DOI: 10.5846/stxb201303290554
马生丽,武小钢,孙凡,李元征,胡聃,原佳佳,张富华.北京城区人工构筑物对比邻绿地土壤温度和含水量的影响.生态学报,2015,35(2):537-546.
Ma S L, Wu X G, Sun F, Li Y Z, Hu D, Yuan J J, Zhang F H.Horizontal impacts of urban constructed bodies or patches on the temperature and moisture patterns in the soil of adjacent green space in urban areas of Beijing.Acta Ecologica Sinica,2015,35(2):537-546.

北京城区人工构筑物对比邻绿地土壤温度和含水量的影响

马生丽[1,2],武小钢[1,3],孙 凡[2],李元征[1],胡 聃[1,*],原佳佳[1],张富华[1]
1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085
2 西南大学资源环境学院, 重庆 400715
3 山西农业大学,晋中 030800

摘要:选取城市中分布最广的两类人工构筑物——沥青和混凝土为研究对象,采用构筑物-绿地梯度样带法,观测这 2 类典型城市构筑物对比邻绿地土壤温度和含水量的影响,分析不同构筑物的质地、面积、形态等构筑物特征对土壤水、热分布的影响强度及范围。研究显示:1)夏、秋季在构筑物-绿地梯度样带上,绿地土壤温度在比邻构筑物端(a 点)处最高,并且白天中午、傍晚时段 a 点温度显著高于梯度上其他观测点和对照点;2)绿地土壤含水量在比邻构筑物端(a 点)处最低,而且土壤含水量变化在梯度样带上从 a 点至远离构筑物端的对照点变化具有不确定性,可能受城区土壤蒸散、人工灌溉、土壤地下生物量等不确定因素的影响。3)梯度样带上土壤温度(T)和水分(W)与离 a 点距离(D)均呈现幂函数定量关系,即沥青样地 $T = 0.7708(579.4957-0.9984D)^{0.5843}$,$W = 0.1970(0.0505+0.1347D)^{0.2262}$;混凝土样地 $T = 0.7615(583.7027-1.0986D)^{0.5746}$,$W = 0.2224(-0.6019+0.3473D)^{0.0595}$。4) 在构筑物-绿地梯度样带上,土壤温度和含水量受构筑物影响幅度大概在 0—100 cm 之间,而且随构筑物质地及分布格局、城市气象以及绿地构成、结构、人工管理方式等因素的影响而变化。

关键词:水平生态影响; 绿地土壤; 土壤温度; 土壤含水量; 人工构筑物; 北京城区

Horizontal impacts of urban constructed bodies or patches on the temperature and moisture patterns in the soil of adjacent green space in urban areas of Beijing

MA Shengli[1,2], WU Xiaogang[1,3], SUN Fan[2], LI Yuanzheng[1], HU Dan[1,*], YUAN Jiajia[1], ZHANG Fuhua[1]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*
3 *Shanxi Agricultural University, Jinzhong* 030800, *China*

Abstract: Artificial coverage of natural soil surface by constructed material usually affects soil-atmospheric ecological processes. The exchanges of energy, water and other masses between atmosphere and soil are often restricted or hampered, and increasing ecological influences are exerted on adjacent, non-covered natural areas. At present, monitoring of urban ecological effects such as heat island, grey haze caused by urban infrastructure constructions and urban citizens' consumption have been performed with effective ecosystem observation networks, but little specific research attentions are paid to ecological effects of urban constructed surfaces or bodies on urban green space, soil and atmosphere, which play

基金项目:国家自然科学基金项目(41171442, 70873121); 中国科学院生态环境研究中心"一三五"研究计划(YSW2013-B04);城市与区域生态国家重点实验室项目(SKLURE2013-1-01); 山西农业大学学术骨干项目
收稿日期:2013-03-29; **网络出版日期**:2014-03-25
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hudan@ rcees.ac.cn

crucial roles in offering urban ecosystem services.

In this study, two types of urban typical constructed bodies or patches (asphalt and concrete), most widely appeared in urban areas, are taken to investigate changes in temperature and moisture (VWC) in the soil of green space that is next to these two-types of urban structures. We introduce an ecological observational technique of the Human-Environmental Ecotonal Gradient Transect (HEEGT), that is, the boundary between urban structures and green space or exposed covers of soil or rocks is taken as an observational gradient transect, and observational points are arranged along with the Urban Structures-Green space (or exposed Soil) Ecotonal Gradient Transect as a category of HEEGTs on a straight line or a multi-zigzag course from the edge points of artificial structures to the central areas of green space or exposed soil. The research on horizontal effects of urban structures on the soil of adjacent green space were conducted, and the magnitudes and scopes of horizontal ecological impacts of different urban constructed bodies or patches on the temperature and moisture (VWC) in the soil of adjacent green space were further analyzed, considering their structural components, size, shape and other construction characteristics. Our study results have shown that: 1) in Summer and Autumn, in the HEEGT belt of the two types of observational sites (asphalt and concrete), there is always the highest temperature of soil in the point that is just next to the constructed patches (Point a), and the farther from the point a, the lower the soil temperature. On the contrary, Point a always has the lowest value of soil volumetric water content (VWC), and the farther from the point a, the higher the soil VWC. 2) Regarding diurnal variations of soil temperatures and VWC, the increases of soil temperature and VWC are statistically more significant at noon and night than that in the early morning in the HEEGT belts for the two types of observational sites. For seasonal variations from summer to winter, the soil temperature and VWC are statistically more significant at summer and autumn than that in the winter in the HEEGT belts. When atmospheric temperature is lower than a certain value (15℃ in Beijing city), the soil temperature variation in HEEGT belts statistically tends to be unchangeable. 3) In the HEEGT belts, there exist quantitative relationships of power function between the soil temperature or soil volumetric water content with the distance away from point a, that is, $T = 0.7708(579.4957-0.9984D)^{0.5843}$ for asphalt, $W = 0.1970(0.0505+0.1347D)^{0.2262}$ for asphalt; $T = 0.7615(583.7027-1.0986D)^{0.5746}$ for concrete, $W = 0.2224(-0.6019+0.3473D)^{0.0595}$ for concrete. 4) In the HEEGT belts for the two types of observational sites, the scopes of impacts for two types of urban constructed bodies on the temperature of soils of adjacent green space vary approximately within the numerical range of 0—100 cm, often altered by the components, texture, size, and patch distributional pattern of urban structures, and urban meteorological factors, artificial management as well as the compositions and structure of adjacent green space.

Key Words: horizontal ecological impacts; soils of adjacent green space; soil temperature; soil volumetric water content; urban constructed bodies (urban structures); urban areas in Beijing

我国大范围的快速城镇化已成为当今城镇环境与生态变化的主要驱动力[1-2],城镇化过程的典型特征之一就是植被、湿地、裸地等自然表层逐渐被人工构筑物(如管网、道路、广场、建筑等)所取代[3],进而形成高度连通、结构复杂、生态影响大的人工构筑物系统[4]。

自然地表是生态系统地-气生态过程的重要界面,也是地-气物质、能量交换与转化的生态交错区。在城市环境下,地表层构成与结构变化会改变地-气界面的物质-能量生态过程。相对自然生态系统而言,城市人工构筑物采用的各种建筑材料对光辐射传输的影响差异大、储热-传热-放热变异快,使到达其表面的太阳或人工辐射除一定比例被其表面向上反射和周边散射以外[5-6],大部分被地表吸收并向下和水平方向传导。这可使城市人工地表温度高于自然植被等自然地表覆盖[7],且下层土壤的储热和放热也会增加。研究显示,城市化过程中土地利用/覆盖的变化,导致全球地表温度平均每百年升高 0.27 ℃[8]。

近年来,对于城市化背景下的热量和水分方面的研究主要是在两个尺度上展开。(1)城市及区域尺度上的气温和降水变化[9-12],如“热岛效应”、“干岛效应”、“雨岛效应”等。(2)城市内部小尺度上人工地表下土

壤温度、水分在垂直剖面上的变化及其环境和生态效应[6-7,13]。这些研究表明,城市人工地表的形态、数量、结构、分布格局等会显著影响城市土壤及其表面植被的水热状况。目前,小尺度上城市人工地表层对土壤水热状况影响的研究还相对非常缺乏。而该尺度上的研究结论对于城市设施规划、设计与生态管理具有更为直接的指导意义[14]。

本文以城市中分布最广的两类人工构筑物——沥青和混凝土为研究对象,通过现场观测这 2 类典型构筑物相邻绿地土壤的温度和含水量变化动态,分析不同构筑物质地、面积、形状等特征对土壤水、热分布的影响强度及范围,从而能够进一步定量揭示城市局域尺度上人工构筑物对土壤的水、热微生态效应。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于北京市朝阳区奥林匹克公园,处于北纬 40°00′,东经 116°22′。该区为典型暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促。降水季节分配不均,全年降水约 76%集中在 6、7、8 三个月。年均气温 13.4 ℃,年均降水 595 mm。本试验测定时间为 2012 年 7、8、9、10、11 月份。试验地土壤类型为沙土,物理性质见表 1。

表 1　试验地土壤背景状况

Table 1　Soil condition in the studied area

样地 Sample plot	容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	质地 Soil texture		
		粘粒 Clay /%	粉粒 Silt /%	砂粒 Sand /%
沥青 Asphalt	1.61±0.09	2.31±0.64	12.45±3.06	85.25±3.69
混凝土 Concrete	1.57±0.17	2.22±0.73	12.53±3.56	85.25±4.28

试验选取样地分别是,人工构筑物为沥青铺装的停车场和为混凝土铺装的停车场,其中样地中对绿地的管理,如灌溉、施肥、除草,以及游人的干扰均处于均一状况下,而且绿地较平整,避免不同地形对土壤温度和含水量的影响。邻接绿地主要植物构成为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、石竹(*Herba Dianthi*)及狗尾草(*Setaira viridis*(*L.*)*Beauv*)等。研究地概况见表 2。为了避免不同样地绿地构成、植物个体高度和盖度差异对观测结果造成的影响,测定前一周剪除地面植被,以后每隔 2 d 刈剪 1 次。

表 2　样地概况

Table 2　Brief description of the studied area

样地代号 Sample plot label 人工地表 Artificial surface		A 沥青 Asphalt	B 混凝土 Concrete
样地面积 Sample area	人工地表/m^2	7321	1147
	比邻绿地/m^2	40420	7189
	面积比(人工地表/绿地)	0.20	0.20
多边形周长-面积比 Perimeter area ratio	人工地表	0.08	0.17
	比邻绿地	0.02	0.05
热力学特性[6] Thermodynamic property	导热率/(W m^{-1}℃$^{-1}$)	0.74	1.69
	比热/(J cm^{-3}℃$^{-1}$)	1.42	2.07
	反射率(12:00)	0.10	0.45

1.2　试验方法与数据处理

1.2.1　试验样带布置及观测方法

借鉴经典生态学研究中的梯度分析法[15-16],采用人工-自然生态梯度样带法(human-environmental ecotonal gradient transect, HEEGT)在试验样地布置构筑物-绿地梯度观测样带,现场观测点按等距进行布点,

该方法在国内外城市生态系统研究中是首次使用,布置方法见图 1。

(1)梯度样带确定

以构筑物和绿地接壤边界(a 点,构筑物与绿地直接接触)为起点,按直线走向沿远离构筑物的绿地中央方向布置观测点,形成一定距离间隔的小尺度梯度样带。其中,样带布置方向为:1) 面状和带状场地开阔而无遮阴,选取人工地表 3 个方向(东、西、北面)的均值;2)建筑体选取典型的建筑体阳面布置。

(2)观测指标

样带上每个观测点采用 EM50 土壤温度/水分数据采集器(DECAGON, USA.测量精度:温度±0.5;相对湿度±3%)测定各观测点土壤表层 5 cm 处的土壤温度和含水量。为保证所测数据的可靠性和代表性,每测点使用 4 个探头同步采集数据,以尽量减小土壤条件不均匀带来的误差,每次测定持续 5 min,每 10 s 自动记录一个数据。测定时,使用 Kestrel-4500 手持气象仪测定试验样地 1 m 高处的空气温度和相对湿度,观测选择在风速小于 2 m/s 的晴朗天进行。

(3)人工构筑物类型划分

本研究中城市人工地表选择面状人工地表、带状人工地表(长/宽>5,以道路为主)、体状人工构筑物三类,其中这 3 类构筑物是按不同的形状、构造、厚度等的综合指标划分的。

(4)对照观测点确定

由于对城市绿地土壤温度、含水量的影响因素很多,为了在绿地内选定受人工构筑物影响相对最小的对照点,本研究在试验之前对 2 个样地上的构筑物-绿地梯度观测样带上温度、水分数据进行预观测,对观测数据进行统计分析,最后确定样带上距离 a 点最近且无显著性差异的观测点为对照点(A 点)。

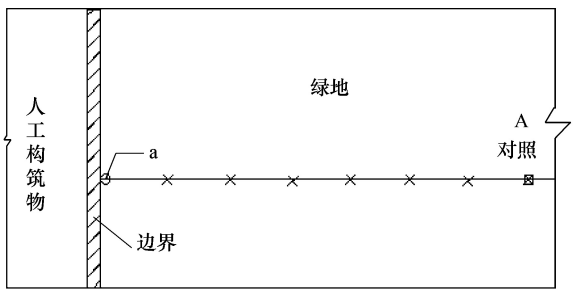

图 1 样地梯度样带布置图

Fig.1 Layout of the experimental human-environmental ecotonal gradient transect(HEEGT)

1.2.2 梯度样带上观测样点布局间隔的确定

在试验梯度样带上,以不同间隔选定观测点,分别测定土壤温度和含水量,然后比较梯度样带上不同观测点间隔(如 5、10、20、50、100、150 cm)样本数据变化的统计分布特征;最终确定:1)按 5 cm 间隔布点来观测样带上土壤温度和含水量日变化特征;2)按 50 cm 间隔布点观测样带上构筑物对比邻绿地土壤温度和含水量的影响范围。

1.2.3 试验数据处理

采用 SPSS 18.0 软件,基于现场观测数据,对土壤温度和土壤含水量进行方差分析,并且对各观测点采用方差分析且进行各测点之间的多重比较。利用 MATLAB7.11.0 中的非线性拟合工具进行分析,发现土壤温度(T)和含水量(W)与距 a 点距离(D)之间存在明显的幂函数关系:通用公式见(1)、(2)和具体常数值见表 3。两个函数的导数表征了样带温度梯度指标 T'和样带水分梯度指标 W'见公式(3)至(6)。式中 a、b、c、d 为常数,不同质地样地具体指标见表 3。

$$W=a(b+cD)^{d} \tag{1}$$

$$T=a(b+cD)^{d} \tag{2}$$

沥青样地:

$$W=0.0060(1+0.1347D)^{-0.7738} \tag{3}$$

$$T'=-0.4497(1-0.9984D)^{-0.4157} \tag{4}$$

混凝土样地:

$$W=0.0046(1+0.3473D)^{-0.9405} \tag{5}$$

$$T' = -0.4867(1-1.0986D)^{-0.0.4254} \quad (6)$$

表 3　面状人工地表梯度样带上土壤温度和含水量与距离幂函数关系的拟合

Table 3　Quantitative relationships of soil temperature and Volumetric Water Content (VWC) **with distances away from Point a along the human-environmental ecotonal gradient transect** (HEEGT)

参数 Parameter	土壤含水量 Soil volumetric water content		土壤温度 Soil temperature	
	沥青样地	混凝土样地	沥青样地	混凝土样地
a	0.197	0.2224	0.7708	0.7615
b	0.0505	−0.6019	579.4957	583.7027
c	0.1347	0.3473	−0.9984	−1.0986
d	0.2262	0.0595	0.5843	0.5746
均方根误差 Root-mean-square error(RMSE)	0.009	0.0075	0.2624	0.2411
平均绝对百分误差 Mean absolute percentage error (MAPE)	2.70%	2.40%	0.70%	0.60%
相关系数 Related coefficient (R)	0.9808	0.9341	0.8904	0.9054

通过双尾检验,在 0.01 水平下相关性显著

2　结果与分析

2.1　不同质地构筑物对比邻绿地土壤温度和含水量的水平影响

沥青和混凝土两种构筑物对相邻绿地土壤温度和含水量的影响在试验梯度样带上的变化趋势见图 2。两个样地测定时间段为 13:00—15:00,测定时离地面 1 m 高处的气温和相对湿度见表 4。两种质地构筑物形成的人工地表对相邻绿地土壤的温度和含水量影响的变化趋势相同,即从 a 点到 A 点,土壤温度降低,土壤含水量升高,并且由公式可知随 D 值的增加,T'和 W'均减小(即对土壤温度和水分的影响强度随距离增加而下降)。此外,虽然混凝土人工地表比邻的 a 点上土壤含水量比沥青人工地表比邻的 a 点高 3.9%,但差异不显著($P>0.05$);两种质地构筑物的试验梯度样带上其他观测点间差异也不显著($P>0.05$)。这表明,这两种构筑物质地对比邻绿地土壤水分的影响不具有显著差异性,它们之间的差别可能是其他因素(如灌溉的差异性等)造成的。

两种质地的人工地表试验梯度样带上土壤温度随距离(D)都呈幂函数关系,但混凝土人工地表 a、b 值小于沥青人工地表(表 3);因此沥青人工地表样地的试验梯度样带上各观测点的土壤温度均高于混凝土人工地表,而且差异显著($P<0.05$)。

两种人工地表比邻绿地土壤含水量随距离(D)的变化也呈幂函数关系,见图 2,但当 D 相同时,混凝土人工地表比邻绿地的 W'小于沥青人工地表的比邻绿地的 W',表明混凝土人工地表对比邻绿地土壤水分影响强度小于沥青,即沥青地表试验梯度样带上随 D 值增加,水分的下降呈现更快地变化。从观测数据看,样带上距 a 点 10 cm 之后混凝土人工地表试验梯度样带上含水量在统计上基本处于稳定状态,而沥青人工地表试验梯度样带上含水量在 10 cm 之后依然处于上升趋势。

表 4　人工地表试验梯度样带上大气温度和相对湿度

Table 4　Atmospheric temperature and relative humidity in HEEGT belts of the studied areas

样地 Sample plot	气温 Atmospheric temperature/℃	空气湿度 Atmospheric moisture/%
沥青人工地表 Asphalt surface	30.84±1.18b	55.47±3.70b
混凝土人工地表 Concrete surface	29.40±1.19a	70.40±9.04a

2.2　不同质地人工地表对比邻绿地土壤温度和含水量水平影响的日变化特征

本研究在一日内 3 个时间段,即 7:00、14:00 和 20:00,对土壤温度和含水量在试验梯度样带上的日变化

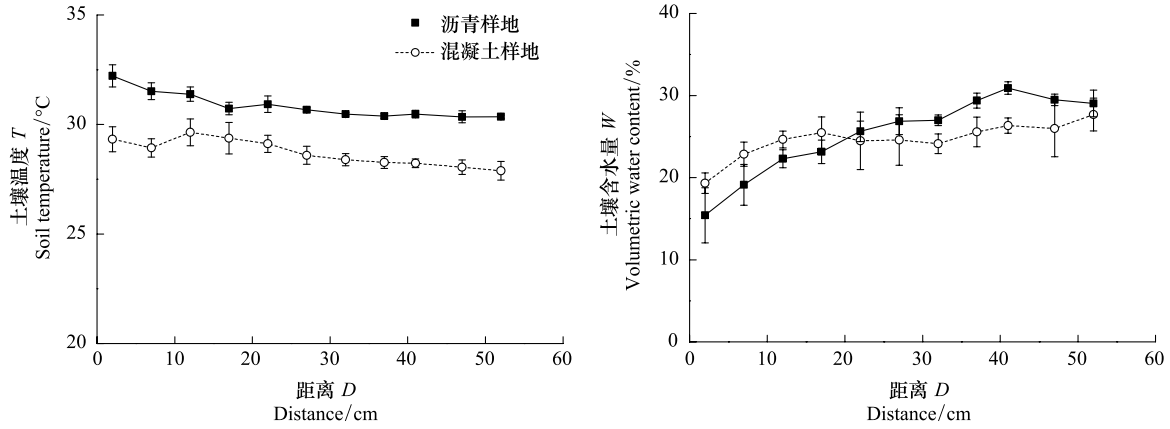

图 2 不同质地(沥青和混凝土)人工地表试验梯度样带上绿地土壤温度和含水量变化

Fig.2 Changes in soil temperature and volumetric water content (VWC) along the HEEGT belts under different conditions of artificial surface (asphalt and concrete)

特征进行了观测(图 3),各时间段试验梯度样带上距地面 1 m 处气温和相对湿度见表 5。在两种样地上,各时段总体趋势相同,即从 a 点到 A 点,土壤含水量波动性上升,并且由温度和水分梯度公式可知随 D 的增加,T' 和 W'均减小。

在样地试验梯度样带上的各观测点,土壤温度 14:00 最高,且 a 点 14:00 土壤温度为(29.89±1.03) ℃,7:00最低,为(28.4±1.86) ℃。不同时间段上试验梯度样带上各观测点的统计分析发现,a 和据 a 点 10 cm 处土壤温度 14:00 和 20:00 差异不显著,其他各观测点在不同时间段差异极显著(P<0.01)。各点土壤含水量 14:00 最低,且 a 点 14:00 土壤含水量为(26.3±2.4)%,20:00 最高,为(28.9±3.8)%。各观测点 14:00 和 20:00差异极显著(P<0.01)。20:00 温度较 7:00 高,但含水量也较高,这一结果也表明人工地表的热传输过程决定了土壤的温度,并影响比邻绿地水分变化。

表 5 夏季 1 d 内不同时间段气温和相对湿度

Table 5 Atmospheric diurnal temperature and relative humidity within one day in summer time

时间 Time	气温 Atmospheric temperature/℃	空气湿度 Atmospheric moisture/%
7:00	28.40±1.86ab	57.63±4.93a
14:00	28.72±0.63a	74.74±7.92b
20:00	28.17±0.61b	67.56±2.89c

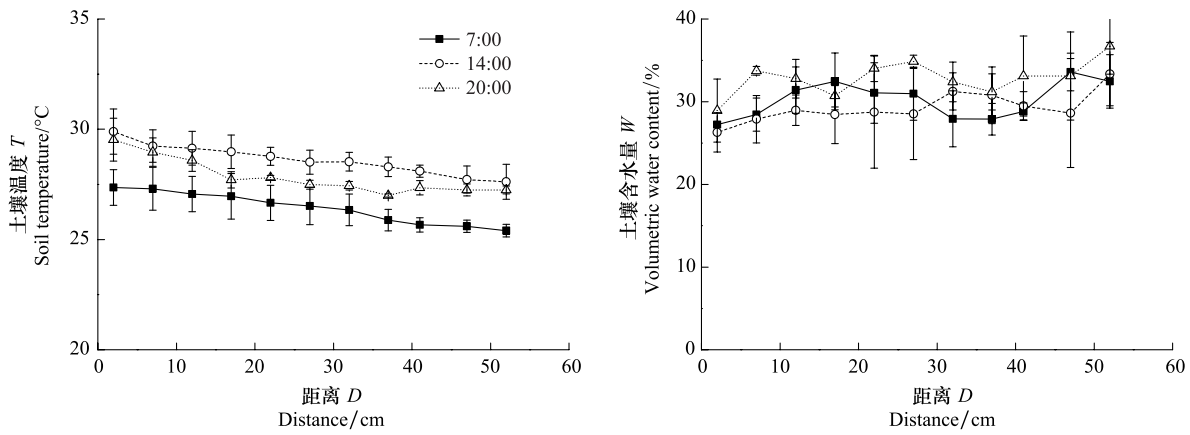

图 3 夏季不同质地人工地表试验梯度样带上绿地土壤温度和含水量日变化特征

Fig.3 Diurnal variations of soil temperature and VWC along the HEEGT belts under different conditions of artificial surface (asphalt and concrete) in summer time

2.3　不同质地人工地表对比邻绿地土壤温度和含水量水平影响的季节变化特征

北京夏(平均气温>28 ℃)、秋(平均气温 28—10 ℃)、冬(平均气温<10 ℃)[17] 3 个季节土壤温度和含水量在试验梯度样带上的变化特征见图 4。夏、秋两个季节土壤温度变化特征为:从 a 点到 A 点逐渐降低,土壤含水量波动性上升,并且由温度和水分梯度公式可知随 D 的增加,T'和 W'均减小。冬季在试验梯度样带上土壤温度和含水量的梯度变化不明显,统计检验差异不显著。但受城市绿地灌溉、构筑物热效应减弱等因素的影响,含水量变化会出现相反趋势,如表 6 测定数据显示出远离 a 点土壤含水量降低,土壤温度仍然是降低趋势。

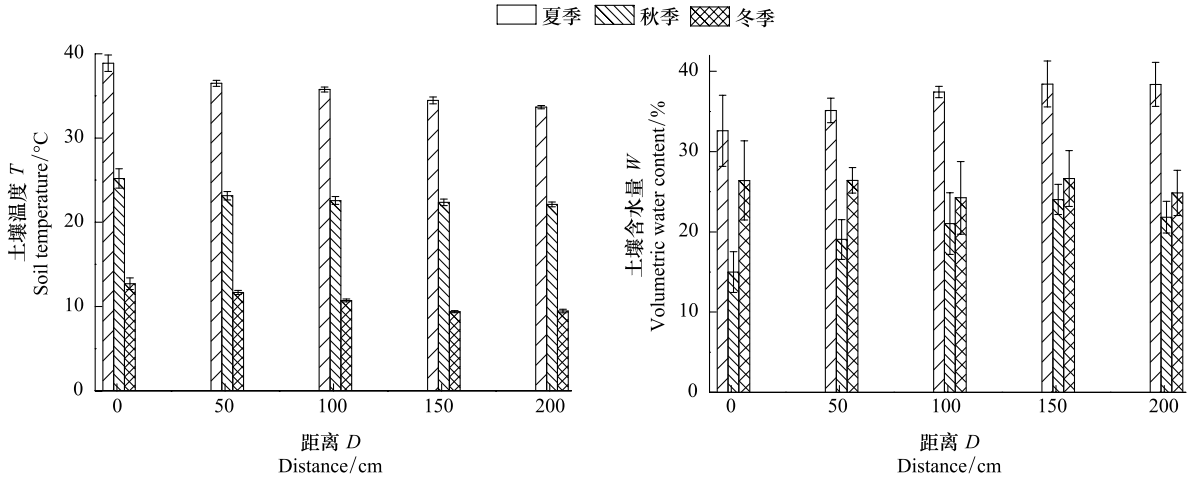

图 4　不同质地人工地表试验梯度样带上绿地土壤温度和含水量季节变化特征

Fig.4　Seasonal variations of soil temperature and VWC along the HEEGT belts under different conditions of artificial surface (asphalt and concrete)

表 6　秋季不同几何形态人工地表样地试验梯度样带上绿地土壤温度和含水量的变化

Table 6　Changes in soil temperature and Volumetric Water Content (VWC) **along the HEEGT belts for different types of geometrical shapes of artificial surfaces in autumn time**

形态 Form	土壤温度 Soil temperature/℃				
	0	50cm	100cm	150cm	200cm
面状人工地表 Planar artificial surface	25.20±1.14a	23.15±0.50b	22.58±0.48c	22.34±0.39c	22.11±0.29c
带状人工地表 Linear artificial surface	21.83±1.01a	21.14±0.73b	21.44±0.76ac	20.88±0.53b	21.08±0.78bc
体状人工构筑物 Building or infrastructures	29.17±1.28a	25.97±1.10b	25.42±0.40c	24.96±0.56d	24.65±0.42d
形态 Form	土壤含水量 Soil volumetric water content /%				
	0	50cm	100cm	150cm	200cm
面状人工地表 Planar artificial surface	15.0±2.5a	19.0±2.5b	21.0±3.8c	24.0±109c	21.8±2.0c
带状人工地表 Linear artificial surface	9.4±1.8a	17.5±1.3b	18.8±3.1c	18.9±1.3c	17.6±2.1b
体状人工构筑物 Building or infrastructures	18.3±2.7a	18.4±1.9a	16.9±1.1b	10.2±2.5c	9.7±2.4c

小写字母表示样地试验梯度样带上各观测点之间在 0.05 水平差异显著

2.4　不同几何形态人工地表对比邻绿地土壤温度和含水量的水平影响范围

在面状、带状、体状等 3 种典型人工地表样地上,试验梯度样带上绿地土壤温度和含水量变化随着距 a 点距离的加大,土壤温度均呈降低趋势;并且由温度梯度公式可知,随 D 的增加,T'减小;土壤含水量则呈增加趋势,中间略有波动,并且由水分梯度公式可知,随 D 的增加,W'减小。试验梯度样带上各观测点采用方差分析并结合多重比较分析,其结果见表 5。从表 5 可知,面状人工地表比邻绿地土壤温度在 100 cm 之后没有显著差异,带状人工地表比邻绿地土壤温度在 50 cm 之后差异不显著,体状人工构筑物比邻绿地土壤温度在 150 cm之后差异不显著。在试验梯度样带上,T'减小,而不同季节的土壤温度梯度差异反映了气温的不同影响,。统计分析发现,在气温低于 5 ℃时,人工地表比邻绿地的梯度样带上土壤温度趋于稳定不变,统计上没有显著差异。可见,不同季节人工构筑物对比邻绿地土壤温度的影响范围是不同的。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 城市构筑物影响下的土壤温度

影响土壤温度的因素有很多,如太阳辐射、大气温度、风速、坡度、降水、遮阴、蒸(发)散和土壤性质等[18-19]。而在城市环境下,由于人工搬运、填土、改性等物理或化学活动,土壤理化性质发生改变,土壤导热状况(储热、传热)增强[20],土壤表层导热属性发生改变,增加了地表储热和感热[19]。另一方面,由于城市地上、地下构筑物(如城市楼房、道路、广场、停车场等的建设)在地表或地下形成不同质地、不同结构的人工表层或构筑物层。随着城市的发展,这些人工构筑物或人工地表的空间分布越加广泛并逐渐连接起来;同时,城市绿地或裸地等自然地表不仅减少,而且趋于破碎化[21]。这些都直接或间接改变了土壤温度,连通的人工构筑物也进一步阻断并改变了土壤与大气的元素与能量交换,而且还部分或完全阻断了土壤与大气的水分交换,也影响了土壤通过蒸散对地表层土壤以及近地表层气温和相对湿度的调节。

有研究表明,城市环境下热量和水分的传导路径之一是垂直方向传输[6-7],Halverson 和 Heisler 的研究指出,人工表面增加了 60 cm 剖面范围内的土壤温度和热交换速率[22]。Graves 和 Dana 的研究表明,美国印第安纳州拉斐特城行道树下 5—50 cm 的土壤温度比乡村没有铺装面的树下相同深度的土壤温度高达 7 ℃[13],邹丽敏[3]也指出相同气温条件下,街路地表和土壤温度增加。而这种热量传导及其导致的土壤温度升高路径在水平方向上也存在[7]。本研究也发现,土壤温度在 a 点处最高,距离 a 点越远则逐渐降低。其他相关的研究结果也表明,邻近沥青地表的土壤温度比绿地土壤温度要高[7,23]。同时人工构筑物具有相对高的储热能力[6],如本研究发现,a 点土壤温度较高的现象在夜间仍然明显(a 点与其他观测点存在显著性差异,$P<0.05$)存在,而且夜间 a 点温度仅比 14::00 降低 0.37 ℃。a 点高温现象在早晨并不明显,正如 Halverson 和 Heisler 指出的那样,各种人工构筑物在气温较低时对土壤表层和深层温度没有影响[22],本研究也发现,在平均气温低于 5 ℃时,试验梯度样带上也没有显著的温度梯度。

不同质地的人工构筑物对土壤温度的影响也存在差异,本研究可见,沥青人工地表比邻绿地的土壤温度要比混凝土的高,这与前人研究结果一致。Halverson and Heisler 等指出,土壤温度受各种人工构筑物影响较大,其中,人工构筑物以沥青为最大[20],沥青地表相对于混凝土来说,对热能的反射率更低和储存能力更高[6],因此,它能吸收和储存更多的热能,使得土壤温度比其他高反射人工构筑物下面的土壤温度高。

3.1.2 城市构筑物影响下的土壤水分

土壤水分会以潜热和感热的方式,通过地气交换来调节局地的气温和湿度变化;同时由于水的比热较大,土壤含水量越大则土壤温度变化幅度越小。较高的地温或气温又会导致蒸散的增加进而降低土壤含水量[24]。人工构筑物除了使气温升高,也使得土壤温度增高、土壤蒸散增大。本研究发现,样地试验梯度样带上 a 点地温最高并且 a 点土壤含水量最低。Asaeda and Ca 指出,土壤水分蒸散是裸露地表温度比铺装面低的主要原因[25],因而,在远离 a 点的观测点,土壤温度降低,含水量会小幅度增加。但土壤含水量在试验梯度样带上的变化没有温度变化那样明显。城市绿地经常性的人工或自动灌水,加上城市人工微地形的差异,造成土壤含水量不均匀分布。我们的研究样地上,梯度样带上观测点的土壤水分也出现不均匀或不稳定变化趋势。此外,由于植物根系的分布也是不均匀的,使其对土壤水分的吸收利用不同,也会造成土壤含水量的差异。城市土壤理化特征也会影响土壤含水量的变化,城市化过程中新形成的土壤,其理化性质和成土作用由人类主导[26],进而影响土壤保水、持水能力,造成含水量的差异。具体可从两方面来理解:(1)土壤成分的差异性会造成各观测点土壤含水量不同,例如,城市土壤基质一般是人造的或者被城市活动所改变,如砖块、砂浆、混泥土、矿渣或者灰分等[27]。因而人造基质的粗骨料含量比自然土要高,进而造成各观测点土壤吸持水分能力的差异。(2)土壤结构的不同造成各观测点土壤含水量的不同。比如城市中土壤通常伴随着压实处理,而压实会造成土壤物理性质的改变[20],如结构体破坏、总孔隙度减少、孔隙连续性被切断、方向改变、容重

增加、入渗能力降低、导水率降低等,从而影响水分的渗透与储存能力[27-28]。

3.1.3　人工构筑物对土壤温度及水分的影响范围

人工构筑物吸收辐射、储存热量同时传导热量,其影响也有一定的垂直和水平空间范围。由图 2、图 3 和表 5 可以看出,在 50 cm 以内土壤温度有逐渐下降的规律,并且其变化幅度会随距 a 点距离的增加而减小,并逐渐趋于稳定;在 150 cm 之后会有高低跳跃现象,且之后观测点的土壤含水量差异不显著,见表 5。Asaeda and Ca 的研究指出,在裸露地表 20 cm 深处的土壤温度日变化小于 1 ℃,并据此假定在 20 cm 处热量传导为 0,而对于混凝土和沥青为 30 cm[23]。Swaid and Hoffman 研究表明,裸露地表、混凝土、沥青覆盖分别在 14、18、17 cm 之下土壤温度基本稳定[29]。因为混凝土导热系数大约为沥青的两倍,因此,混凝土表面净热流可迅速向下层传递,而沥青表面的净热流则用来加热表层[25]。Sarah 等首次提出,夏季在沥青地表的停车场,距沥青边界 1 m 范围内根际温度超过根系耐受的最高温(40 ℃)[7]。因此,本研究发现人工构筑物在水平方向上的热传导范围在一天 24h 尺度上大概在 0—100 cm 范围之内,与土壤垂直剖面的热量传导相比,水平方向上热量的传导更远,而且会随着人工构筑物质地、构筑物分布格局以及气温、太阳辐射等气象条件的季节性变化而不同。我们的研究还发现,在气温高于 30 ℃条件下建筑体对比邻绿地土壤温度的影响范围更远。同时,相关研究也指出,沥青构筑物会增加夏季土壤最高温度,但对冬季土壤最低温没有影响[22];研究也发现,在气温小于 5 ℃而高于 0 ℃时这种影响趋势不明显。对于低于 0 ℃的气温条件下构筑物的影响有待进一步试验分析。而且在试验中我们发现,人工地表宽度小于一定值时,其比邻绿地土壤温度和含水量的变化规律会发生变化,而其变化规律有待进一步通过试验进行论证。

3.2　主要结论

(1)在城区夏、秋季节,人工构筑物对比邻绿地土壤 5 cm 处温度的水平影响随离构筑物距离的增加而降低,并且一天中的早、中、晚时段都存在,但早晨构筑物对土壤温度升高的影响不明显。而相对于土壤温度的变化,土壤含水量变化随离构筑物距离增加而趋于减小,但变化的稳定趋势相对较弱,存在一定的波动现象。在平均气温低于 5 ℃时,人工构筑物对比邻绿地土壤温度影响不显著。

(2)在城区夏、秋季节,人工构筑物对比邻绿地土壤 5 cm 处温度和含水量变化的水平影响范围在一天 24h 尺度上大约在 0—100 cm 范围内,其中,人工面状构筑物(人工地表)的水平影响幅度大约在 0—50 cm,而建筑物体的影响幅度在 0—1m,同时,它受人工构筑物的质地、分布格局、城市气象因素以及绿地群落构成与结构、人工管理方式等的影响而变化。

(3)人工构筑物-绿地试验梯度样带上,土壤温度和水分与离 a 点距离均呈现幂函数定量关系,即沥青样地 $T = 0.7708(579.4957-0.9984D)^{0.5843}$, $W = 0.1970(0.0505+0.1347D)^{0.2262}$;混凝土样地 $T = 0.7615(583.7027-1.0986D)^{0.5746}$, $W = 0.2224(-0.6019+0.3473D)^{0.0595}$。

参考文献(References):

[1] Weng Q H. Land use change analysis in the Zhujiang delta of China using satellite remote sensing, gis and stochastic modelling. Journal of Environmental Management, 2002, 64(3): 273-284.

[2] Seto K C, Kaufmann R K. Modeling the drivers of urban land use change in the Pearl River delta, China: Integrating remote sensing with socioeconomic data. Land Economics, 2003, 79(1): 106-121.

[3] 邹丽敏, 丁蕴铮, 张广增, 李辉. 硬覆盖对城市街路行道树土壤呼吸的影响. 中国城市林业, 2004, 2(1): 34-37.

[4] Robinson L, Newell J P, Marzluff J M. Twenty-five years of sprawl in the seattle region: Growth management responses and implications for conservation. Landscape and Urban Planning, 2005, 71(1): 51-72.

[5] Herb W R, Janke B, Mohseni O, Stefan H G. Ground surface temperature simulation for different land covers. Journal of Hydrology, 2008, 356(3/4): 327-343.

[6] Asaeda T, Ca V T, Wake A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. Atmospheric Environment, 1996, 30(3): 413-427.

[7] Celestian S B, Martin C A. Rhizosphere, surface, and air temperature patterns at parking lots in Phoenix, Arizona, US. Journal of Arboriculture, 2004, 30(4): 245-252.

[8] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 2003, 423(6939): 528-531.
[9] Shepherd J M. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes. Journal of Arid Environments, 2006, 67(4): 607-628.
[10] Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, Liu Z, Zhou L, Wang W. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit. Journal of Climate, 2007, 20(10): 2299-2306.
[11] Zhou L, Dickinson R E, Tian Y, Fang J, Li Q, Kaufmann R K, Tucker C J, Myneni R B. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(26): 9540-9544.
[12] 施斌, 刘春, 王宝军, 赵理政. 城市热岛效应对土的工程性质影响及灾害效应分析. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1167-1173.
[13] Graves W R, Dana M N. Root-zone temperature monitored at urban sites. HortScience, 1987, 22(4): 613-614.
[14] 蔺银鼎. 城市绿地生态效应研究. 中国园林, 2003, 19(11): 36-38.
[15] McDonnell M J, Pickett S T. Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: An unexploited opportunity for ecology. Ecology, 1990, 71(4): 1232-1237.
[16] Sukopp H. Urban Ecology-Scientific and Practical Aspects. New York: Springer, 1998.
[17] 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.
[18] dos Santos G H, Mendes N. Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation. Energy and Buildings, 2006, 38(4): 303-314.
[19] Mihalakakou G. On estimating soil surface temperature profiles. Energy and Buildings, 2002, 34(3): 251-259.
[20] Jim C Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong. Landscape and Urban Planning, 1998, 40(4): 235-249.
[21] Tian Y, Jim C, Tao Y, Shi T. Landscape ecological assessment of green space fragmentation in Hong Kong. Urban Forestry & Urban Greening, 2011, 10(2): 79-86.
[22] Halverson H G, Heisler G M.Soil Temperatures Under Urban Trees and Asphalt. USDepartment of Agriculture, Forest Service General Technical Report NE-481, 1981: 1-6.
[23] Kjelgren R, Montague T. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. Atmospheric Environment, 1998, 32(1): 35-41.
[24] 苏明峰, 王会军. 全球变暖背景下中国夏季表面气温与土壤湿度的年代际共变率. 科学通报, 2007, 52(8): 965-971.
[25] Asaeda T, Ca V T. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: A numerical model. Boundary-Layer Meteorology, 1993, 65(1/2): 159-179.
[26] Lehmann A, Stahr K. Nature and significance of anthropogenic urban soils. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(4): 247-260.
[27] Zikeli S, Kastler M, Jahn R. Classification of anthrosols with vitric/andic properties derived from lignite ash. Geoderma, 2005, 124(3/4): 253-265.
[28] Lorenz K, Kandeler E. Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(7): 1373-1385.
[29] Swaid H, Hoffman M E. The prediction of impervious ground surface temperature by the surface thermal time constant (sttc) model. Energy and Buildings, 1989, 13(2): 149-157.