

城市热岛的生态环境效应

肖荣波¹, 欧阳志云^{1*}, 李伟峰¹, 张兆明², TARVER Jr Gregory¹, 王效科¹, 苗 鸿¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院中国遥感卫星地面站, 北京 100086)

摘要: 城市热岛效应(Urban heat island effect, 简称UHI)是一种由于城市建筑及人类活动导致热量在城区空间范围内聚集的现象, 是城市气候最显著的特征之一。热岛引起地表温度的提高, 必将强烈地影响着城市生态系统的物流、能流, 改变城市生态系统结构和功能, 产生一系列生态环境效应, 影响着城市气候、城市水文、城市土壤理化性质、城市大气环境、城市生物习性、城市物质循环、城市能量代谢以及城市居民健康等。提高能量利用效率、优化城市格局、建设绿色屋顶、采用高反射率地表材料以及增加城市绿地均可有效地控制城市热岛效应。利用遥感手段和数值模型技术, 开展多尺度的城市热岛生态环境效应研究, 为改善城市生态环境、实现城市可持续发展提供理论依据。

关键词: 城市热岛; 生态效应; 城市气候; 生态过程; 景观生态; 城市生物

文章编号: 1000-0933(2005)08-2055-06 中图分类号: Q 143 文献标识码: A

A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands

XIAO Rong-Bo¹, OUYANG Zhi-Yun^{1*}, LI Wei-Feng¹, ZHANG Zhao-Ming², TARVER-Jr Gregory¹, WANG Xiao-Ke¹, MIAO Hong¹

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2055~ 2060

Abstract One of the most well known forms of anthropogenic climate modification is the phenomenon of urban heating. Throughout various studies, the ambient temperatures of numerous urban centers have been determined to be several degrees higher than the ambient air temperatures of surrounding rural areas. This phenomenon, first documented in London by Lake Howard in 1833, is referred to as the Urban Heat Island Effect (UHI), and is still studied in many of the largest cities around the world.

Based on the 34 English and 12 Chinese publications, we summarize the effects of urban heat islands on urban eco-environment. This review finds the urban heat islands have a number of meteorological and eco-environmental consequences. Long-term research is being conducted in urban areas to determine if UHI plays a role in altering macro-scale meteorological patterns, such as snow frequency, snow cover, average dates of last freeze in spring and the first freeze in autumn. The thermal signature of UHI has been found to increase the incidence of downwind precipitation, and catalyzes complicated interactions in urban photochemistry reactions. The effect of the urban heat island on urban soil's physical and chemical characters is also very pronounced. UHI not only increases urban soil temperature, but also affects soil metabolism. The high levels of emissions of heat and pollutants in urban areas have significant impacts on the local environmental qualities of air temperature and air chemistry. This phenomenon does exert an influence on the behaviors of urban biology, urban biogeochemical cycle, urban energy utilization, resident bioclimatological conditions and health, etc. While, in many places, the heat island effect contributes to fuel saving in the colder seasons, this is often outweighed by the additional energy needs for air conditioning in summer.

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KZCX3-SW-424)

收稿日期: 2005-01-10; **修订日期:** 2005-04-13

作者简介: 肖荣波(1978~), 男, 湖北襄樊人, 博士生, 主要从事城市生态、3S应用研究。E-mail: ecxiaorb@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zyouyang@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: The Project of Knowledge Innovation CAS (No. KZCX3-SW-424)

Received date: 2005-01-10; **Accepted date:** 2005-04-13

Biography: XIAO Rong-Bo, Ph. D. candidate, mainly engaged in urban ecology, 3S and ecological planning. E-mail: ecxiaorb@163.com

The intensity of UHIs can be mitigated by reducing artificial heat and greenhouse gas emissions, planning cities rationally, constructing rooftop gardens, preserving more water, planting more street trees, and using high-albedo building materials. Furthermore, used strategically, plants can absorb large quantities of solar radiation and modify air temperatures through transpiration. Referencing trends in related scientific fields, it can be gathered that further research on the ecological effects of urban heat islands should be encouraged. Finally, this review ends with a summary of future development trends of urban heat island assessment and abatement.

Key words: urban heat island; ecological effects; urban climate; ecological process; landscape ecology; urban biology

城市热岛效应(urban heat island effect, 简称 UHI)是一种由于城市建筑及人们活动导致热量在城区空间范围内聚集的现象,是城市气候最显著的特征之一。早在 19 世纪初, Lake Howard 在研究伦敦城市气候时,首次发现并论述了城市热岛现象,从此许多学者对城市热岛效应的特征作了大量研究,得出了城市热岛效应与城市人为热量释放、下垫面性质和结构、植被覆盖、人口密度、天气状况等有密切关系^[1-4],并且伴随着城市化进程的继续,城市热岛强度及规模会日益加剧。Szeged 城市热岛强度达到 3.1^[5], New York 最高可达到 8.0^[6]。我国城市热岛效应也非常突出:北京 1961~2000 年市郊日均气温差为 3.3^[7],上海热岛强度最高达 7.4^[8]。城市温度尤其是地表温度,是城市表层能量平衡的中心,是影响城市气候最为重要的因素之一,调节和控制着许多生态学过程。而日益强烈的城市化导致了地表温度的提高,必将强烈地影响着城市生态系统的物流、能流,改变城市生态系统结构和功能,同时影响着城市居民健康。城市热岛效应一直以来受到城市气象专家的关注,但由于研究对象的复杂性,到目前为止,从生态系统的角度比较全面对城市热岛所引发的生态环境效应研究报道较少。本文就城市热岛的生态环境效应及预防对策进行了系统阐述,以期为我国城市生态环境保护以及可持续发展提供理论依据。

1 城市热岛的生态环境效应

温度是生态系统的重要生态因子之一。城市热岛改变了城市热量环境,影响区域气候、城市水文、空气质量、城市土壤理化性质、城市生物的分布与行为以及诸多城市生态过程如物质代谢、能量循环等,引发出一系列生态环境问题。

1.1 城市气候特征

城市气候在人类活动的影响下,形成了有别于郊区的局部气候特征。各个气候因子如日照、辐射、气温、风向、湿度、云、雾和降雨等之间相关联系、相互制约,呈现一定规律性。城市热岛与城市干岛、湿岛、混浊岛和雨岛等之间可以相互影响、相互转换^[9]。由于城市蒸发、蒸腾量都远比郊区小,而城市气温又比郊区高,使得城市中空气的平均绝对湿度和相对湿度都较小。但在一定的条件下,城市夜间的绝对湿度又会较高形成“城市湿岛”。城市热岛效应会引起局地环流,使得城市风场特征极为复杂。热岛的存在使得城区凝露量、结霜量、霜冻日数、下雪频率和积雪时间都小于郊区^[9]。一项在纽约的试验表明:在中心区曼哈顿冬季降雪不足 30%,低于都市区周围的 40%~45%^[10]。另外一个有代表性的例子就是 Lindquist 在瑞典的 Lund 城,1965 年冬季测得郊区降雪量为 6~8cm,而城市中心仅为 3cm;中午时刻市中心和郊区气温分别是 0.5℃、-1.0℃;等降雪线几乎是以市中心为圆心的同心圆^[11]。城市热岛还改变着其它城市气象,例如云和雾的发展^[12],闪电的频率^[13]等。

1.2 城市水文特征

热岛效应影响着云的形成和运动^[14],对局地降雨及降雨机制产生影响,使得城市区域水文特征发生变化:城市地区的降水量、地表径流明显大于周围农村地区;但蒸发量、地下径流明显小于周围农村地区。一般认为,城市热岛可以增加城市的降雨^[15],增加的区域集中在市中心及其下风向范围。主要是由于在静风的条件下,热岛使得城区气压相对较小,乡村较冷的空气流向城区,形成局部空气对流,产生降雨^[16]。但城市热岛效应只是增加了降雨量而不会引起降雨,即它不会提高降雨次数,只是刺激降雨量。热岛效应引发的降雨并不是发生在热岛强度最大的时候,而是发生在空气湿度相对很高、城市边缘气团不稳定的时期^[17]。这是因为当空气太稳定时,不会发生对流;而空气十分不稳定时,大范围的空气对流又会掩盖城市热岛的影响;所以只有在微弱的气流下,有相对较高的空气湿度,不规则的热岛才可能起到关键作用。城市热岛影响降雨格局一贯被认为是由于城市污染导致浓缩核(condensation nuclei)增加,高耸建筑使得地表粗糙度提高等引起,但最近的研究表明:提高浓缩核不会引起降雨增加。Rosenfeld 声称由于城市污染可以提高浓缩核,但很少会合并(coalescence)形成雨滴^[18]。陈云浩等对上海研究表明:不同的热力背景对下垫面降雨分布有不同影响,降雨量依次从自然背景、低温背景、高温背景递增。在自然背景下,年降雨为 974.2mm,在低温背景下则为 1027.2mm,增加 53mm,增加幅度为 5.4%,而高温背景下年降雨则为 1075.7mm,增加了 10.5mm,增幅为 10.4%^[19]。

1.3 城市土壤理化特征

由于城市热岛效应,城市土壤温度比周围自然土壤高^[20]。Mount 等通过监测了纽约市中央公园和拉托里特公园土温特征表明,人为活动明显提高了土壤温度,城市土壤年平均土温比邻近的林地高 3.1~11.2^[21]。土壤温度的改变会影响土壤温湿

环境、呼吸代谢、养分活性、化学反应速度、微生物活动以及土壤生物多样性甚至土壤自身的发生形成过程等^[22]。土壤温度变化导致微生物群落组成及其活性变化; 某些微生物群落成员在较高温度时有能力代谢那些在较低温度时不能被利用的基质; 大多数研究结果显示, 温度对土壤溶液中的溶解态有机质和土壤有机磷组分有较大的影响^[23]。

1.4 城市大气环境

由于城市热岛的存在, 围绕着城市热岛中心存在一股较强暖的上升气流, 且一边上升一边向外辐射, 到达郊区或乡村开始下沉, 郊区的冷空气又吹向城市, 形成一个闭合环流圈, 造成城郊之间污染物的恶性循环。在城市热岛中心的上升热气流中, 含有大量的尘埃和烟雾, 一部分尘埃上升后并降落在城市周围, 一部分则停留在空中形成“微尘云”。郊区低层污染物在局地环流的作用下, 聚集在城市上空, 而空气中大量尘埃的存在, 易于雾的形成。在夜晚气温降低使得水汽凝结形成雾, 雾向下沉并成为烟雾, 这种烟雾使得能见度降低, 对人类的呼吸产生危害, 严重时会造成空气污染事件。城市热岛越强, 污染物和烟雾的浓度越大, 危害性也就越强^[24]。而热岛的垂直分布, 使得空气污染物在一定高度不易扩散, 加重污染。日本 Okayama 城市上空大约 100m 处 NO_x 是地面浓度的 2 倍, 而 100m 高度正好是热岛引起的空气逆温层的底部, 但是该现象在 3.5km 外郊区不存在^[25]。

城市里持续的高温可以加速某些特定的大气化学循环, 从而导致地表臭氧的提高。根据 Arrhenius 关系, 化学反应速度通常与温度呈正相关: $k(T) = \exp(-T^{-1})$ 。温度的增加会明显增加臭氧的生成。在影响广州局地环流 3 种类型中, 辐散型流场地面臭氧浓度最低, 热岛环流型地面臭氧浓度最高。地面高浓度臭氧会增加城市光化学烟雾的频率, 加快材料老化, 影响人类健康^[26]。除此之外, 高温增加生物烃 (Biogenic hydrocarbons) 及人造挥发性有机混合物蒸发的提高, 它们都关系着对对流层中臭氧的产生^[27]。Taha 的模拟试验结果表明: 增加高反射率的地表面积可以减少臭氧的浓度, 进一步论证了该观点^[28]。

1.5 城市生物习性

温度是影响生物分布、活动等习性的生态因子。城市热岛改变城市近地表热量结构, 提高市区温度, 使得生物物候、生理活动、区系组成、种群结构、分布范围以及繁殖活动等发生改变。由于市中心温度提高, 植物发芽、开花时间提前, 落叶时间延迟^[29]。在北美洲东部 70 个城市里, 植物生长期比对应的郊区延长了大约 15d, 早春每增加 1℃, 植物开花会提前 3d, 春天市区表层温度比乡村平均高 2.3℃, 植物提前 7d 变绿; 秋天市区高出 1.5℃, 植物延迟 8d 落叶^[30]。温度提升促进近地层臭氧形成, 导致近郊农业作物减产 5%~10%^[31]。影响城市生物多样性的原因主要是生境的破坏, 但由于市区温度的提高, 无霜期延长, 极端低温趋向缓和, 使得本不属于该区系的植物经过人类驯化, 在城市得以繁殖生长。另一方面, 由于温度的提高, 尤其是极端高温的提高, 又限制了一些植物的生长。温度对城市动物生态习性影响也很大。如苍蝇种群密度与气温又很大的关系, 当环境温度达到苍蝇各个生活周期发育的有效积温时, 苍蝇就开始它们的生长发育过程, 并随着温度的不断升高, 发育周期不断缩短; 但当超过一定的临界温度时, 苍蝇的发育又会受到抑制, 蝇类的季节消长呈双峰型^[32]。温度对城市微生物的存活力影响较大, 如沈阳空气微生物粒子浓度与温度呈正相关, 空气温度由 10℃ 升到 17℃, 人口较少的大屯空气微生物由 11 个/皿增加到 80 个/皿, 而人口群聚的中街由 779 个/皿增加到 835 个/皿^[33]。

1.6 城市物质循环

城市温度上升将影响城市生态系统中的 C、N 等气体型物质循环。城市自然生态系统中, CO_2 经过绿色植物的光合作用, 把碳固定生成糖类, 然后经过消费者和分解者, 在呼吸和残体腐败分解后, 返回到大气中。温度上升, 植物净生产力增加。Lieth 曾提出温度和净初级生产力的相关模型, 认为对植物生产力而言, 最适温度为 15~25℃^[34]。热岛效应使得市区温度高于郊区, 白天市区植物光合作用加强而大量吸收 CO_2 ; 夜晚, 由于市区生物呼吸更加强烈, 释放出更多的 CO_2 。温度升高一般还会促进土壤 CO_2 的排放^[35]。城市热岛对 N 循环影响比较复杂。温度升高加快了土壤中的硝化、反硝化、有机质分解和 N 的矿化作用速率。在土壤环境温度范围内, N_2O 的产生速率与土壤温度有正相关性, 当年均气温超过 14.7℃ 时, 大豆的 N_2O 释放通量反而略微下降。原因可能是在较高的气温条件下, 温度升高易引起大豆植株气孔关闭而影响 N_2O 释放^[36]。

1.7 城市能量代谢

夏季城市热岛加剧了酷热, 应用空调制冷所消耗的能量是十分可观的; 同时, 冬季热岛又会明显降低热的需要量。美国加州大学伯克来劳伦斯 (LBL) 就洛杉矶和华盛顿市长期气温变化与空调耗电量关系进行了研究, 指出洛杉矶从 1930 年以后气温每 10a 增加 1.3°F (0.7℃), 华盛顿市从 1900 年以后近 80a 平均气温约增加 4°F (2.2℃), 气温每增加 1°F, 空调电能增加 20%^[37]。在欧美, 空调开放冷气所消耗的能量用“度日” (Degree day) 计算。度日以日平均气温 18℃ 为基数, 空调时段内各天日平均气温高于 18℃ 的度数总和, 即为冷度日数^[38]。夏季城市空调度日数远比附近郊区机场多, 尤其是在大型城市表现明显。与此相反, 在冬季市区加热度日数明显低于郊区, 为居民节省燃料, 据统计只要城市日均气温比郊区机场高 1~2℃, 就能节约城市中取暖用煤气消耗量的 5%~15%。但在许多地方, 因夏天使用空调冷却所增加的耗能仍高于冬季时所节省的能源。

1.8 城市居民健康

大气环境所具有的一些气象参数 (温度、湿度、空气流动及辐射) 决定着人类户外生物气候条件。一般选用温湿指数 (Ther-

moHYgrometric index, 简称 TH I), 相对压力指数(Relative strain index, 简称 RSI) 以及 Beer garden 天数(21:00 点温度高于 20 的天数)。其中, 温湿指数使用最为广泛。它被定义为 $THI = t - (0.55 - 0.0055f) \times (t - 14.5)$, f 为相对湿度。THI 指数一般被用来表示人类对热的不舒适程度(见表 1)。从表中可以看出, 人类最适宜的温度环境时 THI 指数在 15~20。当 $THI < 15$, 蒸发携带热量而感到寒冷; 当 $THI > 20$, 感到炎热而大汗淋漓^[40]。城市热岛使得市区比郊区温度高出很多, 尤其是在炎热的夏季, 持续的高温使人心情烦躁, 工作效率降低; 同时热岛加剧城市大气污染, 对居民健康构成严重威胁。在热岛中心长期居住的居民以消化系统疾病多见, 表现为食欲减退、消化不良、溃疡病最多, 胃肠道疾病的复发周期短, 复发率高。热岛中心地区居民神经系统方面的损害也较严重, 神经系统患病率达 30%, 主要表现为神经官能症、失眠、烦躁不安、记忆力下降、精神萎靡、忧郁压抑感等^[41]。但在匈牙利南部城市塞格德, 市区由于热岛存在一年中具有更多的舒适气候环境(占全年的 30%)和较少的寒冷时间(占 54%); 而郊区对应的分别为 20%、66%^[40]。

2 热岛对策

2.1 减少人为热排放

减少城市人为热和大气污染物的排放, 避免大量使用煤炭、燃油等, 尽可能开发使用太阳能、风能等可再生的绿色能源; 同时, 大力推广集中供热, 提高能源利用效率, 尤其是交通运输、工业生产的能源利用效率, 尽量减少人为热和温室气体的排放。

2.2 科学合理规画城市

城市热岛与建筑物密度呈正相关, 跟风速大小呈负相关, 所以在进行城市规划或改造过程中, 改变建筑空间布局, 严格控制建筑密度, 安排合理的建筑间距, 避免市区内建筑呈团块状分布。根据城市常年气象条件, 布局道路系统, 加快市区与郊区的空气流通。工业区应尽量安排在城市盛行风的下风向, 尽量减少它对城市热环境的不利影响。

2.3 建设绿色屋顶

绿色屋顶改变了建筑的习性, 其结构不易产生极高的温度, 主要是由于通过建造绿色屋顶, 太阳辐射、外部温度、相对湿度以及风速等都会降低, 而且植物通过生物代谢过程可以吸收大量的太阳能。在屋顶植被吸收的热量中, 其中有 27% 用于反射, 60% 被植物和土壤吸收, 13% 被传输到土壤中了^[42]。绿色屋顶可以大大降低房屋能耗, 仅树木阴影可以减少降温能耗的 10%~50%^[43]。

2.4 采用高反射率的地表材料

采用高反射率的地表材料是减轻城市热岛直接而又廉价的方法。利用该方法结合种植树木等, 可以有效地降低市中心温度, 减少能量消耗, 降低烟雾形成, 提高城市空气质量^[44]。Sarah Bretz 对 California 表层材料作了费用-收益分析, 定量分析了高太阳反射率的材料减少能耗的作用, 强调其可以缓解热岛效应, 提高空气质量^[45]。

2.5 增加城市绿地、水体

城市绿地、水体具有“冷岛效应(park cool island effect)”。无论白天或黑夜, Vancouver 公园一般要比周围低 1~2, 理想条件下其温差可达 5, PCI 效应明显。公园类型、种植方式以及灌溉幅度是影响 PCI 发挥的重要因子。白天, 树木通过阴影和蒸发交互作用降低气温; 夜晚, 地表几何结构和公园湿度能控制地表降温, 但公园对气温的影响是有限的, 一般局限在大约一个公园的宽度范围^[46]。

3 研究展望

(1) 目前城市热岛研究主要集中在热岛时空分布及其影响因子, 而城市热岛与其它生态环境问题的关系未受到人们重视, 因此有必要系统地研究城市热岛时空变化对城市生态系统结构、功能的影响, 以及它们之间相互作用机制, 为城市规划、可持续发展提供理论依据。

(2) 城市热岛起初只是比较城郊气温的差异, 后来发展为利用移动样带的方法测定热岛水平空间分布, 垂直布点测定热岛立体空间分布。遥感技术测定地表温度具有覆盖广、监测快、更新容易等优点, 很快得以运用。随着高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率传感器的发展, 尤其是相应的新一代卫星遥感出现, 大大促进了利用遥感技术定量分析物体热学性质与地表生态环境参数的关系, 但遥感模型反演中的不确定性是当今面临的极大挑战。

(3) 由于城市热岛的复杂性决定了其研究模型的多样性, 前期的统计模型和能量平衡模型可以从宏观上描述城市热岛时空变化, 实验室模型由于条件易控, 可重复性强, 周期短等, 在进行城市热岛复杂模型研究时具有明显的优势。数值模型可以从时

表 1 湿热指数分类^[39]

Table 1 The categories of the themohygrmetric index (THI)	
湿热指数类型 THI category	温度 Temperature ()
高度冰冷 Hyperglacial	< - 40
冰冷 Glacial	- 39.9~ - 20
极端寒冷 Extremely cold	- 19.9~ - 10
非常寒冷 Very cold	- 9.9~ - 1.8
寒冷 Cold	- 1.7~ + 12.9
凉爽 Cool	+ 13~ + 14.9
舒适 Comfortable	+ 15~ + 19.9
热 Hot	+ 20~ + 26.4
很热 Very hot	+ 26.5~ + 29.9
酷热 Torrid	> + 30

空上详细研究城市热岛的产生、发展及对环境的影响。它是用数值计算方法直接求解物质守恒方程, 或者求解在各种近似条件下简化形式的物质守恒方程。它不但能求出城市热岛产生变化过程, 还能求出城市温度场、风场以及污染物场的分布情况。借助于遥感数据作为模型输入量, 进行大气质量、城市生态环境模拟已经成为一种趋势。

(4) 城市热岛在空间和时间上所涉及到的范围和发生的频率是不同的, 决定了研究城市热岛所采用的时空尺度各不相同。在某一尺度上, 观测到的城市热岛性质、规律, 在另一个尺度上不一定有效, 需要验证与修正。不同尺度上, 与热岛现象相联系的生态环境问题差异很大。而多平台、多传感器方式采集的地面数据也具有多空间分辨率特征。所有这些, 都要求研究者注重城市热岛研究中尺度转换问题。借助于景观生态学思想, 研究不同尺度上城市景观格局对热力学响应机制以及引发的生态环境问题已日益受到关注。

References

- [1] Shobhakar Dhakal. The urban heat environment and urban sustainability. In: Fred Moavenzadeh, Keisuke Hanaki, Perer Baccini eds *Future Cities: Dynamic Inc and Sustainability*. London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 179~ 172
- [2] Gillies R R, and Carlson T N, Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, **34**: 745~ 756
- [3] János Unger, Zoltán Süneghy, Judit Zoboki. Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research*, 2001, **58**: 117~ 127.
- [4] Kidder S Q, and Essenwanger O M. The effect of clouds and wind on the difference in nocturnal cooling rates between urban and rural areas. *J. Appl Meteor.*, 1995, **34**: 2440~ 2448
- [5] Bottyán Z, Unger J. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, **75**(3-4): 233~ 243
- [6] Gedzeman S D, Austin S, Cemak R, et al. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, **75**(1-2): 29~ 42
- [7] Song Y L, Zhang S Y. The study on heat island effect in Beijing during last 40 years. *Chinese Journal of EcoAgriculture*, 2003, **11**(4): 126~ 129
- [8] Shu J, Jiang T H. Character analysis of Shanghai urban heat island. *Shanghai Environmental Science*, 2000, **19**(11): 532~ 534
- [9] Zhou S Z, Shu J. *The Urban Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1994
- [10] Grillo J N, Spar J. Rain-snow mesoclimatology of the New York metropolitan area. *J. Appl Meteorol.*, 1971, **10**: 56~ 61
- [11] Lindquist S. Studies on the local climate in Lund and its environments. *Lund Studies Geogr. Ser., A.*, 1968, **42**: 79~ 93
- [12] Sachweh M, Koepke P. Radiation fog and urban climate. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**: 1073~ 1076
- [13] Orville R E, Hu-nes G, Nielsen-Gammon J, et al. Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**: 2597~ 2600
- [14] Bornstein R, LeRoy M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms. Extended Abstracts, Fourth Conf. on Mesoscale Processes, Boulder, CO., 25~ 29 Jan, 1990
- [15] Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J. Appl Meteor.*, 2002, **41**: 689~ 701
- [16] Bornstein R, Lin Q L. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 507~ 516
- [17] P Grady Dixon, Thomas L Mote. Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island-Initiated Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, **42**(9): 1273~ 1284
- [18] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, **287**: 1793~ 1796
- [19] Chen Y H, Shi P J, Li X B. Effect of different thermal background on urban rainfall (rainstorm). I. spatial difference of rainfall distribution. *Journal of Natural Disasters*, 2001, **10**(2): 37~ 42
- [20] Craul P J. A description of urban soils and their desired characteristic. *Journal of Agriculture*, 1985, **11**(1): 330~ 339
- [21] Mount H. Temperature signature for anthropogenic soils in New York city. In: Kimble J M, et al eds *Classification, Correlation and Management of Anthropogenic Soils, Proceedings Nevada and California*. September 21-October 2, 1998. USDA-NRCS, National Soils Survey Center, Lincoln, NE, 1999. 137~ 140
- [22] Oke T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In JE Cemak (ed) *Wind Climate in Cities*, Netherlands: Kluwer Acad., 1995. 81~ 107.
- [23] Xiao H L, Zheng X J. Effects of Soil Warming on Some Soil Chemical Properties. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**(4): 316~ 321.
- [24] Peng X L, Zhou H S, He Z J. Influence of urban heat island effect on urban ecological system and research of antidote. *Jiangxi Science*, 2003, **21**(3): 257~ 259.
- [25] K Sahashi, T Hieda, E Yamashita. Nitrogen-oxide layer over the urban heat island in Okayama city. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(3): 531~ 535.

- [26] Wang X M, Han Z W. Surface ozone concentration in Guangzhou under different meteorological conditions. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, **20**(5): 571~ 578
- [27] David R Streutker. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **85**: 282~ 289
- [28] Taha H. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(11): 1667~ 1676
- [29] Sukopp H. Urban ecology—scientific and practical aspects. In: Breuste J, Feldmann H, O Uhlmann Eds. *Urban Ecology*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 3~ 16
- [30] NASA. Urban Heat Islands Make Cities Greener. http://www.nasa.gov/centers/goddard/new_s/topstory/2004/0801uhigreen.html
- [31] Chameides WL, Kasibhatla PS, Yienger J, et al. Growth of continental-scale metro-agroplexes, regional ozone pollution, and world food production. *Science*, 1994, **264**: 74~ 77.
- [32] Sun J M, Sun B C, Yu Z J. Investigation on population distribution and seasonal changes of flies in Yancheng city. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 2004, **10**(1): 33~ 34
- [33] Zhou D S, Ma X P, Liu Y J, et al. Study on system distribution of airborne microbe in Shenyang. *Environmental Protection Science*, 1994, **20**(1): 10~ 14
- [34] Lieth H. Modeling the primary production of the world. In: Leith H, Whittaker RH eds. *Primary Production of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1975. 237~ 262
- [35] Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Acclimatization of soil respiration to warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(11): 2649~ 2655
- [36] Xu W B, Hong Y T, Chen X H, et al. The potential effects of climate changes in future on N₂O emission from agricultural soils. *China Environmental Science*, 1999, **19**(5): 387~ 391.
- [37] Akbari H, Rosenfeld A, Taha H. Recent developments in heat island studies technical and policy. Proceedings of the Workshop on Urban Heat Islands, Berkeley, February 23~ 24, 1989.
- [38] Helmut E. Landsberg. *The urban climate*. New York: Academic Press, 1981. 118~ 123
- [39] Kyle W.J. The human bioclimate of Hong Kong. In Brazdil R, Kolařík M eds. *Proceedings of the Contemporary Climatology Conference*. Brno: TISK LITERA., 1994. 345~ 350
- [40] János Unger. Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central-European city. *Int J Biometeorol*, 1999, **43**: 139~ 144.
- [41] Xue Z C. Urban heat island menaces residential health. *Safety & Health*, 2002, **7**: 15~ 16
- [42] Ekaterini E, Dimitris A. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings*, 1998, **27**(3): 29~ 36
- [43] Simpson J R, McPherson E G. Potential of tree shade for reducing residential energy use in California. *Journal of Arboriculture*, 1996, **22**(1): 23~ 31.
- [44] Akbari H, Pomeranz M, Taha H. Cool Surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 2001, **70**(3): 295~ 310
- [45] Sarah Bretz, Hashem Akbari, Arthur Rosenfeld. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(1): 95~ 101.
- [46] Spronken-Smith R A, Oke T R. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *Int J. Rem. Sens*, 1998, **19**(11): 2085~ 2104

参考文献:

- [7] 宋艳玲, 张尚印. 北京市近 40 年城市热岛效应研究. *中国生态农业学报*, 2003, **11**(4): 126~ 129.
- [8] 束炯, 江田汉. 上海城市热岛效应的特征分析. *上海环境科学*, 2000, **19**(11): 532~ 534
- [9] 周淑贞, 束炯. *城市气候学*. 北京: 气象出版社, 1994
- [19] 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 不同热力背景对城市降雨(暴雨)的影响. I. 降雨分布的空间差异. *自然灾害学报*, 2001, **10**(2): 37~ 42
- [24] 彭希琄, 邹寒山, 何宗健. 城市热岛效应对城市生态系统的影响及其对策研究. *江西科学*, 2003, **21**(3): 257~ 259.
- [26] 王雪梅, 韩志伟. 气象条件对广州地面 O₃ 浓度分布的影响. *热带气象学报*, 2004, **20**(5): 571~ 578
- [32] 孙金明, 孙伯超, 于志俊. 盐城市蝇类种群分布及季节消长调查. *中华卫生杀虫药械*, 2004, **10**(1): 33~ 34
- [33] 周大石, 马汐平, 刘玉晶, 等. 沈阳市大气微生物区系分布研究. *环境保护科学*, 1994, **20**(1): 10~ 14
- [35] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应. *生态学报*, 2004, **24**(11): 2649~ 2655
- [36] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 未来气候变化对旱田生态系统 N₂O 释放的潜在影响. *中国环境科学*, 1999, **19**(5): 387~ 391.
- [41] 薛志成. 城市热岛效应威胁人类健康. *安全与健康*, 2002, **7**: 15~ 16