

北京市 6 种下垫面不同季节温湿度变化特征

吴 菲¹, 朱春阳², 李树华³

(1. 北京市植物园, 北京 100093; 2. 华中农业大学, 湖北 武汉 430070; 3. 清华大学 建筑学院, 北京 100084)

摘 要:选择北京市玉渊潭公园 6 种不同下垫面作为研究对象,进行了不同下垫面四季温湿效益的研究。每天 8:00—18:00,每 2 h 分别对 6 种下垫面的温度、相对湿度进行同步测定 1 次,春、夏、秋、冬各季分别连续测定 7 d。结果表明:城市中的绿地和水体具有明显的微气候效应。绿地夏季的降温增湿效果最明显,其次为春、秋季,冬季的温湿效益最小。在春、夏、秋季,绿地具有降温作用,在冬季,绿地具有保温作用。夏季,水体下垫面的降温作用比较明显,仅次于乔灌草下垫面,其降温值远高于其他类型的下垫面。夏季绿地比铺装温度低 0.8~4.1℃。不同类型下垫面春、夏、冬季的相对湿度高低趋势一致,均为:水体>乔灌草>灌草>草坪>铺装>建筑,秋季为:灌草>乔灌草>水体>草坪>铺装>建筑。夏季水体比建筑的相对湿度高 10.2%~15.4%。

关键词:城市下垫面;温湿效应;绿地;水体

中图分类号:S731.2 **文献标志码:** A **文章编号:**1001-7461(2013)01-0207-07

Seasonal Changes of Temperature and Humidity of Six Urban Underlying Surfaces in Beijing

WU Fei¹, ZHU Chun-yang², LI Shu-hua³

(1. Beijing Botanical Garden, Beijing 100093, China; 2. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract: Six kinds of underlying surfaces were selected at Yuyuantan Park in Beijing to study their impacts on temperature and humidity. The temperature and relative humidity were measured once every two hours from 8:00 to 18:00 every day for seven days in each season. The results indicated that urban greening land and water body demonstrated microclimatic effects. The effects of decreasing the temperature and increasing the humidity of the greening lands were most remarkable in summer, then in spring and autumn, and least in winter. The greening land decreased the temperature in spring, summer and autumn while increased the temperature in cold winter. The decreasing temperature effect of water body was distinctive in summer whose temperature was lower than those of other underlying surfaces. Compared with pavement, the greening land could decrease the temperature ranging from 0.8 to 4.1℃ in summer. Similar variation patterns of different surfaces in the relative humidity were observed in spring, summer, and winter, i. e., water body grass>arbor-shrub-grass grass>shrub-grass>pavement>building, while the order was shrub-grass>arbor-shrub-grass>water body>pavement>building in autumn. Compared with building, the water body could increase the relative humidity by 10.2%~15.4% in summer.

Key words: urban underlying surface; temperature-humidity effect; greening land; water body

近 10 多年来,随着经济和人口的不断增加,北京城区范围有了很大的扩张,相应的城市下垫面环境也有很大的改变。下垫面与城市热环境的关系密切,然而在城市设计中却往往被人们所忽略。在城

市化的地区,人类活动对气候的影响,首先是通过对于下垫面性质的改变来体现的,它与空气间存在着复杂的物质交换和能量交换^[1]。

在研究城市下垫面对气候变化影响方面,各国学者通过实地调研和现场测定,发现不同纬度、不同类型、不同绿化方式、不同铺装材料以及不同环境设计均影响着城市下垫面的热环境^[2-4];A. Chudnovsky^[5]等在晴朗、无风、炎热的天气下对 Tel-Aviv 城内宽阔的广场,狭窄的小街道和林荫道等不同的生境做连续 24 h 观测分析时指出,宽阔的街道和广场,中午时分剧烈增温,夜里急剧冷却;林荫道和有绿化的广场白昼较凉爽;黄良美^[6]等对南京市四种下垫面气温日变化规律进行了研究,定量与定性的揭示了城市景观与城市下垫面对城市热岛效应变化的影响机理,结果表明四种下垫面白天气温呈林地<水体<草地<水泥地的变化趋势,夜晚则是相反;彭江良^[7]等对冬季城、郊下垫面的形态对城市热状况的影响进行了研究;郑祚芳^[8]等研究了城市下垫面对北京夏季高温的影响;康博文^[9]等选择林地、草坪、裸地、水泥地等几种下垫面类型,对城市不同绿地的降温增湿效应进行了测定分析,结果表明:高温季节林地和草坪都有降低地表和土壤温度,减轻温度剧烈变化,增加空气相对湿度的作用;黄海^[10]等将绿地的结构和规模相结合研究了其对增湿降温效应的影响。

北京超大城市的发展,其下垫面条件对大气环境造成的影响尤为明显。目前,国内外关于城市下垫面对城市气候影响的研究多采用温度作为观测指标,且多为对单日观测数据的分析,进行不同季节较长时期连续监测的研究工作还不多,需要更多的观测资料进行深入研究城市下垫面对气候的影响。为此本文选择北京春、夏、秋、冬各季晴朗无风天气,对城市 6 种下垫面的温度、相对湿度进行连续 7 d 的观测。试图通过对城市不同下垫面不同季节温湿效益的量化研究,比较不同下垫面调节城市小气候的差异,以期为指导城市规划设计与园林绿地建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地设置

北京市玉渊潭公园位于北京城西,与钓鱼台国宾馆、中华世纪坛相毗邻,面积 136.69 hm²。其中水体面积 61.47 hm²。选择玉渊潭公园 6 种不同下垫面(每种下垫面设 3 个重复,共 18 处)作为研究对象。6 种下垫面分别为乔灌木下垫面、灌木下垫面、草坪下垫面、水体下垫面、铺装下垫面和建筑下垫面(分别简称为“乔灌木”、“灌木”、“草坪”、“水体”、“铺

装”、“建筑”),“绿地”是指“乔灌木、灌木和草坪这 3 类下垫面的总和”。所选样地的面积均为 1 600 m²,试验地植被现状如表 1 所示。

表 1 试验地植被现状
Table 1 Plants in trial sites

试验地	植物种类	树龄/a	胸径/cm	冠高/m	冠幅/m
乔灌木 1	银杏	23	22.7	12.7	6.2
	(<i>Ginkgo biloba</i>)				
	油松	20	18.5	9.2	5.8
	(<i>Pinus tabulaeformis</i>)				
	臭椿	35	35.9	20.3	9.9
	(<i>Ailanthus altissima</i>)				
乔灌木 2	金银木			4.2	3.8
	(<i>Lonicera maackii</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	(<i>Poa pratensis</i>)				
	早柳	20	25.3	14.7	7.5
	(<i>Salix matsudana</i>)				
乔灌木 3	桧柏	18	18.3	14.2	4.0
	(<i>Sabina chinensis</i>)				
	榆叶梅			3.3	3.8
	(<i>Prunus triloba</i>)				
	连翘			1.8	2.5
	(<i>Forsythia suspense</i>)				
乔灌木 3	草地早熟禾			0.1	
	国槐	30	36.4	18.1	13.5
	(<i>Sophora japonica</i>)				
	樱花	23	21.3	6.5	5.9
	(<i>Prunus serrulata</i>)				
	大叶黄杨			0.8	
灌木 1	(<i>Buxus megistophylla</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	碧桃			3.2	4.6
	(<i>Prunus persica</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	垂丝海棠			2.9	2.3
灌木 2	(<i>Malus halliana</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	金银木			4.3	3.9
	迎春			0.8	
	(<i>Jasminum nudiflorum</i>)				
	野牛草			0.2	
草坪 1	(<i>Buchloe dactyloides</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	蒲公英			0.2	
	(<i>Taraxacum mongolicum</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	紫花地丁			0.1	
草坪 3	(<i>Viola philippica</i>)				
	草地早熟禾			0.1	
	酢浆草				
	(<i>Oxalis corniculata</i>)			0.2	

1.2 测试内容与方法

试验分别于春、夏、秋、冬季进行,春季在 4 月下旬,夏季在 7 月中旬,秋季在 10 月中旬,冬季在 1 月中旬,天气均为晴朗无风天气,符合观测要求。

观测项目有温度、相对湿度。按中央气象局地面观测规范(简称“规范”),每天 8:00—18:00,每 2 h 分别对 6 种下垫面的温度、相对湿度进行同步测定 1 次。所选下垫面采取网格布点,每种下垫面内各选 20 个观测点,在建筑物的东、南、西、北 4 个方向分别设定 5 个观测点,距地面 1.5 m 处测定温湿度,每一季节连续测定 7 d。日、月、年平均值的数值统计整理均按“规范”要求。

1.3 测试仪器

测试仪器采用 HIOKI 3641 温湿度测量仪(日本产),温度测定范围为 $-40\sim85.0^{\circ}\text{C}$,精度为 $-40.0\sim0.1^{\circ}\text{C}$ 时,误差 $\pm1.0^{\circ}\text{C}$, $0.0\sim35.0^{\circ}\text{C}$ 时,误差 $\pm0.5^{\circ}\text{C}$, $35.10\sim70.0^{\circ}\text{C}$ 时,误差 $\pm1.0^{\circ}\text{C}$;相对湿度测定范围为 $0.0\%\sim100.0\%RH$ 。

数据使用 Microsoft Excel 和 SPSS 12.0 软件进行分析处理。

2 结果与分析

将各测试地所测 20 个数据加以平均,得到各测试地的温度、相对湿度值。将同一类型下垫面的 3 个重复加以平均,得到该种下垫面的温度、相对湿度值。将春、夏、秋、冬各季 7 d 不同时刻的温度、相对湿度值加以平均,分别得到春、夏、秋、冬各季不同下垫面温度、相对湿度的变化规律。

2.1 春季不同下垫面温、湿度变化特征

温、湿度的变化改变着局地小气候。春季各下垫面的温度最高值均出现在 14:00 时(图 1)。乔灌木各时刻的平均温度比铺装低 $0.6\sim2.2^{\circ}\text{C}$,平均为 1.4°C 。乔灌木、水体与灌木的温度比较接近,几乎相等,三者的日最高温度分别为 24.0°C 、 24.1°C 、 24.2°C 。14:00 时,乔灌木的最高温度为 24.0°C ,而铺装为 25.6°C ,两者相差 1.6°C 。从 8:00 开始,随着时间的推移,绿地和水体的降温效果逐渐增强,在午后最明显,随后逐渐减弱。

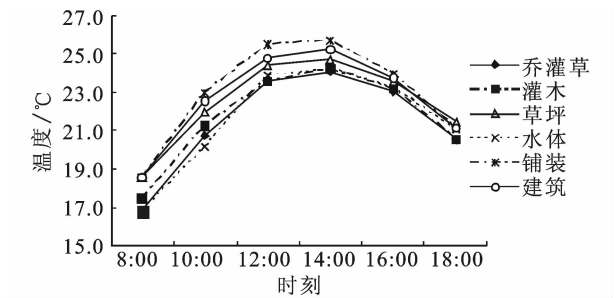


图 1 春季不同下垫面平均温度随时间的变化

Fig. 1 Mean temperature of different underlying surfaces varying with time in spring

8:00—16:00 时,水体的相对湿度是最高的,

比乔灌木高 $1.3\%\sim3.0\%$,18:00 比乔灌木低 1.5% 。一天中各时刻,灌木的相对湿度与草坪比较接近,仅高 $0.2\%\sim1.1\%$ 。铺装和建筑的相对湿度较低,两者比较接近,建筑的相对湿度略低于铺装。与建筑相比,水体的相对湿度比其高 $2.3\%\sim9.0\%$,平均为 5.6% 。在 8:00 时,水体相对湿度比建筑高 9.0% ,12:00 时高 5.8% (图 2)。

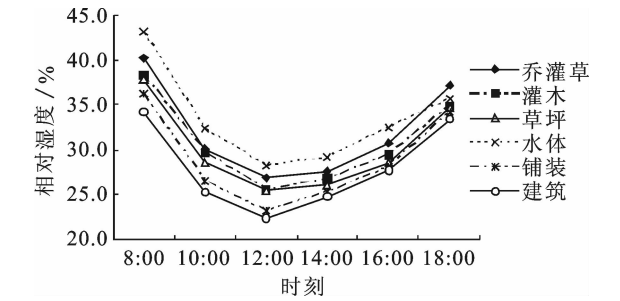


图 2 春季不同下垫面平均相对湿度随时间的变化

Fig. 2 Mean relative humidity of different underlying surfaces varying with time in spring

2.2 夏季不同下垫面温、湿度变化特征

夏季不同下垫面平均温度随时间的变化趋势为:乔灌木 $<$ 水体 $<$ 灌木 $<$ 草坪 $<$ 建筑 $<$ 铺装(图 3)。造成上述差异的原因在于:不同下垫面由于热容量、导热系数和升温速率的不同(表 2)^[1],具有不同的能量平衡和水分平衡,再加上湍流作用的差异,就会产生小气候的差异。此外,不同下垫面对阳光的反射率也不同,加上绿色植物的同化作用及遮阴作用,使绿地的净辐射量远 $<$ 建筑和铺装,同时绿地因植物的蒸腾和蒸发作用消耗的潜热明显比建筑和铺装大。这就使得绿地的贮热量以及地气间的热交换量大为减少,从而使绿地获得的热量少,热效应大大降低。

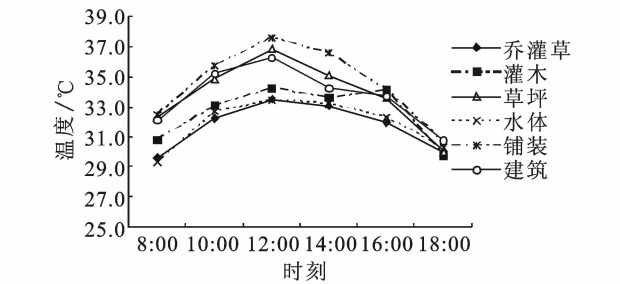


图 3 夏季不同下垫面平均温度随时间的变化

Fig. 3 Mean temperature of different underlying surfaces varying with time in summer

在夏季,乔灌木各时刻的平均温度比铺装低 $0.8\sim4.1^{\circ}\text{C}$,平均为 2.8°C 。12:00 时,铺装的最高温度为 37.6°C ,乔灌木的最高温度为 33.5°C ,两者相差 4.1°C ,降温幅度为 10.9% ,随后降温作用逐渐减弱,18:00 降温幅度最小,仅为 2.5% 。夏季,由于

表 2 各类下垫面升温速率比较(阳光下)

Table 2 Comparison of temperature rise rate with different underlying surfaces (in sunlight)

下垫面	油毡屋顶	柏油地面	玻璃墙面	水泥地面	土地	草地	树冠	气温	水面
升温速率/(℃·h ⁻¹)	6.0	4.9	4.0	4.0	3.3	1.9	1.7	1.6	0.8

建筑物的吸热作用,使热空气上升,空气密度变小,气温较高。一天中各时刻,建筑的平均温度比乔灌木高 0.8~3.0℃。

有关学者对广州市的观测表明,无论是日平均气温、日最高气温或高温持续日数,绿化区均低于未绿化街区;城市中的公园绿化区日平均气温比未绿化区低 2.1℃,日最高气温低 4.2℃。故人们把绿色植物生物降温称为“良性循环降温”,而不像空调器降温那样进行“恶性循环降温”,仅仅是把热量转移到了别的空间,致使外界环境温度更高。在气温约 30℃时,郁闭度较好的树林,每平方米绿化覆盖面积可使周围 10 m²,厚 100 m 的大气层降温约 1.9℃;相对湿度约增加 3.3%^[12]。本研究表明,绿地和水面均有降温作用,属于“良性循环降温”,对城市生态环境的建设起着重要作用。

从 8:00 开始,随着时间的推移,绿地和水体的增湿效果逐渐增强,在午后最明显,随后逐渐减弱。一天中各时刻,水体的相对湿度略高于乔灌木和灌木,远远高于其他类型的下垫面。在 8:00 水体的相对湿度比建筑高 15.4%,14:00 比建筑高 14.2%。绿地夏季的增湿作用远高于春季(图 4)。

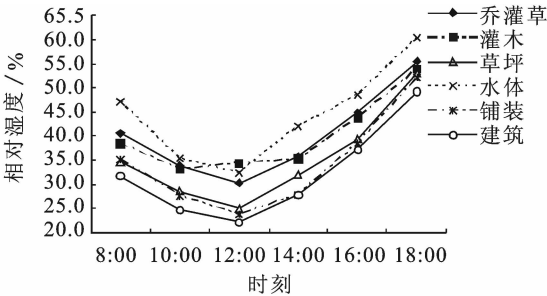


图 4 夏季不同下垫面平均相对湿度随时间的变化

Fig. 4 Mean relative humidity of different underlying surfaces varying with time in summer

由于绿地对太阳辐射的反射及蒸发冷却作用,有降低温度的效应,其中以蒸发冷却为主。草坪绿地和行道绿化树荫下水泥路面较空旷裸露水泥路面地表温度分别平均降低 9.8℃和 8.5℃,最高降温达 15.6℃;乔木行道绿化树和蔓藤攀缘植物较未绿化空旷地日平均地表湿度增加 12.9%~14.7%和 17.5%^[13]。本研究结论与上述趋势一致,在炎热的夏季,绿地的温湿效益明显,其增湿作用尤为明显。与建筑相比,乔灌木一天中各时刻的温度比建筑低 0.8~3.0℃,相对湿度比建筑高 6.2%~9.0%。

2.3 秋季不同下垫面温、湿度变化特征

乔灌木各时刻的平均温度比铺装低 0.4~1.9℃,平均为 1.4℃(图 5)。14:00 时,铺装温度最高,为 19.9℃,比乔灌木高 1.9℃。绿地秋季的降温效果远低于夏季,与春季接近。

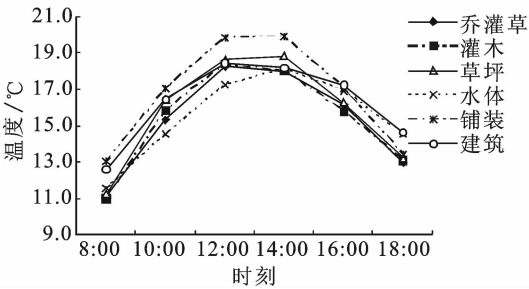


图 5 秋季不同下垫面平均温度随时间的变化

Fig. 5 Mean temperature of different underlying surfaces varying with time in autumn

乔灌木各时刻的平均相对湿度比水体高 1.0%~5.0%,平均为 3.1%。灌木的平均相对湿度比建筑高 2.9%~10.2%,平均为 5.8%(图 6)。树木的树冠可减少太阳对地面的辐射,使建筑物和地表温度明显降低,一般绿地比没有绿化的地面辐射热低 4~15 倍;同时,树木能消耗许多热量用以蒸腾从根部吸收来的水分和制造养分,不仅调节了气温,还增加了空气湿度。园林空间中的绿色植物,是天然的空气增湿器,增湿效果显著。

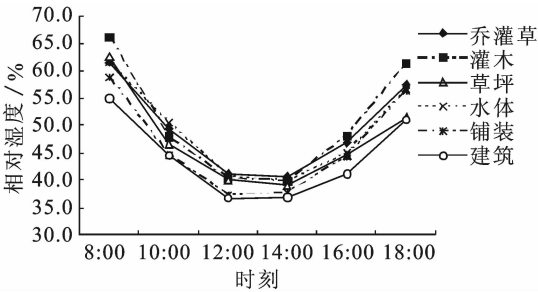


图 6 秋季不同下垫面平均相对湿度随时间的变化

Fig. 6 Mean relative humidity of different underlying surface varying with time in autumn

2.4 冬季不同下垫面温、湿度变化特征

在冬季,白昼期间的大多数时刻,水体的温度是最低的,起降温作用。绿地的温度高于水体,绿地由于热量散失较慢等特点,具有保温作用。铺装和建筑的温度较高,起增温作用(图 7)。本研究结论与尹球^[14]等运用 Landsat ETM+遥感资料为信息源进行分析的结论一致,即城市热场与下垫面类型密

切相关,如果以新村、花园小区或自然村落组成的居住区为基准,无论在夏季还是冬季,水体均起降温作用,城建设施均起增温作用;绿色植被在夏季有降温作用,但在冬季有明显的增温作用。本研究采用的是温湿度仪进行实地测量,在今后的研究中,如能结合运用遥感资料,分析更大区域内的小气候效益,则更具说服力。

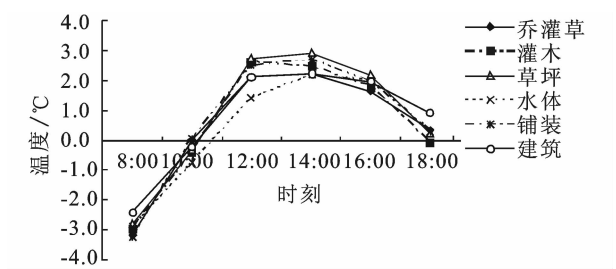


图 7 冬季不同下垫面平均温度随时间的变化
Fig. 7 Mean temperature of different underlying surfaces varying with time in winter

水体的相对湿度是最高的,比乔灌木高 1.5%~3.8%,平均为 2.7%。乔灌木和灌木各时刻的相对湿度十分接近,建筑的相对湿度最低。与建筑相比,水体的相对湿度比其高 3.1%~7.4%,平均为 5.4%(图 8)。

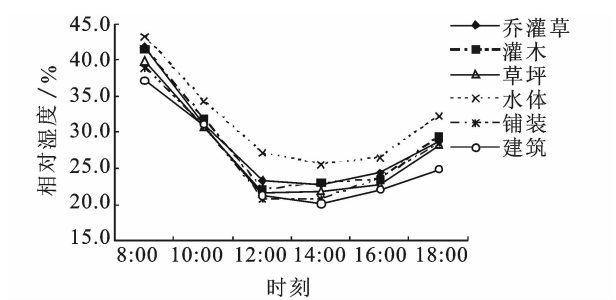


图 8 冬季不同下垫面平均相对湿度随时间的变化
Fig. 8 Mean relative humidity of different underlying surfaces varying with time in winter

2.5 不同下垫面日平均温湿度特征

春季和夏季,不同下垫面日平均温度高低趋势一致,均为乔灌木<水体<灌木<草坪<建筑<铺装;秋季为乔灌木<灌木<水体<草坪<建筑<铺装;冬季为水体<乔灌木<灌木<铺装<建筑<草坪。绿地夏季的降温作用要远高于春季,春季与秋季的降温作用比较接近。水是自然界热容量最大的物质,它可以吸取大量的热,其热容量是空气的 4 倍,因此水温的变化较气温缓慢且滞后,水体是大气的空调器。水体一年四季均起降温作用,建筑和铺装均起增温作用。

春、夏、冬季,不同下垫面日平均相对湿度高低趋势一致,均为水体>乔灌木>灌木>草坪>铺装>建筑;秋季为灌木>乔灌木>水体>草坪>铺装

>建筑。各类下垫面秋季的相对湿度高于其他季节,且处于最适相对湿度的范围,具有较佳的人体舒适度。与秋季相比,春季的日平均温度与其差不多,但由于春季的相对湿度较低,故人体舒适度不如秋季,这与北京春季干燥少雨的气候特征有关。

与铺装和建筑物相比,水体的气温变化相对较小。尤其在夏季,虽然水体吸收的太阳辐射较多,但不易增温,成为城市中的空气调节器。同时,城市水面又是水汽蒸发的源区,故而其上方及附近的空气相对湿度较高。一年四季,绿地和水体均有增湿作用,夏季的增湿作用最强,其次为春季和秋季,冬季的增湿作用较弱。

2.6 5 种下垫面与建筑下垫面日间温、湿度差异变化

以建筑下垫面作为对照,5 种下垫面与建筑的温度日变化差异明显(图 9),在春、夏、秋季,白昼期间(8:00—18:00),大多数时刻,乔灌木、灌木、草坪和水体与建筑的温度差值为负值;铺装与建筑的温度差值为正值,且温差在中午前后比较大,在早晚比较小。在冬季,乔灌木、灌木、草坪和铺装与建筑的温度差值早晚为负值,10:00—16:00 时为正值,说明这 4 类下垫面在这一时段有保温作用,有利于提高人体舒适度。草坪与建筑的温度差值,各季变化趋势均不相同,秋季温差在早晚较大,中午前后较小;其他各季温差在中午前后较大。5 种下垫面与建筑下垫面温度差异趋势为:夏季>秋季>春季>冬季,表明绿地和水体在夏季的降温效果最显著。

各下垫面与建筑的相对湿度差异比较(图 10),在 8:00、14:00 和 18:00,各下垫面与建筑下垫面相对湿度差较大,其他时刻较小。夏季,水体的相对湿度差值为 10.2%~15.4%。一年四季,绿地和水体的湿度差均为正值,夏季差异最显著,其他三季比较接近。水体的增湿作用最为明显,其次是乔灌木。

3 结论与讨论

3.1 讨论

近 10 多年来,在改革开放政策驱动下北京城市化进程很快,主城区已扩展到四环线范围,相应的城市下垫面也有很大的改变,自然地表被人为地表所替代,使其具有高粗糙度、低反照率,这对地表热通量产生了很大影响。目前有一些公共建筑使用大面积的玻璃幕墙,不仅会产生眩光光污染,而且由于玻璃幕墙没有实体墙的蓄存热量的调节能力,因而对冬夏热环境尤为不利。北京市的绿化方式、铺装材料以及环境设计方面存在着许多不利于热环境的地方。本文通过定量化的研究,探讨了不同下垫面在

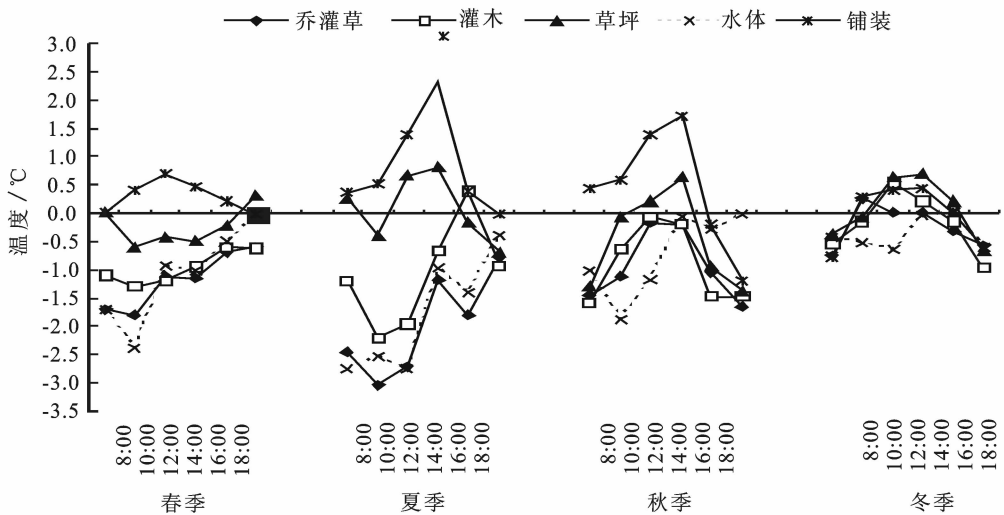


图9 各季5种下垫面与建筑下垫面日间温度差异变化

Fig. 9 Daytime temperature difference changes between building and other five underlying surfaces

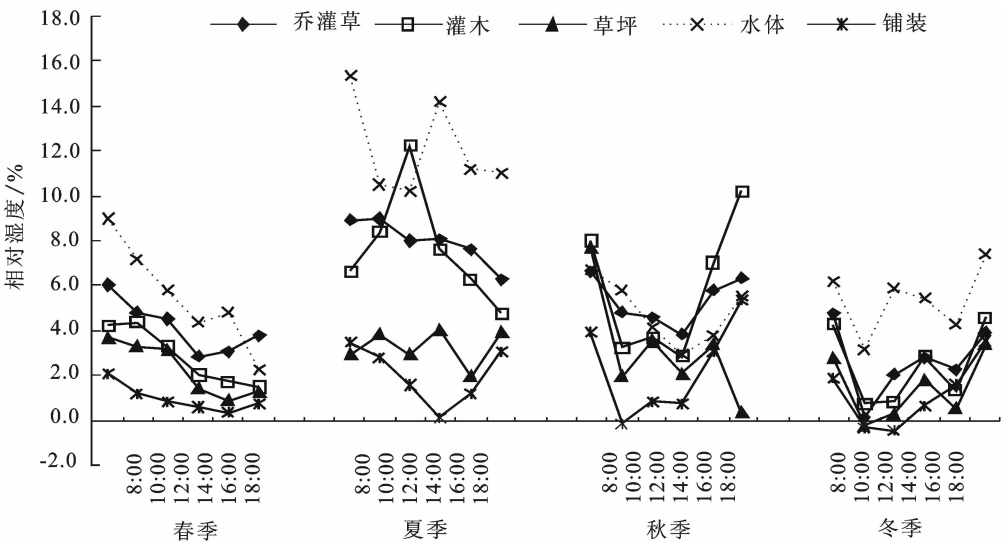


图10 各季5种下垫面与建筑下垫面日相对湿度差异变化

Fig. 10 Daytime relative humidity difference changes between building and other five underlying surfaces

各季对城市热环境的影响。

城市下垫面影响热环境的因素主要有城市绿地的布局及内部构成,铺装材料的质地及颜色,城市建筑的布局、高度、外表颜色和材质,城市道路的规划布局等。国内关于铺装材料的质地及颜色对热环境影响的研究已有报到^[4],关于城市建筑外表颜色及材质对热环境影响的研究还很少见,是未来可研究的方向之一。改善热环境最有效的方式是增加绿化面积,但在寸土寸金的北京,这种方式越来越难。北京市有大面积的建筑立面、屋顶等,通过一定的方式对其进行立体绿化,是增加绿化面积最有效的途径。

城市下垫面类型已成为影响城市热环境的主要因素。H. Shudo^[15]等人将土地利用类型分为4大类:人为区域、农业区、水体和森林区,研究了这些地

物类型对气温的相关影响,结果表明:人为区域对气温起到增温作用,而农业区、森林区与水体起降温作用。国内许多学者的研究也表明,在夏季绿地和 waters 下垫面具有较强的降温增湿作用^[16]。目前,虽然国内外学者就城市下垫面对热环境的影响已展开了相关研究,但城市下垫面和温湿效应关系的量化研究还在探索之中,尚缺少全局性的、系统的、深入的综合研究。

3.2 结论

综合不同下垫面四季的温湿效益,绿地和 waters 夏季的温湿效益最显著,其次为春季和秋季,冬季的温湿效益较小。在春、夏、秋季,绿地具有降温作用,在冬季绿地具有保温作用。绿地和 waters 一年四季均有增湿作用。

在春、秋季,乔灌木、灌木和水体的温度比较接近,均低其他类型下垫面,铺装下垫面的温度最高。在夏季,水体的降温作用比较明显,仅次于乔灌木,其降温值远高于其他类型的下垫面。

不同类型下垫面春、夏、冬季的相对湿度高低趋势一致,均为水体>乔灌木>灌木>草坪>铺装>建筑,秋季为灌木>乔灌木>水体>草坪>铺装>建筑。在春、夏、冬三季,水体的增湿作用最强;在秋季,灌木的增湿作用最强,主要因为,秋季一些乔木的叶片已经开始变黄、脱落,故其蒸腾作用开始减弱,其增湿作用开始下降,而到了冬季,乔灌木和灌木下垫面中的灌木均已经落叶,而乔灌木下垫面中的常绿乔木还可以进行一定的蒸腾作用,故其增湿作用强于灌木下垫面。一年四季,铺装和建筑下垫面的相对湿度均较低,建筑下垫面的相对湿度最低。

绿地、水体是缓解城市热岛效应的重要因素,在城市中通过各种途径合理增加城市绿地,可以改善城市下垫面的构成和特性。将城市绿地结合水体,形成完善而有效的城市生态水体和绿化体系,使之成为北京城市空气流通、净化,以及缓解热岛效应的理想模式。

参考文献:

[1] 李英,周扬娜.北京三里屯地区城市下垫面热环境研究[J].低温建筑技术,2010,32(7):10-112.
LI Y,ZHOU Y N. The research in the thermal environment of the urban surface in Beijing Sanlitun area[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(7): 10-12. (in Chinese)

[2] STONE B,NORMAN J M. Land use planning and surface heat island formation:A parcel-based radiation flux approach[J]. Atmospheric Environment,2006,40:3561-3573.

[3] TAHA H. Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation[J]. Atmospheric Environment, 2008,42:8795-8809.

[4] 吴菲,朱春阳,王广勇,等.北京市 8 种铺装材质温湿度变化特征[J].城市环境与城市生态,2012,25(1):35-38.
WU F,ZHU C Y,WANG G Y,*et al.* Change of temperature and humidity of eight pavement materials in Beijing[J]. Urban Environment & Urban Ecology,2012,25(1):35-38. (in Chinese)

[5] CHUDNOVSKY A,BEN-DOR E,SAARONI H. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements[J]. Energy and Buildings,2004,36:1063-1074.

[6] 黄良美,黄海霞,项冬云,等.南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应[J].生态环境,2007,16(5):1411-1420.
HUANG L M,HUANG H X, XIANG D Y,*et al.* The diurnal change of air temperature in four types of land cover and urban heat island effect in Nanjing,China[J]. Ecology and Envi-

ronment,2007,16(5):1411-1420. (in Chinese)

[7] 彭江良,吴息,江志红,等.南京冬季城、郊下垫面能量平衡特征分析[J].气象科学,2008,28(1):21-29.
PENG J L,WU X,JIANG Z H,*et al.* Characteristics analysis of energy budget over urban and suburban underlying surfaces in Nanjing [J]. Scientia Meteorologica Sinica,2008,28(1):21-29. (in Chinese)

[8] 郑祚芳,王迎春,刘伟东.地形及城市下垫面对北京夏季高温影响的数值研究[J].热带气象学报,2006,22(6):672-676.
ZHENG Z F,WANG Y C, LIU W D. Numerical simulation study for the effects of terrain and landuse to summer heat wave in Beijing[J]. Journal of Tropical Meteorology,2006,22(6):672-676. (in Chinese)

[9] 康博文,王得祥,刘建军,等.城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J].西北林学院学报,2005,20(2):54-56. (in Chinese)
KANG B W,WANG D X, L IU J J,*et al.* The effects of reducing temperature and increasing humidity by different greenland in urban area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(2):54-56. (in Chinese)

[10] 黄海,刘建军,康博文,等.城市绿地内部温湿效应及光环境的初步研究[J].西北林学院学报,2008,23(3):57-61.
HUANG H ,LIU J J,KANG B W,*et al.* A preliminary study on t he temperature humidity effect and luminous environment in t he interior of urban greenland[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(3):57-61. (in Chinese)

[11] 李延明,张济和,古润泽.北京城市绿化与热岛效应的关系[J].中国园林,2004(1):72-75.

[12] 杨士弘.城市绿化树木的降温增湿效应研究[J].地理研究,1994,13(4):74-80.
YANG S H. A study on the effect of decreasing temperature and increasing humidity of urban afforestation trees[J]. Geographical Research,1994,13(4):74-80. (in Chinese)

[13] 杜克勤,刘步军,吴昊.不同绿化树种温湿度效应的研究[J].农业环境保护,1997,16(6):266-268.

[14] 尹球,祝善友,巩彩兰,等.城市白天地面亮温与下垫面类型关系的遥感分析——以上海为例[J].红外与毫米波学报,2009,28(2):133-136.
YIN Q,ZHU S Y,GONG C L,*et al.* Remote sensing analysis of the relationships between daytime ground bright temperature and land-use types of city——with Shanghai as an example[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(2):133-136. (in Chinese)

[15] SHUDO H,SUGIYAMA J,YOKOO N,*et al.* A study on temperature distribution influenced by various land uses[J]. Energy and Buildings,1997,26(2):199-205.

[16] 张景哲,刘启明.北京市地表结构与城市温度间的时间变化关系[J].地理学报,1988,43(3):159-168.
ZHANG J Z,LIU Q M. The temporal relationship between the urban land cover components and air temperature in Beijing,China[J]. Acts Geographica Sinica,1988,43(3):159-168. (in Chinese)