

基于能量平衡的城市热岛效应研究进展*

肖捷颖, 张倩, 王燕, 季娜

(河北科技大学 环境科学与工程学院 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要:快速的城市化过程中产生了一系列环境问题,备受关注的有水资源短缺、生态环境脆弱以及城市热岛效应等。其中城市热岛效应问题日益突出,降低城市生态环境质量和生活质量。研究城市热岛效应的产生机理对缓解这一问题具有重要的理论和现实意义。本文从能量平衡的角度归纳总结了以往城市热岛效应形成机理的研究,探讨研究能量平衡方程中各分量的方法并对研究成果进行归纳总结,认为应用遥感图像与气象资料相结合分析城市地表热通量来研究城市热岛效应的成因及特征在目前是非常有效可行的方法。本文认为目前基于能量平衡研究城市热岛效应还存在不足,如相关研究仅仅在少数的城市或者针对特定的季节;城市的储热通量相对被高估;应考虑如何合理地将人为热引入能量平衡方程进而研究人为热的贡献率;增加实地测量并研究提高地面观测水平的新途径和新方法来验证所得的模拟结果。

关键词:城市热岛效应;能量平衡;人为热

中图分类号:X24

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2013)04-0126-06

2011年3月5日公布的“十二五”(2011—2015)规划纲要草案显示,中国2015年城镇化率有望由当时的47.5%提高到51.5%,而1990年,中国城市化水平仅为26.41%^[1]。快速地城市化在推动社会经济发展的同时,许多环境问题如生态环境脆弱、水资源短缺、城市热岛效应等随之日益明显^[2]。其中城市热岛效应是城市气候最显著的特征之一,并因它对城市生态环境质量、居民生活质量和身体健康的影响而倍受广大学者的关注。

城市热岛效应(Urban heat island, UHI)指城市近地空气温度高于周围郊区近地空气温度的现象。其形成因素复杂,是在人类活动的影响下形成的一种小气候现象。国内外学者对其成因的研究已有很多报道,如根据Oke^[3]提出用地表能量平衡方程来探讨城市热岛的起因。Myrup等人^[4]研究城市热量交换提出城市热岛能量平衡模型,发现城市蒸发减少、动力粗糙度增加、材料热性质高和风速的变化是产生热岛效应的主因。因此,城市热岛效应的起因可归纳为:1)地表热力学性质:由于以钢筋混凝土为主的都市地表具有热容量大、热导率高的特性^[5-6],且含水率低,故能吸收大量的太阳辐射。2)人为热:由于城市人口密度大,经济活动集中,工业生产、家庭炉灶和交通运输等燃烧化石燃料时所释放的热量以及空调、汽车等排放的废热均远多于郊区^[7]。3)城市冠层:因建筑物高低不齐,地面向上的长波辐射受到限制,建筑物的墙壁也进行长波辐射,其中一部分向下,补充大气逆辐射^[8]——这使得城市冠层内通过长波辐射的交换,净辐射量增大^[9];同时,形状不同、高低不等的建筑物改变城市街道内风和湍流分布,不利街道内污染物扩散^[10]。除以上3点外,城市热岛效应还受风速、云量、大气污染等因素的影响。

城市和郊区的不同下垫面特性、不同人类活动强度导致能量平衡差异是形成热岛效应的基础。对能量收支差异的分析有利于全面理解城市热岛效应的形成。本文从能量平衡的角度对现有分析城市地表热量交换与传递的研究进行分析、归纳和总结,介绍能量平衡方程中各个分量的概念、计算方法及相关的研究成果,希望有助于有关工作者深刻理解净辐射、人为热、感热通量、潜热通量和储热通量,且为理解城市热岛效应产生机理提供理论基础,对探讨减缓城市热岛效应方法也有着重要的现实意义。

1 能量平衡方程

能量平衡方程最早由Oke^[3]于1988年提出,并分析了城市热岛效应的起因。从此,对城市热岛效应的研究

* 收稿日期:2012-12-27 网络出版时间:2013-07-20 19:23

资助项目:河北省自然科学基金(No. D2010000867)

作者简介:肖捷颖,女,副教授,博士,研究方向为环境遥感应用研究,E-mail: xiaojieying@gmail.com

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20130720.1923.201304.126_022.html

开始从现象描述转向对形成机理的分析。吴息等人^[11]基于地表能量平衡理论,分析了北京、上海等城市热岛效应的长期变化趋势。Colombert 等人^[12]应用能量平衡理论研究了法国巴黎的城市能量分布特征如辐射参数、热参数等,探讨了该方法的灵敏性。能量平衡方程的表达公式如下

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

$$Q^* = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) = K^* + L^* \quad (2)$$

其中, Q^* 为地表净辐射, Q_F 为人为热; Q_H 为感热通量, Q_E 为潜热通量, ΔQ_S 为储热通量, ΔQ_A 为平流热通量^[13]。 $K \uparrow$ 、 $K \downarrow$ 、 K^* 分别为向上、向下太阳辐射和净太阳辐射, $L \uparrow$ 、 $L \downarrow$ 、 L^* 分别为向上、向下长波辐射和净长波辐射,其中各物理量单位均为 $W \cdot m^{-2}$ 。

2 地表净辐射 Q^*

地表净辐射在很大程度上决定着地表上层和近地层大气的温度,该值大小与太阳高度角、反射率、云量和测试点的海拔高度有关^[14],此外它还受日照长短、大气透明度、地表状况和特征的影响。

地表净辐射可通过四分量辐射观测仪直接测量或用辐射传输模式由常规气象资料计算得到^[15],张一平等^[16]就曾利用四分量观测仪得到的太阳辐射资料分析西双版纳热带植物园的净辐射分布特征。此外,也可利用地表净辐射与常规气象要素之间的关系,建立由常规气象资料估算地表净辐射的经验方法;如江灏等人^[17]利用青藏高原野外热源试验资料,建立地面气象要素与地表净辐射之间的关系,分析拉萨地表净辐射的年际变化。

另外,还可利用遥感数据结合地表净辐射观测数据估算,例如结合地面观测资料和 GMS 卫星红外、可见光数字云图并用统计方法计算地表净辐射值^[18]。刘新安等人^[19]利用中国 50 个净辐射站 1993—2000 年的净辐射及相关气象资料,采用余项法、多因子综合法、Penman 修正式、Penman-Monteith 公式、Chang Jen-Hu 修正式等计算地表净辐射月值。Jin 等人^[20]用中尺度 MODIS 数据和地表温度估算净辐射,与地面观测结果相比均方根误差小于 $30 W \cdot m^{-2}$ 。此外,直接利用 MODIS 数据估算退化草地和农田的净辐射,与地面观测数据对比,结果表明只用遥感数据也可计算净辐射^[21]。还有学者提出用神经网络系统模拟净辐射,模拟结果均方根误差和平均绝对误差也较低^[22]。

3 人为热 Q_F

人为热在地表能量平衡中占重要比例,在 1992 年 Grimmond^[23]就证实人为热 Q_F 至少占城市地表能量的 10%,并主要源于汽车尾气排放废热、工业生产过程中能耗以及城市建筑物能耗(如冬季采暖和夏季空调)。人为热一般排放到低层大气^[24],所以研究人为热的变化对城市热力环境以及边界层结构的影响,进而研究它对城市热岛效应的影响很重要。但是,要获得翔实的人为热源的空间、时间分布数据困难,多数研究只能对城市的能量消耗进行粗略统计。表 1 列举了部分关于人为热的研究。

表 1 城市人为热研究的文献总结

研究方法	研究目标	人为热相关结论	参考文献
统计热源法	人为热对城市边界层结构的影响	人为热排放量对城市热岛贡献率约为 29.6%	何晓凤 ^[24]
能量平衡法、统计能量消耗法	法国图卢兹人为热排放	冬季人为热超过净辐射	Pigeon ^[25]
1 km ² 网格法	London 建筑物排放人为热研究	人为热冬季是太阳辐射的 3~25 倍,夏季在 0.04~0.4 倍,与建筑物密度有关	Hamilton ^[26]
精细的网格统计法	人为热对城市气候的影响	人为热夜晚比白天少;对温度的影响在黎明前最强	Narumi ^[27]
统计热源法	城市人为热对北京热环境的影响	人为热使市中心白天增加 0.15 °C,夜晚增加 1~3 °C	佟华 ^[28]
基于能量平衡的遥感法	建筑物能耗与人为热的关系	人为热与建筑耗能为规模依赖关系	Zhou ^[29]
自上而下和自下而上组合建模法	热带城市人为热研究	不同用途建筑物排放的人为热不同	Quah ^[30]
多孔介质模型	数值模拟城市热岛效应	人为热强度每增加 $100 W \cdot m^{-2}$,城市热岛增加 1.683 K	Memon ^[31]

绘制精密的能耗网格或制作热量排放清单统计城市区域的工业、交通、民用排放热是研究人为热的一个方法。Narumi 等人^[27]用精细的网格统计得出人为热的释放在晚上少,但使空气温度在夜晚增加量却比白天高 3 倍,影响在黎明前最强,因为白天太阳辐射能量是使空气增温的主导因素,在夜间人为热则使城市空气加温。佟华等通过对北京冬季采暖、汽车和工业生产的排放废热进行估算,制定了随时空变化的北京市人为热排放清单,表明人为热对城市热岛的形成作用很大^[28]。

此外,有研究结合能量平衡模型及遥感数据计算发现人为热排放与建筑耗能之间存在规模依赖关系^[29]。Quah 等人^[30]采用自上而下和自下而上组合建模方法计算车辆、建筑物和居民排放热量,分析不同用途建筑物排放人为热小时平均值,商业区、高密度居民区和低密度居民区分别为 $113 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,具有内部热源的多孔性介质,并推导城市湍流和传热的多孔介质模型^[31]。

4 感热通量 Q_H 和潜热通量 Q_E

感热通量和潜热通量统称为湍流通量。地表面由于表层土壤与低层大气温度不等产生了地表与大气之间的感热交换。地表湍流热通量的计算方法有空气动力学阻抗法、波文比能量平衡法、涡旋相关法^[32]。结合遥感数据的空气动力学阻抗法^[33],通过从遥感图像上获取地表温度并结合气象资料,模拟城市的感热、潜热通量。如 Kato 等人^[34]结合 ASTER 和 ETM⁺ 数据采用阻抗的方法研究感热通量。Xu 等人^[35]采用城市气象参数化方案 LUMPS 和空气动力学阻抗法研究多尺度的感热通量。

波文比能量平衡法^[36]是基于地表能量平衡方程和近地层水汽扩散理论,计算过程中不包括人为热,当波文比接近 -1 时,计算结果不稳定,因此在研究城市地表能量时不常用。涡旋相关法通过计算风速脉动与某标量脉动的协方差,得到某时段通量^[37],通常利用三维超声风温仪直接观测脉动资料。王成刚等人^[38]应用涡旋协方差法对城市水泥下垫面能量平衡特征进行观测分析,得出因其不透水性,潜热通量小,感热通量成为水泥面加热大气的主要方式。夏季夜间为正,感热加热大气,而冬季夜间为负,对大气起冷却作用。Ayata 等人^[39]还提出了用“Basic model”来计算绿色屋顶的感热交换。

5 储热通量 ΔQ_S

储热通量成为城市下垫面能量平衡方程中主要的源汇项,因城市地表主要由钢筋混凝土、砖石和金属等组成,热容量大,导热率高,吸收大量太阳辐射并散发到大气,导致气温上升。

地表储热通量在地表能量再分配过程中起重要作用,土壤-植被-大气系统储热通量计算方法主要有温度积分法或结合实测的温度积分法^[40]、谐波法^[41]、经验法^[42]以及同时考虑热扩散和热对流机制等方法^[43]。但是,城市下垫面不是匀质的,包括沥青、混凝土、植被、水等,因此,对城市地表储热通量的计算非常复杂。

应用遥感图像,根据储热通量与太阳净辐射之间的关系计算储热通量。在现有遥感估算经验模型中,应用较为广泛的有 Choudhury 等人^[44]提出的基于叶面积指数、Moran 等人的基于归一化植被指数^[45]、Bastiaanssen 等人^[46]提出的综合地表温度、地表反射率和归一化植被指数以及 Boegh 等以植被覆盖率和植被、土壤热通量为权重的计算方法^[47]等。还有 Grimmond 等人^[48]利用 OHM 模型(Objective hysteresis model)估算储热通量。此外,也有学者将储热通量作为能量平衡方程余项进行研究,如 Kato 等人^[49]对日本名古屋市储热通量研究中发现中心商业区的储热通量比周围居民区高,尤其在冬季城市中心储热通量达 $240 \sim 290 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而居民区仅为 $180 \sim 220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。王成刚等人^[38]研究了城市水泥下垫面的能量特征,发现储热项无论冬夏,在能量收支过程中所占份额明显大于感热和潜热之和,而自然下垫面通常是感热和潜热之和大于储热,这正是城、乡下垫面热力学性质最主要的差异。

6 结论

城市化对能量平衡方程各分量都有影响,虽然城市与郊区接收的太阳辐射强度基本一致,但因不同下垫面反射率不同造成对太阳辐射的吸收与反射不同,因此城市和郊区净辐射不同,并且两者感热通量、潜热通量、储热通量及人为热排放都有明显区别。城市热岛效应的产生主要是由下垫面的热力学性质及人为热共同作用。从机理上研究城市热岛效应,就需要清楚城市范围内能量平衡方程各分量的空间分布及变化特征。本文总结了关于净辐射、人为热、感热通量、潜热通量和储热通量的基本分析方法和相关研究。从目前研究来看,对能量平

衡的研究多应用遥感图像与气象资料结合的方法来分析各分量对城市热岛效应的贡献。本文认为,就能量平衡的研究而言还存在以下几方面问题:1)对于草地、森林和大片农田等单一下垫面能量平衡的研究较多,但因城市表面特征复杂,有关研究仅仅在少数的城市或者针对特定的季节;2)城市下垫面多为不透水面,植被和水体覆盖面积少,模拟过程中常常将潜热通量忽略不计,而城市的储热通量相对被高估;3)人为热源空间和时间分布情况的调查和模拟比较困难,如何得到人为热详细排放清单,并引入能量平衡方程,研究它对城市热岛效应的贡献率,将是以后研究的重点;4)应用遥感数据模拟的结果缺乏实地的测量结果进行验证,还需要研究提高地面观测水平的新途径、新方法。希望上述问题能在今后工作中得到有效的解决。

参考文献:

- [1] 冯邦彦,马星. 中国城市化发展水平及省际差异[J]. 经济经纬,2005(1):62-65.
Feng B Y, Ma X. Provincial differences in China urbanization [J]. Economic Surveys, 2005(1):62-65.
- [2] 张崇飞,何雪冰,杨德位. 浅谈城市热岛[J]. 山西建筑, 2009,35(5):340-341.
Zhang C F, He X B, Yang D W. On the urban heat island [J]. Shanxi Architecture, 2009,35(5):340-341.
- [3] Oke T R. The urban energy balance[J]. Progress in Physical Geography, 1988,12:471-508.
- [4] Myrup L O, Mcgin C E, Flocchini R G. An analysis of microclimatic variation in a suburban environment[J]. Atmospheric Environment, Part B. Urban Atmosphere, 1993, 27(2):129-156.
- [5] Arya S P. Introduction to micrometeorology[M]. 2nd edition. San Diego: Academic press, 2001:11-67.
- [6] 刘鹏. 基于用地类型的重庆城市热岛特征研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
Liu P. The study of urban heat island based on the type of land in Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [7] Sailor D J, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 2737-2748.
- [8] Takebayashi H, Moriyama M. Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking[J]. Solar Energy, 2009,83(8):1211-1223.
- [9] Rizwan A M, Dennis Y C L, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008,20(1):120-128.
- [10] 蒋德海,蒋维楣,苗世光. 城市街道峡谷气流和污染物分布的数值模拟[J]. 环境科学研究, 2006,19(3):7-12.
Jiang D H, Jiang W M, Miao S G. The numerical simulation of air flow and pollution in street canyons[J]. Research of Environmental Sciences, 2006,19(3):7-12.
- [11] 吴息,丁裕国,王少文. 对城市热岛长期变化趋势分析方法的进一步探讨[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(1): 131-133.
Wu X, Ding Y G, Wang S W. Reexamination of scheme for long-term trend of urban heat island[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1997,20(1):131-133.
- [12] Colombert M, Diab Y, Salagnac J L, et al. Sensitivity study of the energy balance to urban characteristics[J]. Sustainable Cities and Society, 2011,1(3):125-134.
- [13] Christen A, Voogt, R. Energy and radiation balance of a central European city[J]. International Journal of Climatology, 2004,24(11):1395-1421.
- [14] 翁笃鸣. 中国辐射气候[M]. 北京:气象出版社, 1997:212-221.
Weng D M. Radiation climate in China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997:212-221.
- [15] 任鸿瑞,罗毅,谢贤群. 几种常用净辐射计算方法在黄淮海平原应用的评价[J]. 农业工程学报, 2006,22(5):140-146.
Ren H R, Luo Y, Xie X Q. Evaluation of application of several net radiation calculation methods in Huanghuaihai Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 140-146.
- [16] 张一平,赵俊斌,宋清,等. 西双版纳热带植物园主要种植园区太阳辐射特征比较研究[J], 北京林业大学学报, 2010,32(4):136-143.
Zhang Y P, Zhao J W, Song Q, et al. Characteristics of solar radiation in main tropical plantations in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 136-143.
- [17] 江灏,瞿章. 拉萨地表净辐射的年内变化[J]. 高原气象, 1991,10(3):325-331.
Jiang H, Qu Z. The interannual variance of surface net radiation over LHASA region [J]. Plateau Meteorology, 1991,10(3):325-331.
- [18] 杜建飞,陈渭民,吴鹏飞,等. 由GMS资料估算我国东部地区夏季地表净辐射[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4):674-680.
Du J F, Chen W M, Wu P F, et al. GMS data-estimated surface net radiation over east China in summer[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2004,27(4):674-

- 680.
- [19] 刘新安,于贵瑞,何洪林,等. 中国地表净辐射推算方法的研究[J]. 自然资源学报,2006,21(1):139-145.
Liu X A, Yu G R, He H L, et al. Research on the calculating of surface net radiation in China[J]. Journal of Natural Research,2006,21(1):139-145.
- [20] Jin Y F, Randerson J T, Goulden M L. Goulden continental-scale net radiation and evapotranspiration estimated using MODIS satellite observations[J]. Remote Sensing of Environment,2011,115(9):2302-2319.
- [21] 叶晶,刘辉志,李万彪,等. 利用 MODIS 数据直接估算晴空区干旱与半干旱地表净辐射通量[J]. 北京大学学报:自然科学版,2010,46(6):40-49.
Ye J, Liu H Z, Li W B. Estimation of the net radiation over arid and semiarid areas only using MODIS data for clear sky days[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2010,46(6):40-49.
- [22] Ferreira A G, Olivas E S, Sanchis J G, et al. Modeling net radiation at surface using "in situ" netpyrradiometer measurements with artificial neural networks[J]. Expert Systems with Applications,2011,38(11):14190-14195.
- [23] Grimmond C S B. The suburban energy balance: methodological considerations and results for a mid latitude west coast city under winter and spring conditions[J]. International Journal of Climatology,1992,12(5):48-497.
- [24] 何晓凤,蒋维楣,陈燕,等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究[J]. 地球物理学报,2007,50(1):74-82.
He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer[J]. Chinese Journal of Geophysics,2007,50(1):74-82.
- [25] Pigeon G, Legain D, Durand P, et al. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France) [J]. International Journal of Climatology,2007,27(14):1969-1981.
- [26] Hamilton I G, Davies M, Steadman P, et al. The significance of the anthropogenic heat emissions of London's buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation[J]. Building and Environment,2009,44(4):807-817.
- [27] Narumi D, Kondo A, Shimoda Y. Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity [J]. Environmental Research,2009,109(4):421-431.
- [28] 佟华,刘辉志,桑建国,等. 城市人为热对北京热环境的影响[J]. 气候与环境研究,2004,9(3):409-421.
Tong H, Liu H Z, San J G. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment[J]. Climatic and Environmental Research,2004,9(3):409-421.
- [29] Zhou Y Y, Weng Q H, Gurney G R, et al. Estimation of the relationship between remotely sensed anthropogenic heat discharge and building energy use ISPRS[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2012,67:65-72.
- [30] Quah A K L, Roth M. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore [J]. Atmospheric Environment,2012,46:92-103.
- [31] Memon R A, Leung D Y C. Impacts of environmental factors on the urban heating [J]. Journal of Environmental Sciences,2010,22(12):1903-1909.
- [32] 张焱,李跃清,李颖. 地表湍流通量计算方法的研究综述 [J]. 高原山地气象研究,2010,30(1):76-80.
Zhang L, Li Y Q, Li Y. Study of calculation of the surface fluxes: review and progress[J]. Plateau mountain meteorology research,2010,30(1):76-80.
- [33] Voogt J A, Grimmond C S B. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area [J]. Journal of Applied Meteorology,2000,39(10):1679-1699.
- [34] Kato S, Yamaguchi Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux [J]. Remote Sensing of Environment,2005,99(1):44-54.
- [35] Xu W, Wooster M J, Grimmond S C B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scale: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature-emissivity separation approach [J]. Remote Sensing of Environment,2008,112(9):3493-3510.
- [36] 刘树华,茅宇豪,胡非. 不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究 [J]. 地球物理学报,2009,52(3):616-629.
Liu S H, Mao Y H, Hu F, et al. A comparative study of computing methods of turbulent fluxes on different underlying surfaces [J]. Journal of Geophysics,2009,52(3):616-629.
- [37] 王介民,王维真,奥银焕,等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析 [J]. 地球科学进展,2007,22(8):791-797.
Wang J M, Wang W Z, Ao Y H, et al. Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. Advances in Earth Science,2007,22(8):791-797.
- [38] 王成刚,孙鉴泞,胡非,等. 城市水泥下垫面能量平衡特征的观测与分析 [J]. 南京大学学报:自然科学版,2007,43(3):270-279.
Wang C G, Sun J N, Hu F, et al. Observation and analysis of the characteristics of urban concrete surface energy balance [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences,2007,43(3):270-279.
- [39] Ayata T, Velasco P C T, Srebric J. An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup [J].

- Building and Environment, 2011, 46(9):1851-1861.
- [40] 左金清, 王介民, 黄建平, 等. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响[J]. 高原气象, 2010, 29(4):840-848.
- Zuo J Q, Wang J M, Huang J P, et al. Estimation of ground heat flux for a Semi-Arid grassland and its impact on the surface energy budget[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(4):840-848.
- [41] 杨红娟, 丛振涛, 雷志栋, 等. 利用遥测地表温度模拟土壤热通量[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1):21-25.
- Yang H J, Cong Z T, Lei Z D, et al. Application of harmonic analysis to estimate soil heat flux using remotely measured surface temperature[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(1):21-25.
- [42] 张立杰, 江灏, 李磊, 等. 利用气象要素计算五道梁地区土壤热流量的试验[J]. 高原气象, 2006, 25(3):418-422.
- Zhang L J, Jiang Y, Li L, et al. A test of the soil heat flux calculation in Wudaoliang area using meteorological elements[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(3):418-422.
- [43] Gao Z Q, Fan X G, Bian L G. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction-convection in soil[J]. International Journal of Dairy Technology, 2003, 168(2):99-107.
- [44] Choudhury B J, Idso S B, Reginato R J. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 39:283-297.
- [45] Moran M S, Jackson R D, Raymond L H, et al. Mapping surface energy balance components by combining Landsat thematic mapper and ground-based meteorological data[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30:77-87.
- [46] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998 (212/213):198-212.
- [47] Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3):329-343.
- [48] Grimmond C S B, Oke T R. Heat storage in urban areas; local scale observations and evaluation of a simple model[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38:922-940.
- [49] Kato S, Yamaguchi Y. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(1):1-17.

Research Progress on Urban Heat Island Effect Based on Energy Balance

XIAO Jie-ying, ZHANG Qian, WANG Yan, JI Na

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Rapid urbanization process resulted in serious environment problems, such as fragile ecology, water shortage and urban heat island (UHI) effect. UHI is one of the most important topics which attracted much more attention because of its' close relation with urban residents living level. The main causes of UHI are large amount of heat generated from re-radiate solar radiation by underlying surface and anthropogenic heat sources by factories and human daily life. UHI affect ecological environment quality and downgrade living level of urban residents, even threat to their life. So it is urgent to slowdown UHI effect development. Understanding the formation of UHI is very significant for finding slow down UHI measurement. This study summarizes the past researches about the formation mechanism of UHI from the view point of energy balance. Also summarizes the analysis methods and research results of energy balance in previous studies including net radiation, anthropogenic heat, sensible heat flux, latent heat flux and storage heat flux. Authors try to present that the method for analyzing UHI by which combining remote sensing image and meteorological data is effective and practical. Also we realized that the deficiencies of previous UHI studies base on energy balance, such as how can draw anthropogenic heat into energy balance equation reasonably and calculate its contribution rate. The other limitation is lack of field verification for simulation results.

Key words: urban heat island effect; energy balance; anthropogenic heat

(责任编辑 方 兴)