应进行成因分析，发现不同土地利用类型对地表温度的响应存在差异，建设用地、未利用用地等地表温度较高，草地、耕地和林地次之，水域最低，同时还发现城市热岛强度与植被覆盖度呈显著负相关，植被覆盖度高于50%时，热岛现象基本消失，城市绿地内外平均温差可达2.2℃，且绿地面积越大，与周边形成的温差也越强烈。Meiyan Zhao等[19]利用遥感技术对上海1984—2014年地表温度进行分析，发现城市紧凑度小于0.15时对城市热岛不存在明显影响，但高于0.15时城市形态对热环境的影响开始变得显著。G. Mills等[20]发现通过改变反映城市空间形态的街区尺度将对城市高温化、风场、空气质量、微气候变化等多个方面产生显著影响。E.L. Kruger与P Drach[21]以巴西Rio de Janeiro地区为例，发现街区尺度不仅会对室外热舒适性产生影响，甚至还会影响到城市空气质量。

城市所处地理特征、气候区以及城市布局形式的不同都会导致城市热环境对城市空间形态因素的响应机理发生改变，目前多数研究都是基于单一城市进行讨论，鲜有论文将多个城市进行横向对比。本研究基于上述研究空白，利用2016年及2017年武汉、郑州夏季移动实测数据，讨论夏热冬冷典型平原城市武汉和寒冷平原城市郑州的各类城市空间形态指标（天空开阔度、绿化覆盖率、建筑高度和建筑密度）对各自城市热环境的影响程度，分析主要因素及每个因素与城市热环境的相关性高低。午后是太阳辐射强度最大的时间段，在最恶劣、极端高温环境下研究城市空间形态对城市热环境的影响，讨论最热时段内的影响程度高低，因此，本次研究仅针对午后时间段（13：00—15：00）的空气温度值进行探讨，更多时间段及更多气候因素将作为下一步深入研究另作讨论。



1

1 武汉及郑州两地年平均气温

Annual average temperatures of Wuhan and Zhengzhou

2 研究区域概况

本研究选取夏热冬冷地区中部城市武汉及寒冷地区中部城市郑州作为研究区域，对比不同气候区下，城市热岛及城市极端高温天气的核心形成原因。

武汉地处夏热冬冷地区中部，长江中游，江汉平原东部，东经113°41’~115°05’、北纬29°58’~31°22’。武汉市四季分明，夏、冬长，春、秋短，且夏季酷热，在历史上和重庆、南京并称为“三大火炉”城市，冬季寒冷，特别是武汉水域面积辽阔，湿度较大，因而在冬季感觉更为寒冷。如图1所示，武汉年最高气温在33℃左右，最低气温在0℃左右。夏季主导风向为东南风，冬季主导风向为西北风，风速在2.8m/s左右[22]。

郑州地处寒冷地区中部，黄河下游，华北平原南部，东经112°42’~114°14’、北纬34°16’~34°58’。郑州市冬季寒冷，最低温度可达-5℃，全年平均温度15.6℃，如图1所示，夏季温度和湿度略低于武汉市。夏季主导风向为东南风，冬季主导风向西北风，和武汉相似，风速在2.4m/s左右。

武汉与郑州同属于中部地区的平原城市，城市发展程度及城市空间形态类似，然而却有显著的气候差异性。武汉为夏热冬冷地区典型城市，水域较多，湿度较大；郑州为寒冷地

表 1 武汉市移动实测气象数据
Tab. 1 Mobile measured meteorological data of Wuhan

日期	最高气温 /℃	最低气温 /℃	天气	风向	风力
2016-07-28	36	28	晴	西南风	< 3 级
2016-07-29	37	29	晴	南风	< 3 级
2016-07-30	37	28	多云	北风	< 3 级
2016-07-31	38	27	晴	东北风	< 3 级

表 2 郑州市移动实测气象数据
Tab. 2 Mobile measured meteorological data of Zhengzhou

日期	最高气温 /℃	最低气温 /℃	天气	风向	风力
2017-07-22	36	28	多云 / 晴	东风 / 东南风	3~4 级
2017-07-23	37	28	多云 / 晴	南风	<3 级
2017-07-24	38	28	阴 / 多云	东北风	3~4 级
2017-07-25	33	25	阴 / 多云	北风 / 东风	<3 级

表 3 实测仪器说明
Tab. 3 Details of measuring instruments

仪器名称	测量目的	参数说明	仪器自动记录时间间隔
温湿度自记仪	测量空气温度、相对湿度	精度：0.1℃、0.1% 误差：±0.2℃、±1% 范围：-35~80℃、0~100%	10s
GPS	记录实测航迹	精度：2.2m	10s

表 4 武汉城市空间形态指标及数据
Tab. 4 Urban spatial shape index and data of Wuhan

采样点编号	天空率 /%	建筑密度 /%	建筑平均高度 /m	绿化覆盖率 /%
WC1	57.1	17.2	17.7	57.43
WC2	51.9	19.6	28.9	4.18
WC3	42.3	55.7	21.4	3.14
WC4	52.4	37.7	14.1	10.70
WC5	60.5	22.9	21.2	20.91
WC6	16.7	32.8	13.5	14.19
WC7	34.6	37.9	14.0	16.93
WC8	46.3	32.9	26.6	9.19
WD1	58.6	6.97	50.3	56.72
WD2	58.1	24.62	36.0	70.21
WD3	80.2	12.48	37.3	57.79
WD4	62.2	16.62	39.9	16.37
WD5	66.6	10.35	66.0	29.86
WD6	74.8	7.42	28.5	26.26
WD7	68.4	22.81	35.2	19.44
WD8	70.7	7.88	25.9	11.24
WD9	71.8	17.96	15.5	18.55
WD10	70.2	17.23	14.6	16.81
WD11	12.3	26.32	24.2	17.46
WD12	34.4	31.73	18.3	11.76
WD13	33.8	32.61	16.5	18.72
WD14	40.3	21.50	14.7	57.97
WD15	47.8	25.08	20.3	17.18

区典型城市，属于半干旱大陆型季风性气候，夏季温度不高，但由于这几年城市开发强度较大，极端高温天气增多，热岛现象显著。

3 研究方法与案例设定

3.1 研究方法

本研究利用实地移动测量的方法，研究武汉（夏热冬冷中部平原城市）和郑州（寒冷地区中部平原城市）的城市热岛形成机理，分析导致城市高温化的城市形态主要指标，比较不同气候区城市热岛影响关键因素的异同。

武汉市移动测量为 2016 年 7 月 28 日—2016 年 7 月 31 日，共 4 天（14：00—15：00），受不同时段交通状况的影响，每次实测持续的时间略有不同，总体控制在 60min 左右。根据武汉市气象局公布的数据，2016 年 7 月 28 日—7 月 31 日均为晴天，空气温度在 27~38℃之间，风速小于 3 级（表 1）。

郑州市移动测量从 2017 年 7 月 22 日开始到 7 月 25 日结束，共持续 4 天（13：30—14：00），受不同时段交通状况的影响，每次实测持续的时间略有不同，总体控制在 30min 左右。根据郑州市气象局公布的数据，2017 年 7 月 22—7 月 25 日分别为多云转晴和阴转多云天气情况，空气温度在 25~38℃左右，一般为 3~4 级风，每天主导风向均有些许变化（表 2）。

武汉市移动测量设备以汽车为运输载体，在车顶天窗位置架设温湿度自记仪和 GPS，汽车绕基地周边道路匀速（18km/h）、缓慢行驶一圈，获得温湿度数据和 GPS 航迹数据。郑州市移动测量设备以自行车为载体，在自行车前篓中架设运动相机、温湿度自记仪和 GPS 仪器，在地块内部匀速（10km/h）、缓慢绕行，获得街景录像、温湿度数据和 GPS 航迹数据。武汉及郑州移动测量均有设置定点作为参考背景点数据来源，武汉定点设置在华中科技大学南四教学楼楼顶，郑州定点设置在文化宫路外国语小学旁，以记录背景温湿度数据，具体仪器如表 3 所示。

3.2 案例设定

武汉和郑州市移动测量均选取商业区和高层低密住宅区各一块。其中，武汉市移动测量分别选取江岸区江汉路商业区和江岸区后湖高层低密住宅区。郑州市移动测量分别选取二七区二七商业区和燕庄高层低密住宅区。

武汉市江岸区江汉路商业区，地块周长约 11.4km。该地块为武汉典型的传统商业街区，建筑多为 3 层的红砖房，沿江地段也有不少新建商业办公楼。道路宽度为 4 车道主干路（15m）。在商业区内选取 8 个半径为 100m 采样地块，具体位置如图 2-1 所示。武汉市江岸区后湖高层低密住宅区，地块周长约 9.2km。该地块为新建高层住宅区，建筑多为 11 层高层住宅。道路宽度为 8 车道主干路（30m）。在住宅区内选取 15 个半径为 100m 采样地块，具体位置如图 2-2 所示。各采样地块城市空间形态指标及数据如表 4 所示。

2-1

2-2

2

3-1

3-2

3

2 武汉市移动测量选点

Mobile measurement sites of Wuhan

2-1 江汉路商业区

Jianghan Road commercial district

2-2 后湖居住区

Houhu residential area

3 郑州市移动测量选点

Mobile measurement sites of Zhengzhou

3-1 二七区二七商业区

Erqi commercial district

3-2 燕庄高层低密住宅区

Yanzhuang high-rise low density residential area

表 5 郑州城市空间形态指标及数据

Tab. 5 Urban spatial form index and data of Zhengzhou

采样点编号	天空率 /%	建筑密度 /%	建筑平均高度 /m	绿化覆盖率 /%
ZC1	56.3	37.45	15.8	12.49
ZC2	67.3	40.16	16.6	3.99
ZC3	55.9	39.59	20.9	0.48
ZC4	55.4	42.12	9.9	2.58
ZC5	36.9	65.64	9.7	3.29
ZC6	39.7	35.28	16.8	9.46
ZC7	15.1	30.44	15.7	12.78
ZC8	14.2	25.68	13.0	10.71
ZD1	57.44	27.52	17.3	12.19
ZD2	85.09	18.36	49.1	17.82
ZD3	56.87	10.66	24.0	27.51
ZD4	31.25	16.72	23.2	18.60
ZD5	76.85	26.00	33.1	17.27
ZD6	42.38	14.63	24.5	20.12
ZD7	35.05	15.69	14.6	21.70
ZD8	35.33	7.19	8.1	15.86
ZD9	40.09	14.02	13.0	18.39
ZD10	21.27	23.99	31.7	16.87
ZD11	25.42	29.37	17.3	2.28
ZD12	28.34	23.70	27.4	14.24

郑州市二七区二七商业区，地块周长约 7.4km。该地块为郑州典型的传统商业区，建筑高度在 16m 左右。道路宽度为 4 车道主干路（16m）。在商业区内选取 8 个半径为 100m 采样地块，具体位置如图 3-1 所示。郑州市燕庄高层低密住宅区，地块周长约 6.6km。该地块为新建高层住宅区，建筑多为 15 层高层住宅。道路宽度为 8 车道主干路（27m）。在住宅区内选取 12 个半径为 100m 采样地块，具体位置如图 3-2 所示。各采样地块城市空间形态指标及数据如表 3 所示。

4 结果与讨论

武汉江汉路商业区、后湖高层低密住宅区 14：00—15：00 移动测量可视化结果显示于图 4 中。图 4 中数据为移动点气温数据与同时间定点气温数据比值，数据为 4 日平均值结果。图 4-1 显示的是武汉江汉路商业区结果，根据结果可以看出，午后商业区温度最高地段集中在沿江大道前段，靠近江滩公园区域，几乎不存在建筑物对路面的遮挡，因此，由这一可视化结果能推测气温比值受人为活动密集程度、建筑密集程度影响较大。图 4-2 显示的结果也侧面证明了这一点，住宅区路段上气温最高地段集中在建筑密度最大区域，而较空旷区域由于周围高楼遮挡作用呈现出最低气温的趋势。这一结果说明武汉午后气温结果受建筑密度及遮阴效果的影响很大。

郑州二七商业区，燕庄高层低密住宅区 13：30—14：00 移动测量可视化结果显示于图 5 中。图 5 中数据为一动点气温数据与同时间定点气温数据比值，数据为 4 日平均值结果。图 5-1 显示的是郑州二七商业区结果，气温较高区域集中在二七商业区中建筑体量较大的地段，这说明郑州商业区附近热环境可能很大程度上收到人工热排放量的影响，同时还受到建筑密度的影响。郑州商业区气温比值与建筑密度的关系是否是密度越大气温越高有待进一步考证，因为从现象上看来，二七商业区东面虽然建筑密度最大，却是整个地块中气温最低的区域。图 5-2 显示的是燕庄高层低密住宅区气温比结果，这一结果和郑州商业区类似，燕庄地块西面是一片建筑体量较大的商业区，由于建筑体量较大，气温比值较高。燕庄地块其他区域多为高层低密住宅楼，因而高层建筑物对周围区域能产生较好的遮阴效果，所以在午后太阳辐射强烈的研究时间段内，区域气温比值相对较低。说明郑州在午后时段也显著受到建筑密度及建筑遮阴的影响，不同的是，郑州街区受人工热排放量的影响似乎更为显著一些。

图 6 显示了武汉江汉路商业区及郑州二七商业区采样地块午后气温比与天空开阔度、绿化覆盖率、建筑高度、建筑密度的相关性结果。不难发现，虽然同是商业区，但郑州商业区与以上空间形态指标的相关性更为显著。其中，和建筑密度的相关性最高，相关系数达到 0.729 6，次高的是同天空开阔度的

4-1

4-2

4

5-1

5-2

5

4　武汉移动点中午温度比值

Midday temperature ratio of mobile measurement sites in Wuhan

4-1 江汉路商业区移动点中午温度比值

Midday temperature ratio of mobile measurement sites in Jianghan Road commercial district

4-2 后湖高层低密住宅区移动点中午温度比值

Midday temperature ratio of mobile measurement sites in Houhu high-rise low density residential area

5　郑州移动点中午温度比值

Midday temperature ratio of mobile measurement sites in Zhengzhou

5-1 二七商业区移动点中午温度比值

Midday temperature ratio of mobile measurement sites in Erqi commercial district

5-2 燕庄高层低密住宅区移动点中午温度比值

Midday temperature ratio of mobile measurement sites in Yanzhuang high-rise low density residential area

相关程度，相关系数达 0.687 7。武汉商业区气温比与区块内建筑密度相关性也是最高的，但相关系数仅有 0.449 1，次高为建筑高度，相关系数仅 0.407 7。郑州商业地块气温比与绿化覆盖率及建筑高度的关系均不显著，可能这一结果和该地块绿化覆盖率和建筑高度值偏小有关，故而绿化率和建筑密度在该街区内起不到关键性作用。而对郑州商业地块热环境影响显著的天空开阔度和建筑密度均与街道遮阴效果有关。

可以从结果看到，当天空开阔度值越高气温比越高，说明遮阴效果越好的地方气温越低。郑州商业区建筑密度相关性结果说明（图 6），建筑密度对气温比的影响存在拐点，当密度较小或密度较大时，气温比较低，当建筑密度在 40%~50% 左右时气温比最高，正好验证了之前对图 5 结果的推测。武汉商业地块气温比虽和建筑高度、建筑密度关系最显著，但相关系数却并不高，说明比较武汉和郑州两地，虽然都是在太阳辐射强度最高的时间段，但对于郑州这种干热环境下，建筑遮阴效果明显高于武汉这类湿度较大的城市。

图 7 给出了武汉后湖及郑州燕庄高层低密住宅区各采样地块午后气温比与天空开阔度、绿化覆盖率、建筑高度、建筑密度的相关性结果。不难发现，虽然同是高层低密住宅区，武汉地块中气温比值同空间形态各项指标间的联系更为紧密，特别是同建筑高度的相关系数甚至高达 0.839 6。而郑州燕庄住宅区气温比值与以上各空间形态指标相关性并不大，虽然郑州住宅区气温比同天空开阔度、建筑密度间存在相关性，但相关系数却仅有 0.461 3（天空开阔度）和 0.432 8（建筑密度）。对比郑州商业区结果和住宅区结果仍能看出，郑州热环境关键影响因素并不会因为用地属性的改变而有明显的变化，但不同的是，郑州商业区建筑密度范围较广（20%~80%），而高层低密住宅区建筑密度范围较窄（10%~30%）。郑州住宅区天空开阔度变化趋势和商业区类似，天空开阔度由小变大过程中气温比由大变小再变大，存在明显的拐点。

5 结语

本研究利用移动测量的方法，对夏热冬冷地区城市武汉和寒冷地区城市郑州夏季午后最热时间段气温值进行了记录和分析，旨在讨论不同气候分区典型城市的典型用地属性区域（商业区及高层低密住宅区），城市空间形态指标对城市热环境的影响机理与程度。通过对移动测量数据的分析我们发现，在夏季午后，建筑的遮阴效果是对城市气温影响最为关键性的因素。特别是对郑州商业区，建筑密度、天空开阔度 2 个因素最为关键，具有显著的相关性，相关性分别为 0.729 6 及 0.687 7，相比之下武汉商业区气温值与建筑遮阴效果的相关性不及郑州紧密，建筑密度、天空开阔度 2 个因素相关性仅 0.449 1 及 0.164 1，说明干热环境下太阳辐射对气温的升降起决定性因素，而湿热环境下却并不显著。而对于住宅区，郑州住宅区仍与建筑密度、天空开阔度的相关性最大，但相关系数均偏低，仅 0.432 8 和 0.461 3，这当然与郑州住宅区的建筑密度较低也存在一定的关系。武汉住宅区仅与建筑高度唯一相关，相关性超过 0.8。总体说来，郑州夏季午后气温值和城市空间形态的关系更为显著，并且建筑密度及天空开阔度与气温值的关系均存在一个拐点，并呈现出建筑密度两头低中间高，天空开阔度两头高中间低的趋势。而武汉地区热环境的影响因素似乎更为复杂一些，难以找到绝对关键的城市空间形态因素。因此，我们认为针对干热气候区热环境调节，遮阳是最关键的调节手段，而针对湿热气候区，我们还需要进一步研究来找到关键解决方案。

注释：

文中图表均为作者自绘。

参考文献 (References)：

[1] DOS SANTOS A, DE OLIVEIRA F, DA S, et al. Spatial and Temporal Distribution of Urban Heat Islands[J]. Science of the Total Environment, 2017(605): 946-956.

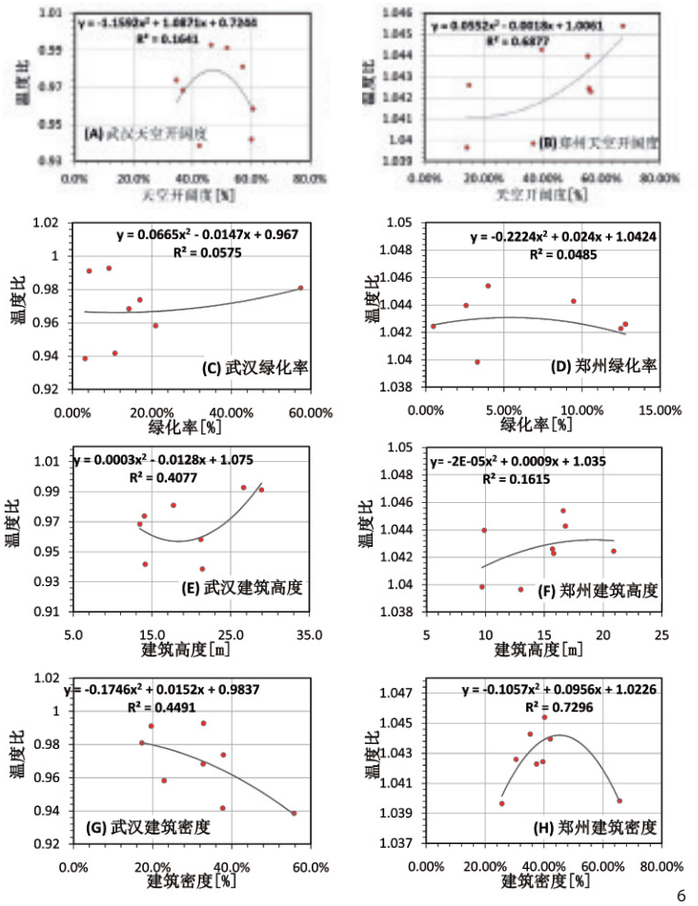
[2] FAHMY M, SHARPLES S. On the Development of an Urban Passive Thermal Comfort System in Cairo, Egypt[J]. Building and Environment, 2009(44): 1907-1916.

[3] SATO T, MURAKAMI S, OOKA R, YOSHIDA S. Analysis of Regional Characteristics of the Atmospheric Heat Balance in the Tokyo Metropolitan Area in Summer[J]. Journal of Wind Engineering and Indus-trial Aerodynamic, 2008(96): 1640-1654.

[4] NUNEZ M, OKE T. The Energy Balance of an Urban Canyon[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1977(16): 11-19.

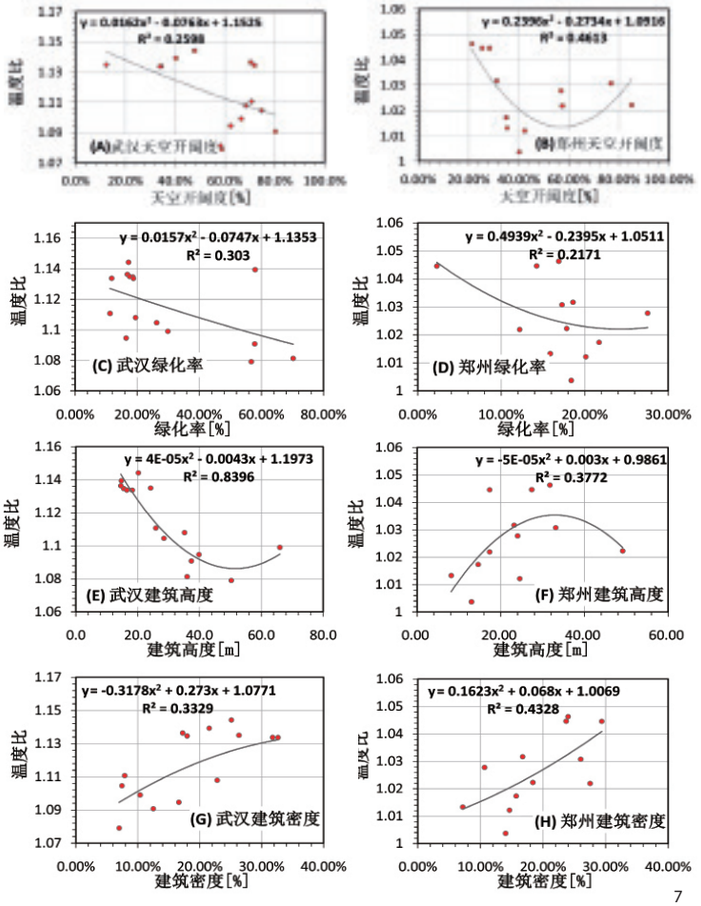
[5] LOPES A, SARAIVA J, ALCOFORADO M. Urban Boundary Layer Wind Speed Reduction in Summer Due to Urban Growth and Environmental Consequences in Lisbon[J]. Environmental Modelling & Software, 2011(26): 241-243.

[6] FU Peng, WENG Qihao. A Time Series Analysis of Urbanization Induced Land Use and Land



6

6 商业区移动测量路线中采样区块各空间形态指标与温度比相关性结果
Correlation of spatial form index and temperature ratio in sampling blocks of mobile measurement routes in commercial districts



7

7 高层低密住宅区移动测量路线中采样区块各空间形态指标与温度比相关性结果
Correlation of spatial form index and temperature ratio in sampling blocks of mobile measurement routes in residential areas

Cover Change and Its Impact on Land Surface Temperature with Landsat Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2016(175): 205-214.

[7] 邵钰涵,刘滨谊. 城市街道空间小气候参数及其景观影响要素研究[J]. 风景园林, 2016（10）: 98-104.
SHAO Yuhan, LIU Binyi. A Study on Microclimate Parameters of Urban Street Space and Its Influential Factors[J]. Landscape Architecture, 2016(10): 98-104.

[8] GERCEK D, GUVEN I, OKTAY I. Analysis of the Intra-City Variation of Urban Heat Island and Its Relation to Land Surface/Cover Parameters[J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016(3): 8-12.

[9] ARIANE M, KATHRIN H, ANTHONY J, et al. Impact of Urban Form and Design on Mid-afternoon Microclimate in Phoenix Local Climate Zones[J]. Landscape and Urban Planning. 2014(122): 16-28.

[10] ARIANE M, JONAS L, ROSS M. Sky View Factors from Synthetic Fisheye Photos for Thermal Comfort Routing: A Case Study in Phoenix, Arizona[J]. Urban Planning, 2017, 2(1): 19-30.

[11] ALI S B, PATNAIK S, MADGUNI O, Microclimate Land Surface Temperatures Across Urban Land Use/Land Cover Forms[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 3(3): 231-242.

[12] TANIA S, KOEN S, ANDREAS M, Microclimatic Modelling in Assessing the Impact of Urban Geometry on Urban Thermal Environment[J]. Sustainable Cities and Society, 2017(34): 293-308.

[13] ADACHI S, KIMURA F, KUSAKA H, et al. Moderation of Summertime Heat Island Phenomena via Modification of the Urban Form in the Tokyo Metropolitan Area[J]. American Meteorological Society, 2015(53): 1886-1900.

[14] DHIRGHAM A, MOHAMMED A, BUSHRA O. The Impact of Urban Form Configuration on the Urban Heat Island: The Case Study of Baghdad, Iraq[J]. Procedia Engineering 2016(145): 820-827.

[15] MOHAMMED A, BAKARMAN J, CHANG D. The Influence of Height/Width Ratio on Urban Heat Island in Hot-arid Climates[J]. Procedia Engineering, 2015 (118):101-108.

[16] YONG Xu, REN Chao, MA Peifeng, et al. Urban Morphology Detection and Computation for Urban Climate Research[J]. Landscape and Urban Planning, 2017 (167): 212-224.

[17] 刘琳，刘京，林姚宇，等. 多种城市地表形态的局地气候分析[J]. 建筑科学，2017，33（2）： 8-26.
LIU Lin, LIU Jing, LIN Yaoyu, et al. Local Climatic Analysis of Multiple Urban Surface Morphology[J]. Building Science, 2017, 33(2): 8-14.

[18] 杨春华，雷波，王业春，等. 基于 TM 的重庆市主城区热岛效应及其影响因子分析[J]. 应用基础与工程科学学报，2014，22（2）：227-238.
YANG Chunhua, LEI Bo, WANG Yechun, et al. Remote Sensing of the Spatial Pattern of Urban Heat Island Effects and Its Influencing Factors Using TM Data: A Case Study in Core Areas of Chongqing City[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 227-238.

[19] ZHAO Meiyan, CAI Hongyan, QIAO Zhi, et al. Influence of Urban Expansion on the Urban Heat Island Effect in Shanghai[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(12): 2421-2441.

[20] MILLS G. Simulation of the Energy Budget of an Urban Canyon Model Structure and Sensitivity Test[J]. Atmospheric Environment, 1993, 27B: 157-170.

[21] KRUGER E, DRACH P. Identifying Potential Effects from Anthropometric Variables on Outdoor Thermal Comfort[J]. Building and Environment, 2017(117): 230-237.

[22] 章莉，詹庆明，欧阳婉璐. 基于GIS的武汉市夏季风环境研究[J]. 风景园林，2017（3）：89-97.
ZHANG Li, ZHAN Qingming, OUYANG Wanlu. GIS Based Summer Wind Environment Analysis in Wuhan[J]. Landscape Architecture, 2017(3): 89-97.

（编辑 / 宋恬恬）