

基于多源数据的大气细颗粒物对北京市城市热岛的影 响研究

陈 晨¹,阿木拉堵¹,李翠琳²,孙技星¹,李 卉¹ 1.中国地质大学(武汉) 地球科学学院,武汉 430070 2.湖北商贸学院,武汉 430079

摘 要:在土地利用方式改变、能源消耗持续增长、人口膨胀的共同作用下,城市热岛效应日趋显著。 大气细颗粒物(PM₂₅)污染不断加剧,对城市热岛强度也产生了一定的影响。利用地面空气质量监测 站点的逐小时 PM₂₅污染监测数据、气象监测站点的日均数据和 MODIS 地表温度数据,结合土地利用 类型,划分城郊气象站点和地表温度采样点,分别计算北京市日均 PM₂₅浓度、冠层城市热岛强度和地 表城市热岛强度,并计算地表城市热岛强度指数,得出热岛强度空间分布图。经过对 PM₂₅与冠层城市 热岛强度、地表城市热岛强度及其空间分布的相关性分析,得出以下结论: (1)北京市地表城市热岛 强度的月、季间变化明显,主要受土地覆盖类型影响,夏季高于冬季,冠层城市热岛强度的月、季间变 化较小; (2) PM₂₅质量浓度与冠层城市热岛强度、地表城市热岛强度均呈显著负相关,相关系数分别 为-0.5199和-0.6115; (3) 昼间地表城市热岛强度与 PM₂₅质量浓度的相关性高于夜间; (4) PM₂₅ 质量浓度变化对地表城市热岛的空间分布有着显著的影响。随着 PM₂₅质量浓度的增加,强热岛空间范 国向城区缩减。

关键词:城市热岛强度;大气细颗粒物;相关性分析

Impacts of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) on urban heat island with multi-source data: a case study of Beijing

CHEN Chen¹, AMU Ladu¹, LI Cuilin², SUN Jixing¹, LI Hui¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430070, China

2. Hubei Business College, Wuhan 430074, China

Abstract: *Background, aim, and scope* In recent decades, Beijing, the capital of China, has experienced rapid economic development and urban expansion, which result in serious fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration and urban heat island (UHI). In order to alleviate these environmental problems, an investigation

收稿日期: 2019-03-18; 录用日期: 2019-09-02; 网络出版: 2019-09-05

Received Date: 2019-03-18; Accepted Date: 2019-09-02; Online first: 2019-09-05

通信作者: 李 卉, E-mail: RSLiHui@cug.edu.cn

Corresponding Author: LI Hui, E-mail: RSLiHui@cug.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772352); 国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室开放基金(KF-2018-03-055)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41772352); Open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Land and Resources (KF-2018-03-055)

引用格式: 陈 晨,阿木拉堵,李翠琳,等.2020. 基于多源数据的大气细颗粒物对北京市城市热岛的影响研究 [J]. *地球环境学报*,11(2): 143-150.

Citation: Chen C, Amu L D, Li C L, et al. 2020. Impacts of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) on urban heat island with multi-source data: a case study of Beijing [J]. Journal of Earth Environment, 11(2): 143–150.

on the correlations between UHI and PM25 is of great significance. Materials and methods With hourly PM25 concentration data, daily air temperature data and 5-day, 1 km MODIS land surface temperature (LST) products, the impacts of PM_{25} concentration on both SUHI and CUHI in 2015 have been comprehensively evaluated with the Pearson correlation analysis. *Results* Results discover that SUHI was much larger in the summer, while CUHI almost kept unchanged during the study year; and the highest PM₂₅ concentration happened in December. It is worth noting that SUHI area deceased a lot when PM_{25} concentration increased, which suggested SUHI was significantly negatively affected by PM25. This is also verified by the Pearson correlation analysis, which demonstrates high level of PM2.5 concentration could alleviate both daytime SUHI and CHUI to some extent. However, the influence of PM₂₅ concentration on night time SUHI was not significant based on our data and analysis. Discussion Both natural (water, vegetation and so on) and anthropogenic causes (impervious surface, civil heating) had significant impacts on UHI intensity. In December, civil heating and stable air caused highest PM_{25} concentration. Although the impacts of PM_{25} on daytime SUHI and CUHI are relative clear in this study, related driving mechanisms are still hard to learn, due to the difficulty in clarifying the opposing impacts aerosols have on the radiative properties and biogeochemistry of urban atmosphere. Conclusions The spatial-temporal dynamics of SUHI were significantly influenced by the type of land surface and human activity, as well as the PM_{2.5} concentration. *Recommendations and perspectives* This study could help local authorities to optimize the policies for sustainable urban development, by exploring the influence of a specific factor on UHI spatialtemporal dynamics. In order to reveal general rules, more data needs to be collected and more analysis methods should be involved in the future study.

Key words: urban heat island intensity; atmospheric fine particles; correlation analysis

近年来,中国城市化进程有进一步加速的趋 势,导致许多地区的自然空间不断减少。目前, 全世界约有 54% 的人口居住在城市地区,预计这 一比例在 2050 年将增加到 66% (United Nations, 2015)。快速的城市化进程导致人造地表(道 路、建筑物和其他基础设施) 替代自然地表, 这 些改变了城市的辐射、热量和湿度等环境条件 (Chudnovsky et al, 2004; Wang et al, 2007) 。 此外,城市地区的人口增长导致车辆交通、日常 生活与工业活动的人为热量排放增长。因此,城 市地区的空气或者地表温度往往高于周边郊区, 这种现象被称为城市热岛(urban heat island, UHI)。城市热岛效应对城市环境和人类福祉造 成了重大影响,其中突出的影响包括:加剧城市 极端高温天气及其引发的死亡和健康等相关问题 (Pantavou et al, 2011; Sakka et al, 2012; van Hove et al, 2015), 引起局部或地区气候变化(Voogt and Oke, 2003; Yang et al, 2011)。因此, 研究 城市热岛效应的时空特征,以及引发热岛强度时 空变化的驱动因素具有重要意义。

城市热岛可表现在城市大气的不同层面以及 各种表面,共分为三类:冠层城市热岛(canopy urban heat island, CUHI)、边界层城市热岛

(boundary layer heat island, BLHI)和地表城市热 岛(surface urban heat island, SUHI)。城市冠层 是指地平面与近似平均建筑高度之间的城市大气 层,而城市边界层位于冠层之上。CUHI和 BLHI 是大气热岛,用来表示城市大气变暖,而 SUHI 指的是城市表面相对于周围农村地区的温度较高 现象。CUHI 通常通过气象站来测量。BLHI 观测 来自更专业的传感器平台,如高塔、无线电探空 仪或系留气球飞行器。SUHI 通常通过机载或卫 星热红外遥感测量来表征地表温度(land surface temperature, LST)。随着遥感技术的发展, 使得 地表温度数据更容易获得, SUHI 的研究也正在蓬 勃发展。国内外关于城市热岛的研究已有很多, 主要集中于城市热岛的强度及其时空变化特征。 Weng and Yang(2004)分析了城市发展对城市热 岛的影响,并认为下垫面性质变化、城市下垫面 扩张对城市热岛有着显著影响。Rao(1972)首次 使用遥感数据, 通过分析卫星热红外数据确定了 城市地区的空间范围。Zhang et al (2010)研究了 上海 CUHI 的时间变化和空间分布,发现 CUHI 在 秋季最强,夏季最弱,时间变化特征与当时的天 气条件密切相关。

城市化发展也同样带来了城市空气污染问题。

第2期

大气细颗粒物 (PM,5)浓度较高是中国城市地区 空气污染的主要特征,易形成雾霾天气导致大气 能见度降低(吴兑等, 2012; 何镓祺等, 2016), 引发呼吸系统疾病(Rumelhard et al, 2007)甚至 癌症(Vinkoor-Imler et al, 2011; Tomczak et al, 2016)而导致死亡率增加。大气细颗粒物浓度增加 所导致的空气污染对边界层的影响也愈发显著, 并对到达地面的太阳辐射产生影响,改变地面能 量平衡,进而对城市热岛产生影响。王海啸等 (1993)认为城市热岛效应使城区底层大气中上 部的增温大于郊区, 而受污染物削弱太阳辐射的影 响,城市低层大气下部的增温小于郊区。吴昊等 (2014) 计算了南京市气溶胶对地面产生的辐射胁 迫,认为大气细颗粒物对城市热岛起到一定的削弱 作用。在城市热岛研究中,将空气污染物造成的辐 射胁迫考虑在内并探讨由此产生的影响具有重要意 义。北京市作为国际特大都市,城市发展迅猛,城 市热岛日益成为重点关注现象。本文分别利用地面 监测站点数据与卫星数据,从冠层城市热岛和地表 城市热岛两方面,论证大气细颗粒物对北京城市热 岛强度及其时空分布的影响。

1 研究区域、方法与数据来源

1.1 研究区域与地面监测站点

北京市地处华北平原西北边缘,位于 39°26′—41°03′N,115°25′—117°30′E,面积约1.68 万平方千米。该地区属温带季风气候,年平均气 温12.24℃,月均最高温出现在7月,为25.4℃, 最低温出现在1月,为-2.37℃。北京市属华北平 原西北部,城区地形平坦,北部为燕山,西部为 太行山,地势西北高东南低。北京市是中国的政 治、经济和文化中心,近年来经历了前所未有的 经济发展。目前,北京市由东城区、西城区、朝 阳区、海淀区、石景山区、门头沟区、丰台区、 房山区、大兴区、通州区、顺义区、平谷区、昌 平区、怀柔区、延庆区、密云区这16区组成。

研究选取 2015 年北京市 13 个站点的空气质 量监测数据和 20 个站点的气象监测数据。PM_{2.5} 浓 度数据来源于中国环境监测总站全国城市空气质 量实时发布平台(http://106.37.208.233:20035/) 的逐小时监测数据。气温数据来源于中国气象局 气象数据中心(http://data.cma.cn/site/index.html/) 地面气象资料日值数据集。此外,使用 1 km 分 辨率的北京市土地利用分类数据,来源于中国科 学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/ Default.aspx/),并根据土地利用数据与谷歌地图 将 20 个气象监测站点划分为城区站点与郊区站点 (图 1)。



Fig.1 Study area and meteorological monitoring station

1.2 MODIS 地表温度数据与预处理

MODIS 是美国宇航局对地观测系统EOS 系列 卫星Aqua 和Terra上的重要仪器。Aqua 分别在下 午13 点30(当地太阳时)和夜间1 点30 左右过境, Terra 分别在上午10 点30 和晚上22 点30 左右过境。 对北京地区来讲,每天可提供四次观测数据,因 此MODIS 数据比较适于研究北京市城市热岛效 应。MODIS 地表温度LST 数据是MODIS 数据业务 化反演的产品之一。大量研究表明,MODIS 分裂 窗算法反演得到的地表温度达到了1 K 的精度(白 杨等, 2013)。

本研究使用MODIS 地表温度中国五天合成产品,坐标系为WGS84,空间分辨率1 km(数据来源:地理空间数据云,http://www.gscloud.cn/)。由于多数影像受云雾影响,部分像元数值缺失,因此筛选有效像元大于总像元数三分之二的影像,并使用克里金插值的方法对无数值区域进行修复。使用选取采样点的方法,分别统计城区和郊区地表温度(图2),采样点的选择根据北京市



2015年土地利用数据和谷歌地图。



1.3 研究方法及技术路线

1.3.1 冠层城市热岛强度计算

城市热岛强度是指城市中心区温度与郊区温 度的差值(Oke, 1987)。在北京市20个气象站 点中,北京、朝阳和房山等13个站点位于城区, 佛爷顶、密云上甸子和斋堂等7个站点位于郊区。 首先分别计算城区和郊区站点的平均温度,用城 区均温与郊区均温的差值表示冠层城市热岛强度 (CUHI),计算公式如下:

$$CUHI = T_{urban} - T_{suburban} = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} T_i - \frac{1}{7} \sum_{j=1}^{7} T_j$$
(1)

式中: *T*_{urban} 为城区气温站点日平均温度, *T*_{suburban} 为郊区气温站点日平均温度, *T_i* 与*T_j* 分别为城区和 郊区某一站点的日平均温度。

1.3.2 地表城市热岛强度计算

根据在MODSI 地表温度影像上选取的采样点 温度值,区分城区与郊区。首先分别计算城区和 郊区站点的平均地表温度,用城区均温与郊区均 温的差值表示地表城市热岛强度(SUHI),计算 公式如下:

$$SUHI = T_{urban} - T_{suburban} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} T_j$$
(2)

式中: *T*_{urban} 为城区地表温度采样点日平均温度, *T*_{suburban} 为郊区地表温度采样点日平均温度, *T_i* 与*T_j* 分别为城区和郊区某一地表温度采样点的日平均

温度。

1.3.3 地表城市热岛强度指数计算

借助 Arcgis 软件获得 MODIS 地表温度影像中 整个北京市的平均地表温度 T_{mean} ,然后使用栅格 计算工具,每个像元的温度值 T_i 减去平均值 T_{mean} 得到地表城市热岛强度指数 (surface urban heat island index, SUHII)。计算公式 (葛伟强等, 2010)如下:

$$M_i = P_i - \frac{1}{n} \sum P_{\rm roi} \tag{3}$$

式中: M_i 表示像元热岛强度, P_i 为像元温度值,n是研究区域像元总数, P_{roi} 为研究区域内所有像元温度值。

1.3.4 相关系数法

相关系数是用来反映两个变量之间相关关系密 切程度的统计指标,这里使用最常见的皮尔森相关 系数法。北京市 PM₂₅ 质量浓度与 CUHI、SUHI 的 关系,采用相关系数衡量,计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(4)

式中: r_{xy} 表示 x = y之间的相关系数, x_i 为第 i 日 PM₂₅ 质量浓度值, \bar{x} 为 PM₂₅ 质量浓度日均值, y_i 为第 i 日 CUHI 或 SUHI 强度值, \bar{y} 为 CUHI 或 SUHI 的平均值。r>0表示二者呈正相关, r<0表 示负相关, 相关系数越大说明二者相关性越强。

2 结果与分析

2.1 城市热岛强度

图 3 为 2015 年北京市冠层城市热岛强度与 地表城市热岛强度逐月变化,冠层城市热岛强度 范围在 3 — 5 K,而地表城市热岛强度范围在 3 — 7.5 K。地表城市热岛强度月变化幅度较大,受土 地覆盖类型不同的影响,夏季城区地表更易吸收 太阳辐射导致升温明显,而郊区多植被覆盖与水 体等,受热后升温较慢,导致夏季地表城市热岛 强度明显高于其他季节。冠层城市热岛强度月变 化幅度较小,冬季略高于夏季。冬季城区的生活 取暖导致了城郊温差加大,热岛效应增强,夏季 受太阳辐射影响城郊温度同步回升,一定程度上 削弱了热岛效应的强度。

2.2 城市热岛强度与 PM_{2.5} 质量浓度相关性分析

2.2.1 冠层城市热岛强度与 PM2.5 质量浓度

图 4 给出了 2015 年冠层城市热岛强度与 PM25

陈 晨,等:基于多源数据的大气细颗粒物对北京市城市热岛的影响研究

第2期

质量浓度相关关系。冠层城市热岛强度随 PM_{2.5} 质量浓度升高而下降,二者相关系数为-0.5199, 呈现明显的负相关关系。这一结果符合 PM_{2.5} 浓 度影响城市热岛强度的驱动机制,即:细颗粒物 通过影响太阳辐射传输过程进而改变地表以及近 地表大气能量平衡,由此对城市热岛强度产生 影响。



图 3 北京市 CUHI 与 SUHI 逐月变化 Fig.3 Monthly variation of CUHI and SUHI in Beijing





结合本研究需求,根据 PM_{2.5} 质量浓度将污染 程度划分为三个等级:0—50 µg·m⁻³ 为轻污染, 50—75 µg·m⁻³ 为中等污染,75 µg·m⁻³ 以上为重 污染。图 5 给出了不同污染等级下,冠层城市热 岛强度月变化与季节变化。在轻污染时期,冠层 城市热岛强度处于较高值,其次为中等污染时期, 再次为重污染时期,进一步反映出冠层城市热岛 强度与 PM_{2.5} 质量浓度之间的负相关关系。





2.2.2 地表城市热岛强度与 PM25 质量浓度

经过裁剪,2015年北京市地表温度五天合成 产品共有146幅昼间与夜间影像数据。筛选受云雾 影响较小的数据,使用克里金插值的方法进行影 像修复后,计算昼夜平均值,得到47幅影像。随 后,提取采样点温度值,计算地表城市热岛强度 (SUHI)。PM₂₅质量浓度通过计算与地表温度数 据对应成像日期的日平均浓度得出。图6为地表 城市热岛强度与PM₂₅质量浓度的关系,在不同污 染等级下,二者存在显著的负相关,地表城市热 岛强度与PM₂₅质量浓度的相关系数为-0.6115。

无论在昼间还是夜间,地表城市热岛强度与 PM₂₅ 质量浓度在变化趋势上总呈相反趋势(图 7)。昼间 SUHI 与 PM₂₅ 质量浓度的相关系数为 -0.6164,夜间 SUHI 与 PM₂₅ 质量浓度的相关系 数为 -0.2155。昼间 SUHI 与 PM₂₅ 质量浓度的相 关性显著高于夜间,进一步证明城市热岛强度与 PM₂₅ 之间存在相关性的原因在于地面吸收太阳辐 射的强弱变化。

DOI: 10.7515/JEE192026

第11卷







图 7 昼间地表城市热岛强度、夜间地表城市热岛强度与 PM₂₅浓度的关系 Fig.7 Relationships between daytime SUHII and PM₂₅ (a), nighttime SUHII and PM₂₅ (b)

2.3 城市热岛强度空间分布与 PM_{2.5} 质量浓度相关 性分析

借助 Arcgis 栅格计算工具,分别计算出 PM_{2.5}轻污染时期、中等污染时期和重污染时期 的平均地表温度,再根据地表城市热岛强度指数

DOI: 10.7515/JEE192026

(SUHII)的计算方法,温度值减去整个城市的平均值,得出SUHII及其空间分布情况。图8为北京市2015年PM₂₅不同污染等级下地表城市热岛强度指数的空间分布情况。由图可知:北京市存在地表城市热岛现象的区域(SUHII>0)主要分布在中部地区以及东部和南部地区。这主要受土地覆盖类型的影响,该区域多为城市不透水面,其次为农业用地与未利用地。北部与西部地区多为山地,植被覆盖率较高,因而较少存在热岛现象。



陈 晨,等:基于多源数据的大气细颗粒物对北京市城市热岛的影响研究

地表城市热岛强度指数的高值区域(SUHII> 3)主要集中在北京市主城区,并且在轻污染时期 这一高值区域的空间范围最大;其次为中等污染 时期,再次为重污染时期。可见,在PM_{2.5}质量浓 度增加的情况下,高地表城市热岛强度的空间范 围随之减少。与冠层城市热岛强度、地表城市热 岛强度类似,PM_{2.5}质量浓度与地表城市热岛强度 指数的空间分布同样存在负相关关系。

3 结论

(1)北京市地表城市热岛强度的月、季间变化明显,主要受土地覆盖类型影响,夏季高于冬季,冠层城市热岛强度的月、季间变化较小。

(2) PM_{2.5} 质量浓度与冠层城市热岛强度、地 表城市热岛强度均呈显著负相关,相关系数分别 为-0.5199和-0.6115。随着 PM_{2.5} 质量浓度的增 加,冠层城市热岛强度与地表城市热岛强度均随 之下降。

(3) 昼间地表城市热岛强度与 PM₂₅ 质量 浓度的相关性高于夜间,证明了城市热岛强度与 PM₂₅ 之间存在相关性的原因在于地面吸收太阳辐 射的强弱变化。

(4) PM_{2.5} 质量浓度变化对地表城市热岛的空间分布有显著影响。随着 PM_{2.5} 质量浓度的增加,强热岛空间范围向城区缩减。

参考文献

- 白杨,王晓云,姜海梅,等. 2013. 城市热岛效应研究进展[J]. *气象与环境学报*, 29(2): 101-106. [Bai Y, Wang X Y, Jiang H M, et al. 2013. Progress of urban heat island effect [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 29(2): 101-106.]
- 葛伟强,周红妹,杨何群.2010. 基于 MODIS 数据的近 8 年长三角城市群热岛特征及演变分析 [J]. 气象, 36(11): 77-81. [Ge W Q, Zhou H M, Yang H Q. 2010. Characteristics analysis on heat island effect in Yangtze Delta urban agglomerations in recent 8 years by MODIS data [J]. *Meteorological Monthly*, 36(11): 77-81.]
- 何镓祺, 于兴娜, 朱 彬, 等. 2016. 南京冬季气溶胶消 光特性及霾天气低能见度特征 [J]. *中国环境科学*, 36(6): 1645–1653. [He J Q, Yu X N, Zhu B, et al. 2016. Characteristics of aerosol extinction and low visibility in haze weather in winter of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 36(6): 1645–1653.]

- 王海啸,黄建国,陈长和.1993.城市气溶胶对太阳辐射 的影响及其在边界层温度变化中的反映 [J]. *气象学* 报,51(4):457-464. [Wang H X, Huang J G, Chen C H. 1993. The influences of urban aerosols on solar radiation and their reflection in urban boundary layer temperature variation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 51(4):457-464.]
- 吴 兑,刘啟汉,梁延刚,等.2012. 粤港细粒子(PM_{2.5})
 污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 32(11): 2660-2669. [Wu D, Alexis Kai-Hon Lau, Leung Y K, et al. 2012. Hazy weather formation and visibility deterioration resulted from fine particulate (PM_{2.5}) pollutions in Guangdong and Hong Kong [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(11): 2660-2669.]
- 吴 美,王体健,方 欢,等.2014. 南京细颗粒物对城市热 岛强度的影响 [J]. *大气科学学报*, 37(4): 425-431. [Wu H, Wang T J, Fang H, et al. 2014. Impacts of aerosol on the urban heat island intensity in Nanjing [J]. *Transactions* of Atmospheric Sciences, 37(4): 425-431.]
- Chudnovsky A, Ben-Dor E, Saaroni H. 2004. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements [J]. *Energy and Buildings*, 36(11): 1063-1074.
- Oke T R. 1987. Boundary layer climate [M]. 2nd edition. New York: Methuen: 1–3.
- Rao P K. 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 53: 647–648.
- Pantavou K, Theoharatos G, Mavrakis A, et al. 2011. Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens [J]. *Building and Environment*, 46(2): 339–344.
- Rumelhard M, Ramgolam K, Auger F, et al. 2007. Effects of PM_{2.5} components in the release of amphiregulin by human airway epithelial cells [J]. *Toxicology Letters*, 168(2): 155–164.
- Sakka A, Santamouris M, Livada I, et al. 2012. On the thermal performance of low income housing during heat waves [J]. *Energy and Buildings*, 49: 69–77.
- Tomczak A, Miller A B, Weichenthal S A, et al. 2016. Longterm exposure to fine particulate matter air pollution and the risk of lung cancer among participants of the Canadian National Breast Screening Study [J]. *International Journal*

150

of Cancer, 139(9): 1958-1966.

- United Nations. 2015. World urbanization prospects: the 2014 revision [M]. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, United Nations.
- van Hove L W A, Jacobs C M J, Heusinkveld B G, et al. 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration [J]. *Building and Environment*, 83: 91–103.
- Vinkoor-Imler L C, Davis J A, Luben T J. 2011. An ecologic analysis of county-level PM_{2.5} concentrations and lung cancer incidence and mortality [J]. *International Journal* of Environmental Research & Public Health, 8(6): 1865–1871.
- Voogt J A, Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370–384.
- Wang K C, Wang J D, Wang P C, et al. 2007. Influences of

urbanization on surface characteristics as derived from the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer: a case study for the Beijing metropolitan area [J]. *Journal* of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D22). DOI: 10.1029/2006JD007997.

- Weng Q H, Yang S H. 2004. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city [J]. *Journal of Environmental Management*, 70(2): 145–156.
- Yang X C, Hou Y L, Chen B D. 2011. Observed surface warming induced by urbanization in East China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D14). DOI: 10.1029/2010JD015452.
- Zhang K X, Wang R, Shen C C, et al. 2010. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 169(1/2/3/4): 101–112.