See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/371562487

Urban Heat Island Effect in Shijiazhuang: From the Canopy to the Surface and Deep Layers of Soil

Article · June 2023

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22089

citations	READS
0	41
5 authors, including:	Guoyu Ren
Tao Bian	China University of Geosciences
20 PUBLICATIONS 210 CITATIONS	359 PUBLICATIONS 11,077 CITATIONS
SEE PROFILE	SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Extreme climate change and its mechanisms over East Asian monsoon region View project

Change in extreme climate over East Asian Monsoon Region (EAMR) View project

卞韬, 任国玉, 刘思廷, 等. 2023. 石家庄城市热岛效应:从冠层、表层到土壤深层 [J]. 气候与环境研究, 28(4): 1-12. Bian Tao, Ren Guoyu, Liu Siting, et al. 2023. Urban Heat Island Effect in Shijiazhuang: From the Canopy to the Surface and Deep Layers of Soil [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 28 (4): 1-12. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22089

石家庄城市热岛效应:从冠层、表层到土壤深层

卞韬^{1,2,3} 任国玉^{2,4} 刘思廷^{1,3} 范欣^{1,3} 贾文茜⁵

1河北省石家庄市气象局,石家庄 050081
 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系,武汉 430074
 3河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050081
 4中国气象局国家气候中心,北京 100081
 5湖北省气象服务中心,武汉 430205

摘 要 利用石家庄城市气象站和附近 2 个乡村站 2009~2012 年的逐日地面气温、0~320 cm 土壤温度资料, 对比分析了石家庄站从冠层、表层到土壤深层的城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)及其差异,结果表明: 1) 2009~2012 年年平均气温 UHI 强度为 0.9℃, 0~320 cm 土壤温度 UHI 强度在-0.5℃~0.2℃ 之间,气温 UHI 强度明显强于土壤温度 UHI。表层(0 cm)和浅层(5~40 cm)土壤温度基本表现为"热岛效应",但深层 (80~320 cm)土壤温度表现为"冷岛效应",40~80 cm 是二者的转换层位;深层土壤温度可能受局地气候影 响呈现出局地性特点。2) 春季、夏季、秋季、冬季气温 UHI 强度分别为 1.1℃、0.6℃、0.7℃ 和 1.3℃,夏季最 弱,冬季最强。春季和夏季表层和 40 cm 以上土壤温度表现为热岛,80 cm 以下表现为冷岛;秋季不同深度土壤 温度均表现为冷岛,320 cm 深度冷岛强度最强;冬季表层和 80 cm 以上土壤温度主要表现为热岛,320 cm 深度 表现为冷岛;土壤表层热岛强度季节性变化,与气温的基本一致,其物理机制相似。3) 各月气温 UHI 强度在 0.5~1.6℃之间,1 月最强,7 月和 10 月最弱。表层和 40 cm 以上土壤温度一般在 1~7 月和 12 月表现为热岛, UHI 强度多为 6 月最强,8~11 月表现为冷岛;80 cm 以下土壤温度也有较为明显的日变化特征,但随土壤深 度加大,土壤温度 UHI 强度的日变化逐渐减弱,并最终转化为冷岛效应。

 关键词
 石家庄
 城市热岛效应
 气温城市热岛
 地温城市热岛
 季节变化
 日内变化

 文章编号
 1006-9585(2023)04-0001-12
 中图分类号
 P463.1
 文献标识码
 A

 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22089

 <th</th>
 <th</th>

 <

Urban Heat Island Effect in Shijiazhuang: From the Canopy to the Surface and Deep Layers of Soil

Bian Tao^{1, 2, 3}, Ren Guoyu^{2, 4}, Liu Siting^{1, 3}, Fan Xin^{1, 3}, and Jia Wenqian⁵

1 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081

- 2 Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074
- 3 Meteorological and Eco-environmental Key Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang 050081
- 4 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081
- 5 Meteorological Service Center of Hubei Province, Wuhan 430205

Abstract Based on the daily observational data of air temperature and the soil temperature at a depth of 0–320 cm at the

通讯作者 任国玉, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

收稿日期 2022-07-28; 网络预出版日期 2023-01-10

作者简介 卞韬,女,1977年出生,硕士,正高级工程,主要研究方向为城市气象和气候。E-mail: biantao0107@163.com

气 候 与 环 境 研 究	28 卷
Climatic and Environmental Research	Vol. 28

Shijiazhuang urban meteorological station and two nearby rural stations from 2009 to 2012, the urban heat island (UHI) effect from the canopy to the surface and deep layers of soil at Shijiazhuang station and its differences were compared and analyzed. The results revealed that: 1) the annual average air temperature UHI intensity from 2009 to 2012 was 0.9°C, the UHI intensity of the soil temperature at a depth of 0-320 cm was between -0.5°C and 0.2°C, and the air temperature UHI intensity was substantially stronger than that of the soil temperature. The surface (0 cm) and shallow (5-40 cm) soil temperatures exhibited a "heat island effect," the deep (80-320 cm) soil temperature exhibited a "cold island effect," and the soil temperature at a depth of 40-80 cm was the "conversion horizon" of the two. Deep soil temperature, which may be impacted by the local climate, demonstrated local characteristics. 2) The air temperature UHI intensities during spring, summer, autumn, and winter were 1.1°C, 0.6°C, 0.7°C, and 1.3°C, respectively; the seasons exhibiting the strongest and weakest UHI intensities were winter and summer, respectively. Furthermore, the soil temperatures at the surface layer and above 40 cm exhibited the heat island effect, and those below 80 cm exhibited the cold island effect. During autumn, the soil temperature at different depths exhibited the cold island effect, with the intensity of the cold island effect at a depth of 320 cm being the strongest. During winter, the soil temperatures at the surface layer and above 80 cm predominantly exhibited the heat island effect, whereas those at a depth of 320 cm exhibited the cold island effect. The seasonal variation of the soil surface UHI intensity was consistent with that of the air temperature, and its physical mechanism exhibited similar properties. 3) The air temperature UHI intensity in each month was between 0.5°C and 1.6°C, with the strongest intensity observed during January and the weakest intensity observed during July and October. The soil temperatures at the surface layer and above 40 cm generally exhibited the heat island effect from January to July and December, with the UHI intensity peaking during June, and exhibited the cold island effect from August to November. The soil temperature below 80 cm exhibited the cold island effect for the majority of the year. 4) The UHI intensities of the annual and seasonal average air temperatures clearly exhibited diurnal variation characteristics; the annual and seasonal surface soil temperatures exhibited similar characteristics. However, with the increase in soil depth, the diurnal variation of soil temperature UHI intensity gradually weakened and finally transformed into the cold island effect.

Keywords Shijiazhuang, Urban heat island effect, Air temperature UHI, Soil temperature UHI, Seasonal variation, Daily variation

1 引言

城市热岛效应(Urban Heat Island Effect, UHI) 是城市气候最显著的特征之一,在全球气候变化尤 其是全球增温过程中扮演着重要角色,被认为是主 导整个城市生态环境的重要因素之一(Oke, 1995; 陈云浩等, 2003)。城市热岛可改变城市气候和城 市生态系统,影响城市冠层和边界层物质循环和能 量流动,加重大气污染(黄宏涛等,2015)。城市 热岛效应加剧了夏季城市高温出现的频率和高温灾 害,并因此带来了巨大的经济损失(张雷等,2020); 同时,城市热岛环流可能使城区和下风方向对流增 强,使得城市更易于出现洪涝灾害(胡华浪等, 2005; Yang et al., 2017; Luo and Lau, 2019)。城市 热岛效应有利的影响主要表现在:显著减少冬季寒 潮冷空气强度,降低敏感人群患病风险;显著减少 冬季建筑取暖能耗,有助于城市节省能源(陈莉等, 2007; http://www.wcdx.net/index.php?app=Cms&m=

Index&a=content&catid=31&id=8898[2018-11-01]; Meng et al., 2018)。

国内外学者用不同方法对世界不同纬度、不同 规模(大、中、小)的城市热岛现象进行了大量研 究(刘施含等, 2019)。从现有城市热岛的成果来 看,多是针对气温城市热岛或地表温度城市热岛进 行研究,而对土壤深层热岛的研究很少。陆地下垫 面过程是引起气候变化和气候异常的重要因子之一, 它主要通过下垫面反射率、土壤湿度及土壤热储 量3个方面来影响天气气候的变化(汤懋苍等, 1982)。城市化的发展给地表环境带来深远的影响 (Brazel et al., 2000)。原有的自然绿地被大规模 转化为城市用地,草地和树林被水泥和沥青等人造 材料所替代,极大地改变了自然界物质和能量的循 环方式,破坏了整个生态系统应有的平衡(Pataki et al., 2006; Pouvat et al., 2007), 对地表和地下储 热及热交换方式造成了深刻影响,是城市气候形成 和演化的重要因素。

Menberg et al. (2013) 发现,在许多城市的地 下,普遍存在持续的热异常(城市地下热岛),导 致城市含水层变暖。Benz et al. (2016)利用卫星 获得的地表温度和插值地下水温度测量,比较了德 国4个城市两种热岛的空间特性,发现城市热岛现 象既存在于地面上,也存在于地面下,这些区域通 过传导热传输进行耦合,两种热岛相关性高达80%。 Tang et al. (2011)利用南京市城乡两个地点连续 1年的土壤温度(地面以下10、20、30、40、50、 60、100、150 cm) 监测数据, 研究城市化进程对 土壤温度的影响,结果表明:从空间平均看,城市 土壤温度比乡村高1.21℃,土壤温度变化一般随深 度增加而减小,城市化对土壤温度的影响主要发生 在小于 60 cm 的深度。Lokoshchenko and Korneva (2012) 对比分析了自 19 世纪末以来 114 年莫斯 科市及其郊区不同深度的土壤温度,结果表明:城 市内部的土壤温度比城市外部的农村地区高 0.5~1.0℃(市中心甚至高达1.5~2.0℃),这一 现象在 320 cm 以下的任何深度都被发现。

华北地区处于温带季风区,是我国城市化最迅速的区域之一,坐落着北京、天津、石家庄等多个特大型城市。关于华北地区特大城市的气温和地表温度城市热岛现象,已经开展了很多研究(韩素芹等,2007;王建凯等,2007;周纪等,2008;Yang et al.,2014;Bian et al.,2015;刘伟东等,2016;Wang et al.,2017;孙应龙等,2020)。但是,对于华北地区城市土壤不同深度温度城市热岛特征以及冠层和表层及深层 UHI 之间的差异性,目前还缺乏系统了解。

石家庄站曾长期处于城市中,是华北地区有代 表性的城市气象站。本文利用石家庄城、郊气象观 测站地面气温和 0~320 cm 地表温度资料,对比分 析从冠层、表层到土壤深层的城市热岛效应。本文 的研究成果对深入理解不同类型城市热岛时空结构, 制定城市和生态环境可持续发展规划,具有一定参 考意义。

2 资料和方法

2.1 资料

选取石家庄市区气象站(国家基本气象站)为 城市站,藁城、元氏2个气象站(国家一般气象站) 为郊区站。3个气象站逐日平均气温和0~320 cm 平均地表温度资料由石家庄市气象局业务科技科进 行了质量控制,订正了由于各种人为因素造成的错 误值。数据起止时间为 2009~2012 年,由于 2 个 郊区站 2009 年才有深层地温的观测数据,而石家 庄站在 2013 年 1 月 1 日迁站,所以选取这四年的 数据进行分析。在4年内,所有台站没有经历迁站, 也没有更换观测仪器,因此不大可能存在重大资料 非均一性。石家庄是河北省的省会,地处太行山脉 东麓,华北平原西侧,近30多年城市化进程迅速。 石家庄气象站自 1955 年建站以来至 2012 年 12 月 31 日未迁过站,由建站初期位于城市西郊发展成 一个典型的城市气象观测站(图1)。2个郊区站 实际上是小城镇站,为县城所在地,分布在石家庄 站东、南2个方向,平均海拔高度为60.0m,与市 区站高度(81.0 m)接近,距离石家庄市区均在20 km 以上,人口密度小,城镇人口均在10万左右,经 济发展相对缓慢,城镇化进程较低,观测场周围的 探测环境受城镇化影响较弱,可以作为石家庄地区 最具有代表性的"乡村站"。这3个站也多次被应 用在城市热岛或城市化影响分析中(卞韬等, 2012; Bian et al., 2015, 2017).

2.2 方法

城市热岛至少可以分成冠层(大气)、表层和 深层城市热岛(Oke et al., 2017)。城市热岛强度 一般定义为城区温度与郊区温度之差(Howard,



图 1 石家庄地区 3 个气象观测站分布及站点周围卫星遥感反演的 土地利用和土地覆盖情况

Fig. 1 Distributions of the three stations and the land use and cover of the satellite image map of the stations in the Shijiazhuang area

1833)。本文分析的是 1.5 m 气温、0 cm 地表温度 和土壤 5~320 cm 不同深度层城、乡之间的温度差 异,分别称为"气温城市热岛"(Air temperature UHI)和"土壤温度城市热岛"(Soil temperature UHI),后者又分"表层温度城市热岛"(Surface temperature UHI)和"深层温度城市热岛"(Ground temperature UHI);把城区与郊区站气温、地表和 地下不同层次温度之差分别定义为"气温城市热岛 强度"、"表层温度城市热岛强度"和"深层温度 城市热岛强度"。

本文采用气象季节划分方法,12月至次年2 月为冬季,3~5月为春季、6~8月为夏季、 9~11月为秋季。夜间是指20:00(北京时间,下 同)至次日08:00,白天是指08:00至20:00。城市 热岛强度以石家庄城市站与2个郊区站平均气温的 差值ΔT来表示:

$$T = T_c - T_s, \tag{1}$$

$$T_s = (T_h + T_y)/2,$$
 (2)

其中, *T*_c、*T*_s分别为石家庄城市站气温或土壤温度、 2个郊区站气温或土壤温度的平均值, *T*_h、*T*_y分别 为郊区站藁城、元氏的气温或土壤温度。

当 Δ*T* 为正值时,就是通常所说的 UHI;当 Δ*T* 为负值时,表明城市站气温或土壤温度低于乡 村站,称为城市冷岛效应。

3 结果分析

3.1 UHI 的季节特征

图 2 给出了 2009~2012 年石家庄年平均气温、 不同深度土壤温度及 UHI 强度,可以看到,年平 均气温 UHI 强度为 0.9℃, 0~320 cm 土壤温度 UHI 强度在-0.5~0.2℃之间,气温 UHI 强度明显 强于土壤温度 UHI。0 cm、5 cm、15 cm、20 cm 和 40 cmUHI 强度均为正值,其中 0 cm、15 cm 和 40 cmUHI 强度最强,均为 0.2°C。10 cm、80 cm、 160 cm 和 320 cm 土壤温度 UHI 强度均为负值,分 别为-0.2℃、-0.1℃、-0.2℃和-0.5℃,即这四个深 度表现为"冷岛",且 80~320 cm 冷岛强度随深 度逐渐增强, 320 cm 的冷岛强度最强; 80 cm UHI 强度为-0.1°C,是地下温度 UHI 强度由正值向负值 转换水平层。以上分析表明:表层(0 cm)和浅层 (5~40 cm) 土壤温度基本表现为"热岛效应", 深层(80~320 cm)土壤温度表现为"冷岛效应", 40~80 cm 是二者的转换层位。

从四季来看(图3),春、夏、秋、冬平均气 温UHI强度分别为1.1℃、0.6℃、0.7℃和1.3℃, 夏季最弱,秋季次弱,冬季最强,春季次强。春季



图 2 2009~2012 年石家庄城乡年平均气温、不同深度(a) 土壤温度及(b) UHI 强度

Fig. 2 Annual average air and soil temperatures at different depths of the urban and rural stations (a) and urban heat island intensity (b) in Shijiazhuang during 2009–2012



图 3 2009~2012 年石家庄四季平均气温、不同深度土壤温度热岛强度 Fig. 3 Urban heat island intensity of the seasonal average air and soil temperatures at different depths in Shijiazhuang during 2009–2012

不同深度的土壤温度 UHI 强度在-0.2~0.3℃ 之间, 40 cm 及以浅 UHI 强度以正值为主, 0 cm、15 cm 和 40 cmUHI 强度最强; 80 cm 及以深 UHI 强度均 为负值,为"冷岛",160 cm 和 320 cm 冷岛强度 最强。夏季不同深度的土壤温度 UHI 强度在-0.4~0.7℃之间, 40 cm 及以浅 UHI 强度以正值为 主, 40 cmUHI 强度最强; 80 cm 及以深 UHI 强度 均为负值,160 cm 冷岛强度最强。秋季不同深度 土壤温度 UHI 强度均为负值,在-0.5~-0.1℃之间, 均表现为"冷岛", 320 cm 冷岛强度最强, 15 cm 和 80 cm 冷岛强度最弱。冬季各深度土壤温度 UHI 强度在-0.7~0.3°C, 40 cm 和 320 cmUHI 强度 为负值, 320 cm 冷岛强度最强; 160 cmUHI 强度 为0,即此深度无UHI现象;其他深度UHI强度 均为正值,0 cm、15 cm 和 80 cmUHI 强度最强。 较为特殊的是 10 cm 土壤温度 UHI 强度在春季、 夏季和冬季均为负值, 表现为"冷岛", 与相邻深 度均表现为"热岛"不一致。

3.2 UHI 的月际特征

从各月来看(图 4),1~12月气温UHI强度 在 0.5~1.6℃之间,1月最强,7月和10月最弱。 0 cm 土壤温度各月UHI强度在-0.4~0.6℃之间: 1~7月、12月为正值,6月UHI强度最强; 8~11月为负值,9月冷岛强度最强,11月UHI强 度为 0。5 cm 土壤温度各月UHI强度同样在-0.4~0.6℃之间:1~7月、12月为正值,6月



图 4 2009~2012 平石豕庄吞月气温、不问沐及工速温度热动强度

Fig. 4 Urban heat island intensity of the monthly average air and soil temperatures at different depths in Shijiazhuang during 2009–2012

UHI 强度最强; 8~11 月为负值, 10 月冷岛强度最强。10 cm 土壤温度各月 UHI 强度在-0.6~0.1℃之间: 2 月、3 月和 12 月 UHI 强度为正值,均为 0.1℃; 1 月和 6 月 UHI 强度为 0,其他 7 个月为 负值,8~10 月冷岛强度最强。15 cm 土壤温度各 月 UHI 强度在-0.4~0.6℃之间:1~7 月为正值,3 月和 6 月最强;8~12 月为负值,10 月冷岛强度 最强。20 cm 土壤温度各 月 UHI 强度在-

0.5~0.5℃之间: 1~3 月和 5~7 月为正值,6月 UHI 强度最强;8-11 月为负值,10 月冷岛强度最 强;4 月和 12 月 UHI 强度为 0。40cm 土壤温度各 月 UHI 强度在-0.9~1.4℃之间:2-8 月为正值,6 月 UHI 强度最强;1 月、9-12 月为负值,11 月冷 岛强度最强。

80 cm 土壤温度各月 UHI 强度在-0.6~0.5°C 之间: 1~3月、12月为正值,1月和2月 UHI 强 度最强;4~6月、8~11月为负值,5月冷岛强度 最强,7月 UHI 强度为0。160 cm 土壤温度各月 UHI 强度在-0.6~0.2°C 之间:1月和2月为正值, 2月 UHI 强度最强;4~12月为负值,6月冷岛强 度最强,3月 UHI 强度为0。320 cm 土壤温度各 月 UHI 强度在-0.9~0.0°C 之间:6月 UHI 强度为 0,其余各月均表现为冷岛,1月冷岛强度最强,5 月和7月最弱(-0.1°C)。

3.3 UHI 的日变化特征

3.3.1 年热岛强度的日变化

从图 5 可以看到, 年平均气温 UHI 强度具有 明显的日变化特征, 07:00 UHI 强度(1.6°C) 最强, 14:00 至 16:00(0.3°C) 最弱。0~15 cm 年平均土 壤温度 UHI 强度有较为明显的日变化特征, 20~320 cm 的日变化很微弱, 基本上是土壤深度 越深, 土壤温度 UHI 强度的日变化越弱。

0 cm 土壤温度 UHI 强度在 21:00 至次日 04:00 基本保持不变(0.2°C),05:00 开始有所增强;



图 5 2009~2012 年石家庄年平均气温、不同深度土壤温度热岛 强度的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of the urban heat island intensities of the annual average air and soil temperatures at different depths in Shijiazhuang during 2009–2012

07:00 至 12:00 处于高峰,在 0.3~0.4℃,07:00 至 08:00 和 11:00 最强;12:00 后 UHI 强度持续减弱,14:00 至 18:00 处于最低谷 (-0.1~0℃),15:00 至 16:00 和 18:00 最弱,14:00 和 17:00 UHI 强度 为 0,说明此时刻无 UHI 现象;之后 19:00 至 20:00 快速增强至 0.3℃。表层土壤温度 UHI 强度 开始上升时间,比气温 UHI 强度滞后 4 个小时左右,达到峰值时间与后者一致,但峰值持续时间 长 1 小时;开始下降时间比气温 UHI 滞后 4 个小时,达到谷值时间只滞后 1 个小时左右。

5 cm 土壤温度日内各时刻热岛强度在 0~0.2°C之间(图 5),20:00至22:00、06:00和 12:00至13:00 UHI强度最强,07:00至19:00 UHI 强度为0,其余时刻均为0.1°C。10 cm 地温日内各 时刻 UHI强度在-0.4~0°C之间,22:00至次日 02:00、06:00 UHI强度为0,其余时刻均表现为" 冷岛":11:00至14:00冷岛强度最强。15 cm 土壤 温度日内各时刻 UHI强度在 0.1~0.3°C之间, 19:00至次日01:00处于高峰,UHI强度基本为 0.3°C;08:00至16:00处于低谷,UHI强度多为 0.1°C。

20 cm 土壤温度日内各时刻 UHI强度在 0~0.1°C之间,仅 21:00 UHI强度为 0.1°C,其他 时刻 UHI强度均为 0°C,无 UHI现象。40 cm 土 壤温度日内各时刻 UHI强度在 0.1~0.3°C之间, 21:00 UHI强度最强,05:00 至 19:00 UHI强度处于 低谷,多为 0.1°C。80 cm 地温日内各时刻 UHI强 度在 -0.1~0°C之间,21:00、05:00 至 08:00、 16:00 至 18:00 冷岛强度均为-0.1°C,其他时刻无 UHI现象。

160 cm 和 320 cm 土壤温度日内各时刻 UHI 强 度均为负值,即表现为"冷岛"。160 cm 土壤温 度日内各时刻冷岛强度多为-0.2°C,11:00 至 13:00 为-0.3°C;320 cm 土壤温度各时刻冷岛强度 多-0.5°C,21:00 和 23:00 为-0.4°C。

从图 6 可以看到,全年气温夜间 UHI 强度明显强于白天,0 cm、5 cm、15 cm、20 cm 和 40 cm 土壤温度全年夜间 UHI 强度均强于白天,10 cm、160 cm 和 320 cm 土壤温度全年夜间冷岛强度均强于夜间,80 cm 土壤温度全年夜间冷岛强度和白天相同。

3.3.2 四季 UHI 强度的日变化

从年 UHI 强度的日变化看,气温和 0 cm 土壤

温度的日变化更明显,前边做了重点分析。从四季 来看(图7),春季气温UHI强度早晨07时最强 (1.9℃),16时最弱(0.4℃);夜间平均UHI



图 6 2009~2012 年石家庄年平均气温和土壤温度夜间和白天热 岛强度对比(短线表示一个标准差)

Fig. 6 Comparison of the nighttime and daytime urban heat island intensities of the annual average air and soil temperatures in Shijiazhuang during 2009–2012 (the short line denotes one standard deviation)

强度为 1.32℃ (表一), 白天为 0.78℃, 夜间比 白天强 0.54℃。0 cm 土壤温度 UHI 强度在 11:00 最强为 0.7℃, 18:00 最弱为-0.1℃; 夜间平均 UHI 强度为 0.18℃, 白天为 0.34℃,白天比夜间强。春 季表层 UHI 强度达到峰值时间比气温滞后 4 小时 左右,达到谷值时间滞后 2 个小时左右。

夏季气温 UHI 强度 06:00 至 07:00 最强 (1.2°C), 14:00 至 17:00 最弱,仅为 0.2°C;夜间平均 UHI 强度为 0.89°C,白天为 0.37°C,夜间比白天强 0.52°C。0 cm 土壤温度 UHI 强度在 07:00 最强为 0.6°C,18:00 最弱为-0.3°C;夜间平均 UHI 强度为 0.21°C,白天为 0.18°C,夜间略强于白天。夏季表 层 UHI 强度达到峰值时间比气温滞后 1 小时左右, 达到谷值时间滞后 4 个小时左右。

秋季气温 UHI 强度早晨 08:00 最强 (1.4℃), 14:00 至 17:00 最弱 (0.2℃),夜间平均 UHI 强度 为 0.83℃,白天为 0.58℃,夜间比白天强 0.25℃。 0 cm 土壤温度日内各时刻主要表现为冷岛,仅 07:00 至 09:00 表 现 为 热 岛 , UHI 强 度 在 0.1~0.2℃,14:00 至 16:00 冷岛强度最强为-0.6℃; 夜间平均冷岛强度为-0.06℃,白天为-0.31℃,冷



图 7 2009~2012 年石家庄四季平均气温和 0 cm 土壤温度热岛强度的日变化

Fig. 7 Diurnal variation of the urban heat island intensities of the seasonal average air and 0 cm soil temperatures in Shijiazhuang during 2009–2012

岛强度白天强于夜间。

冬季气温 UHI 强度 08:00 最强,达到 2.2°C, 15:00 最弱(0.3°C);夜间平均 UHI 强度为 1.78°C,白天为0.94°C,夜间比白天强0.84°C。0 cm 土壤温度 UHI 强度在 04:00 和 18:00 至 20:00 最强 (0.4°C),09:00 和 14:00 至 16:00 最弱(0.1°C); 夜间平均 UHI 强度为0.30°C,白天为0.23°C,夜 间略强于白天。

4 讨论

本文分析表明,2009~2012年石家庄年平均 气温 UHI 强度为 0.9°C。研究表明:一般百万人口 以上的大城市平均气温约高于郊区 0.5~1.0°C (Yang et al., 2013; 贾文茜等, 2021),可见本文的 结果是具有代表性的; 卞韬等(2012)以前的研究 结论是,1962~2009年石家庄站平均气温的 UHI 强度为 0.7°C,这可能和当时选用 4 个乡村站作为 参考站有关,也可能与石家庄站的 UHI 强度对事 件呈增强趋势有关。

4.1 土壤温度 UHI 强度的年际特征

石家庄站 2009~2012 年表层土壤温度的 UHI

表 1 2009~2012 年石家庄四季平均气温和 0 cm 土壤温度 的昼夜 UHI 强度

Table 1Nighttime and daytime urban heat islandintensities of the seasonal average air temperature and 0-cmsoil temperature in Shijiazhuang during 2009–2012

	平均气温热	∖岛强度/°C	0 cm土壤温度热岛强度/°C			
	夜间	白天	夜间	白天		
春季	1.32	0.78	0.18	0.34		
夏季	0.89	0.37	0.21	0.18		
秋季	0.83	0.58	-0.06	-0.31		
冬季	1.78	0.94	0.30	0.23		

为 0.2°C,存在城市热岛现象,这与 Tang et al. (2011), Lokoshchenko and Korneva (2012), 施斌等(2012)、黄铁兰等(2018)、申嘉澍和李 麟宛(2021)的结论基本一致。施斌等(2012)利 用南京市 2009 年 6 月至 2010 年 6 月城市和郊区 的14:00 地温观测数据,分析了城市和郊区地温场 的差异,发现城市地温场年平均温度为19.23℃, 比郊区高 2.02°C,存在显著的 UHI 现象;施斌等 (2012) 是针对最高 0 cm 地温得出的 UHI, 比本 文的结果强的多应属正常,另外可能也与观测仪器 不同和观测时间只有1年有关。黄铁兰等(2018) 利用 1994年、1999年、2004年、2009年4个时 相的 Landsat5TM 星数据为数据源,对广州市 UHI 进行评估,他们的结果是:地表 UHI 强度普遍在 0~0.2℃, 少数超过 0.2℃, 这与本文的 UHI 接近。 申嘉澍和李麟宛(2021)利用 MODIS 遥感数据反 演的地表温度,计算出我国 31 个省会(直辖市) 城市 2018 年年平均 UHI 强度,石家庄的 UHI 强度 是 0.42℃, 比本文的结果略大, 但总体结论接近。

石家庄站表层(0 cm)和浅层(40 cm 以上) 土壤温度基本表现为"热岛效应",深层(80 cm 以深)土壤温度表现为"冷岛效应",40~80 cm 是二者的转换层位。从年际差异(表 2)可以看到, 各层土壤温度的热岛强度虽有所差异,但主要表现 特征基本一致。Tang et al.(2011)的结论是:土 壤温度变化一般随深度增加而减小,城市化对土壤 温度的影响主要发生在小于 60 cm 的深度。施斌等 (2012)的结论是:在 0~300 cm 深度内,城郊地 温差总体上随深度的增加有递增趋势。Lokoshchenko and Korneva(2012)的结果表明:城市内部的土 壤温度比城市外部的农村地区高的现象在 320 cm 以下的任何深度都被发现。本文的结论与 Tang et al. (2011)有相似处,但与施斌等(2012)、Lokoshchenko

表 2 2009~2012 年石家庄历年平均气温、不同深度土壤温度热岛强度()

Table 2	Urban heat isla	nd intensities	of the	annual	average	air ai	ıd soil	temperatures	s at	different	depths i	in	Shijiazhuar	ıg
during 20	09–2012													

		不同深度土壤温度热岛强度/°C								
年份	平均气温热岛强度/℃	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	40 cm	80 cm	160 cm	320 cm
2009年	1.10	0.38	0.44	-0.17	0.50	0.23	0.11	-0.28	-0.39	-0.56
2010年	0.91	0.05	0.04	-0.73	0.03	0.20	0.12	-0.06	-0.32	-0.53
2011年	0.89	0.11	0.02	0.12	0.18	0.02	0.54	-0.05	-0.08	-0.26
2012年	0.85	0.16	0.01	0.04	0.03	0.01	0.05	-0.06	-0.15	-0.54

and Korneva (2012)的结论不一致。说明深层土 壤温度有可能受局地气候影响呈现出局地性特点, 这也与申嘉澍和李麟宛(2021)得出的"中国城市 热岛强度的空间地理异质性"的结论一致。热量平 衡是 UHI 形成的能量基础,城市化改变了城市下 垫面的性质和结构,增加了人为热,从而影响了城 市热量平衡各分量的变化(杨士弘,2002)。

4.2 表层土壤温度 UHI 强度的季节特征

表层土壤温度 UHI 强度在春季和冬季最强, 夏季次之,秋季表层土壤温度表现为"冷岛";冬 季和夏季表层土壤温度夜间 UHI 强度略强于白天, 春季白天 UHI 强度强于夜间,秋季白天冷岛强度 强于夜间,整体上全年夜间 UHI 强度强于白天。 这与南京(杨英宝等,2006)、北京(周纪等, 2008)、青岛(周甜甜等, 2017)、西安(党元军 等, 2019)、长春(陈子琦等, 2020)表层城市热岛 的结论互不一致,但也有部分相同之处。杨英宝等 (2006) 通过对南京市 16景(每个季节 4 景图像 在 ERDAS 的 Spatial Modler 进行像元平均; 白天 MODIS 过境的时间是 10:30 左右,是 11:30 左右) MODIS 数据分析,得出南京市表层 UHI 强度秋季 最大,春季次之,其次是夏季,冬季最小。周纪等 (2008) 选取北京地区 2004~2006 年白天、夜间 质量较好的 30 幅 MODIS 1B 影像(遥感影响搭载 于 EOS-Terra 卫星上的 MODIS 传感器获取, Terra 卫星在 10:30 左右和夜间 22:30 左右过境),覆盖 了 12 个月,他们的结论是:夏季白天、夜间 UHI 明显,其余季节白天不存在 UHI 现象,夜间显著。 周甜甜等(2017)利用研究区域2001~2012年 416 幅连续、完整的 MODIS 地表温度产品数据, 分析了青岛市 UHI 的时空变化特征,结果表明: UHI 的季节变化明显, UHI 强度总体表现为冬季最 强,夏季最弱;UHI具有明显的日变化特征,表现 出昼弱夜强的特点。党元军等(2019)的研究发现, 西安除冬季的白天外, 四季地表温度均具有明显 的 UHI 岛效应,且不同季节的 UHI 强度存在明显 差异,春季最强,冬季最弱,整体上夜晚的 UHI 强度明显高于白天。陈子琦等(2020)基于中等分 辨率 2000~2018 年时段内 Landsat 影像热红外波 段的辐射信息,采用单窗算法,分别对长春市不同 年份的影像进行地表温度计算,结合相应时段内的 地面观测温度数据识别 UHI 时空变化。结果表明, 研究时段内长春市热岛效应的时序变化特征表现为

夜晚较白天强,秋冬较春夏强。

因此,已有研究表明,各地四季地表温度 UHI 强度表现出不一致的特征。影响 UHI 的因素 很多,但可能主要和城市的地理环境、城市规模、 性质、布局有关,也和土地利用类型、下垫面介质、 植被覆盖度等有关,还可能和城市内部的微观建筑、 环境和气候特征有关,例如天穹角、人口密度、建 筑物密度、人为热等有关(杨英宝等, 2006; 刘伟东 等,2016)。另外,卫星遥感反演的地表温度,和 气象站感测的土壤表层温度,可能存在一定差异, 致使根据不同数据计算得到的热岛强度季节性差异, 也不一样。关于土壤温度 UHI, 整体上表层土壤温 度夜间 UHI 强度强于白天,与气温 UHI 强度夜间 强于白天(卞韬等, 2012; 刘伟东等, 2016)的特点 相同。夜晚 UHI 明显的原因与市内的人工热源有 关,包括冬季取暖、交通运输、工业生产等方面; 同时由于夜晚易产生逆温现象,不利于空气的扩散, 造成了温度集中于市区(党元军等, 2019)。

土壤表层热岛强度季节性变化,与气温的基本 一致,表现为冬春季强,夏秋季弱,其物理机制也 是相似的,即温带城市冬春季取暖造成的人为热释 放可能起到很大作用,同时冬季逆温和相对浅的边 界层也有助于城市冠层、地表热量存储和集中分布。

土壤温度热岛强度总体上也是冬春季较强,夏 秋季较弱,秋季出现冷岛现象,这是因为城市冠层 和表层的热量,可以通过传导和对流等方式向下输 送,土壤中上层热岛现象的形成主要取决于冠层和 表层聚集的过量热量,因而表现出和冠层热岛相近 的季节性特点。但土壤温度热岛在秋季出现负值, 即冷岛现象,原因还需要进一步探讨,一个可能的 解释是, 乡村站土壤湿度较高, 温度降温更慢, 城 市站由于城市干岛效应的影响,土壤湿度小,降温 更快,城乡温差出现负值。中国北方内陆城市的城 市干岛效应,在秋季是最强的(Yang et al., 2017)。 此外,城市中高层建筑物形成的地表阴影,致使地 表接收的短波辐射减少,冠层中更高浓度的气溶胶 也造成地表接收的太阳辐射减少,导致土壤表层接 收的辐射明显少于郊区;但由于土壤表层还可以接 收来自人为的热释放以及城市冠层储存的热量,总 体仍能表现出热岛效应,而深层则难以通过传导和 对流等方式接收人为热和冠层热量,主要受地表明 显减少的短波辐射和净辐射影响,呈现出"冷岛 效应"。

5 结论

利用 2009~2012 年石家庄市区站和 2 个郊区 站逐日地面气温、0~320 cm 地表温度资料,对比 分析从冠层、表层到土壤深层的城市热岛效应,得 到以下主要结论:

(1)石家庄年平均气温热岛强度为 0.9℃, 0~320 cm 土壤温度热岛强度在-0.5~0.2℃之间, 气温热岛强度明显强于土壤温度。表层(0 cm)和 浅层(5~40 cm)土壤温度基本表现为"热岛效 应",深层(80~320 cm)土壤温度表现为"冷岛 效应",40~80 cm 是二者的转换层位。深层土壤 温度有可能受局地气候影响呈现出局地性特点。

(2)春季、夏季、秋季、冬季气温热岛强度 分别为1.1℃、0.6℃、0.7℃和1.3℃,夏季最弱, 冬季最强。春季和夏季表层和40cm及以浅土壤温 度表现为热岛,80 cm及以深表现为冷岛;秋季不 同深度土壤温度均表现为冷岛,冷岛强度随深度强 弱相间,320 cm冷岛强度最强;冬季表层和80 cm 及以浅土壤温度主要表现为热岛,160 cm无热岛, 320 cm表现为冷岛。土壤表层热岛强度季节性变 化,与气温的基本一致,其物理机制相似。

(3)各月气温热岛强度在 0.5~1.6℃之间,
1月最强,7月和 10月最弱。表层和 40 cm 及以浅 土壤温度一般在 1~7月和 12月表现为热岛,热岛 强度多为 6月最强,8~11月表现为冷岛;80 cm
及以深土壤温度多数月份表现为冷岛。

(4)年和四季平均气温热岛强度具有明显的 日变化特征,年和四季表层土壤温度热岛强度有较 为明显的日变化特征,土壤深度越深,土壤温度热 岛强度的日变化越弱。

参考文献(References)

- Benz S A, Bayer P, Goettsche F M, et al. 2016. Linking surface urban heat islands with Groundwater temperatures [J]. Environ. Sci. Technol., 50(1): 70–78. doi:10.1021/acs.est.5b03672
- Bian T, Ren G Y, Yue Y X. 2017. Effect of urbanization on landsurface temperature at an urban climate station in North China [J]. Bound. -Layer Meteor., 165(3): 553–567. doi:10.1007/s10546-017-0282-x
- Bian T, Ren G Y, Zhang B X, et al. 2015. Urbanization effect on longterm trends of extreme temperature indices at Shijiazhuang station, North China [J]. Theor. Appl. Climatol. , 119(3–4): 407–418. doi:10.1007/s00704-014-1127-x

- 卞韬,任国玉,张翠华,等. 2012. 石家庄气象站记录的城市热岛效应及其趋势变化 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 4(5):
 402-408. Bian Tao, Ren Guoyu, Zhang Cuihua, et al. 2012. Characteristics and change of urban heat island intensity in Shijiazhuang [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 4(5): 402-408. doi:10.13878/j.cnki.jnuist.2012.05.002
- Brazel A, Selover N, Vose R, et al. 2000. The tale of two climates-Baltimore and Phoenix urban LTER sites [J]. Climate Res., 15(2): 123–135. doi:10.3354/cr015123
- 陈莉, 方修琦, 李帅. 2007. 气候变暖对中国严寒地区和寒冷地区南 界及采暖能耗的影响 [J]. 科学通报, 52(10): 1195-1198. Chen Li, Fang Xiuqi, Li Shuai. 2007. Impact of climate warming on the severe cold areas and the southern boundary of cold areas in China and heating energy consumption [J]. Chin. Sci. Bull. (in Chinese), 52(10): 1195-1198. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2007.10.017
- 陈云浩, 李京, 李晓兵. 2003. 城市空间热环境遥感分析: 格局、过程、 模拟与影响 [M]. 北京: 科学出版社, 9pp Chen Yunhao, Li Jing, Li Xiaobing. 2003. Remote Sensing Analysis on Thermal Environment of Urban Space: Pattern, Process, Simulation and impact (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 9pp.
- 陈子琦,张艳红,李叶,等. 2020. 基于遥感技术北方城市热岛效应变 化定量识别 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 38(3): 325-334. Chen Ziqi, Zhang Yanhong, Li Ye, et al. 2020. Quantitative identification of urban heat island effect variation in northern cities based on satellite remote sensing [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition) (in Chinese), 38(3): 325-334. doi:10. 3969/j.issn.1671-5896.2020.03.014
- 党元军, 崔国庆, 孙安利, 等. 2019. 基于 MODIS 数据的 2001-2018 年西安城市热岛效应研究 [J]. 测绘标准化, 35(2): 39-42. Dang Yuanjun, Cui Guoqing, Sun Anli, et al. 2019. On urban heat island effect in Xi'an city based on MODIS data from 2001 to 2018 [J]. Standardization of Surveying and Mapping (in Chinese), 35(2): 39-42.
- 韩素芹, 郭军, 黄岁樑, 等. 2007. 天津城市热岛效应演变特征研究 [J]. 生态环境, 16(2): 280-284. Han Suqin, Guo Jun, Huang Suiliang, et al. 2007. Study on the evolution of urban heat island in Tianjin city [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 16(2): 280-284. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2007.02.003
- Howard L. 1833. The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations [M]. London: Harvey and Darton Press
- 胡华浪, 陈云浩, 宫阿都. 2005. 城市热岛的遥感研究进展 [J]. 国土资源遥感, (3): 5-13. Hu Hualang, Chen Yunhao, Gong Adu. 2005. Advances in the application of remotely sensed data to the study of urban heat island [J]. Remote Sensing for Land & Resources (in Chinese), (3): 5-9, 13. doi:10.3969/j.issn.1001-070X.2005.03.002
- 黄宏涛, 吴荣军, 王晓云, 等. 2015. 城市热岛效应研究进展 [J]. 河南 科 学, 33(7): 1214-1220. Huang Hongtao, Wu Rongjun, Wang Xiaoyun, et al. 2015. Research of urban heat island effect [J]. Henan Science (in Chinese), 33(7): 1214-1220.
- 黄铁兰, 刘慧忠, 柯锦灿. 2018. 基于 Landsat TM 卫星数据的广州城 市热岛效应特征研究 [J]. 北京测绘, 32(8): 891-896. Huang

Tielan, Liu Huizhong, Ke Jincan. 2018. Research on urban heat island effect of Guangzhou based on landsat TM data [J]. Beijing Surveying and Mapping (in Chinese), 32(8): 891–896. doi:10.19580/j. cnki.1007-3000.2018.08.003

- 贾文茜, 任国玉, 于秀晶, 等. 2021. 中国东部季风区不同气候带城市 热岛效应的差异 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 569-582. Jia Wenqian, Ren Guoyu, Yu Xiujing, et al. 2021. Difference of urban heat island effect among representative cities of different climatic zones over eastern China monsoon region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26(5): 569-582. doi:10.3878/j. issn.1006-9585.2021.20149
- 刘施含,曹银贵,贾颜卉,等. 2019. 城市热岛效应研究进展 [J]. 安徽 农学通报, 25(23): 117-121. Liu Shihan, Cao Yingui, Jia Yanhui, et al. 2019. Progress of urban heat island effect [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 25(23): 117-121. doi:10. 3969/j.issn.1007-7731.2019.23.047
- 刘伟东, 尤焕苓, 孙丹. 2016. 1971-2010 年京津冀大城市热岛效应多 时间尺度分析 [J]. 气象, 42(5): 598-606. Liu Weidong, You Huanling, Sun Dan. 2016. Multi-time scale analysis of megacities heat island effect in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1971 to 2010 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(5): 598-606. doi:10. 7519/j.issn.1000-0526.2016.05.009
- Lokoshchenko M A, Korneva I A. 2012. Underground urban 'heat island' below Moscow city and dynamics of the soil temperature [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climate. Dublin, Ireland,doi:10.13140/2.1.3355.8085
- Luo M, Lau N C. 2019. Urban expansion and drying climate in an urban agglomeration of East China [J]. Geophys. Res. Lett., 46(12): 6868–6877. doi:10.1029/2019GL082736
- Menberg K, Bayer P, Zosseder K, et al. 2013. Subsurface urban heat islands in German cities [J]. Sci. Total Environ., 442: 123–133. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.043
- Meng F C, Li M C, Cao J F, et al. 2018. The effects of climate change on heating energy consumption of office buildings in different climate zones in China [J]. Theor. Appl. Climatol. , 133(1-2): 521–530. doi:10.1007/s00704-017-2206-6
- Oke T R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effect [M]//Cermak J E, Davenport A G, Plate E J, et al. Wind Climate in Cities. Dordrecht: Springer, 81–107. doi:10.1007/978-94-017-3686-2_5
- Oke T R, Mills G, Christen A, et al. 2017. Urban Climates [M]. New York: Cambridge University Press, 525pp. doi:10.1017/9781139016476
- Pataki D E, Alig R J, Fung A S, et al. 2006. Urban ecosystems and the North American carbon cycle [J]. Global Change Biol., 12(11): 2092–2102. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01242.x
- Pouyat R V, Pataki D E, Belt K T, et al. 2007. Effects of urban land-use change on biogeochemical cycles [M]//Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F. Terrestrial Ecosystems in A Changing World. Berlin: Springer, 45–58. doi:10.1007/978-3-540-32730-1_5
- 申嘉澍,李麟宛. 2021. 中国城市热岛效应—31 个城市热岛强度的定量分析 [J]. 建筑与文化, 206(5): 194-195. Shen Jiashu, Li

Linwan. 2021. Urban heat island effect in China: A quantitative analysis of heat island intensity in 31 cities [J]. Architecture & Culture (in Chinese), 206(5): 194–195. doi:10.19875/j.cnki.jzywh. 2021.05.076

- 施斌, 唐朝生, 高磊, 等. 2012. 城市和郊区浅部地温场差异 [J]. 工程 地质学报, 20(1): 58-65. Shi Bin, Tang Chaosheng, Gao Lei, et al.
 2012. Differences in shallow soil temperatures at urban and rural areas [J]. Journal of Engineering Geology (in Chinese), 20(1): 58-65. doi:10.3969/j.issn.1004-9665.2012.01.009
- 孙应龙, 王慧芳, 李根, 等. 2020. 2000-2019 年北京市热岛效应时空变化特征及影响因素 [J]. 环境生态学, 2(8): 43-50. Sun Yinglong, Wang Huifang, Li Gen, et al. 2020. Study and influence factors of heat island spatio-temporal changes in Beijing from 2000 to 2019 [J]. Environmental Ecology (in Chinese), 2(8): 43-50.
- Tang C S, Shi B, Gao L, et al. 2011. Urbanization effect on soil temperature in Nanjing, China [J]. Energy and Buildings, 43(11): 3090–3098. doi:10.1016/j.enbuild.2011.08.003
- 汤懋苍, 孙淑华, 钟强, 等. 1982. 下垫面能量储放与天气变化 [J]. 高 原气象, 1(1):24-34. Tang Maocang, Sun Shuhua, Zhong Qiang, et al. 1982. The energy variation of the underlying surface and the changes of the weather and climate[J]. Plateau Meteorology, 1(1): 24-33.
- 王建凯, 王开存, 王普才. 2007. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城 市热岛 (冷岛) 强度分析 [J]. 遥感学报, 11(3): 330-339. Wang Jiankai, Wang Kaicun, Wang Pucai. 2007. Urban heat(or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 11(3): 330-339.
- Wang K C, Jiang S J, Wang J K, et al. 2017. Comparing the diurnal and seasonal variabilities of atmospheric and surface urban heat islands based on the Beijing urban meteorological network [J]. J. Geophys. Res., 122(4): 2131–2154. doi:10.1002/2016JD025304
- Yang P, Ren G Y, Hou W. 2017. Temporal-spatial patterns of relative humidity and the urban dryness island effect in Beijing city [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 56(8): 2221–2237. doi:10.1175/JAMC-D-16-0338.1
- Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52(8): 1803–1816. doi:10.1175/JAMC-D-12-0125.1
- 杨士弘. 2002. 城市生态环境学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社. Yang Shihong. 2002. Urban Environmental Ecology (in Chinese)[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press
- Yang W M, Chen B, Cui X F. 2014. High-resolution mapping of anthropogenic heat in China from 1992 to 2010 [J]. Int. J. Environ.
 Res. Public Health, 11(4): 4066–4077. doi:10.3390/ IJERPH110404066
- 杨英宝, 苏伟忠, 江南. 2006. 南京市热岛效应时空特征的遥感分析 [J]. 遥 感 技 术 与 应 用, 21(6): 488-492. Yang Yingbao, Su Weizhong, Jiang Nan. 2006. Time-space character analysis of urban heat island effect in Nanjing city using remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 21(6): 488-492. doi:10.3969/j.issn.1004-0323.2006.06.002

张雷,任国玉,苗世光,等.2020.城市化对北京单次极端高温过程影

响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 44(5): 1093-1108. Zhang Lei, Ren Guoyu, Miao Shiguang, et al. 2020. Numerical simulation of the effect of urbanization on a single extreme-high-temperature event in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1093-1108. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19229

周纪,陈云浩,李京,等.2008.基于遥感影像的城市热岛容量模型及 其应用——以北京地区为例 [J].遥感学报,12(5):734-742.

Zhou Ji, Chen Yunhao, Li Jing, et al. 2008. A volume model for urban heat island based on remote sensing imagery and its application: A case study in Beijing [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 12(5): 734-742. doi:10.11834/jrs.20080595

周甜甜, 廉丽妹, 李宝富, 等. 2017. 基于遥感的青岛市城市热岛时空 变化特征 [J]. 地球环境学报, 8(2): 157-168. Zhou Tiantian, Lian Lishu, Li Baofu, et al. 2017. The change of spatial-temporal characteristics of Qingdao urban heat island based on remote Sensing [J]. Journal of Earth Environment (in Chinese), 8(2): 157-168. doi:10. 7515/JEE201702008