

DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20190401

李光皓, 姚梦雪, 董慰. 哈尔滨典型街谷空间PM2.5分布场与绿色界面指数相关性研究[J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34(4): 38-44.

LI G H, YAO M X, DONG W. Correlation Between PM2.5 Distribution Field and Green Interface Index in Typical Street Canyon of Harbin[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2019, 34(4): 38-44.

哈尔滨典型街谷空间PM2.5分布场与绿色界面指数相关性研究*

Correlation Between PM2.5 Distribution Field and Green Interface Index in Typical Street Canyon of Harbin

李光皓 姚梦雪 董慰 LI Guanghao, YAO Mengxue, DONG Wei

摘要 在城市化快速进程的背景下, 城市街区PM2.5污染日益严重, 本文选取哈尔滨在不同季节的典型街谷空间, 对以叶面积密度(LAD)、叶面积指数(LAI)为实测要素的绿色界面指数以及PM2.5浓度进行实测对比研究。通过对实测数据的分析和挖掘, 最终得出如下结论: 首先, 典型街谷空间PM2.5时段浓度呈现上午比下午平均高37.75%, 冬季比夏季高4.7倍的特征; 其次, 街谷空间的灌木界面对PM2.5浓度场平均积极贡献率为18.62%; 最后, 对PM2.5的衰减率与实测街谷绿色界面的叶面积密度(LAD)与叶面积指数(LAI)进行相关性分析, 结果显示街谷绿色界面对PM2.5浓度的衰减作用与叶面积密度(LAD)呈显著负相关关系, 与叶面积指数(LAI)的相关性程度较弱。

关键词 街谷空间; PM2.5浓度分布场; 绿色界面指数

中图分类号 TU-098

文献标识码 B

文章编号 2095-6304(2019)04-0107-06

* 国家自然科学基金面上项目(51478136)

作者简介

李光皓: 哈尔滨工业大学建筑学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 副教授

姚梦雪: 哈尔滨工业大学, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 硕士研究生

董慰(通讯作者): 哈尔滨工业大学建筑学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 副教授, dongweiup@hit.edu.cn

Abstract: Under the background of the acceleration of urbanization in China, the urban composite carrying capacity is increasing, and the urban environment such as air and water pollution is beginning to appear gradually. In some northern Chinese cities, due to its special severe cold climate, its main urban environmental pollutants are PM2.5. As an important part of the urban underlying surface, the special narrow and long form affects the air flow to form a special wind field, and thus forming a corresponding PM2.5 concentration field. As a “soft interface” of street space, plants are considered to be one of the most appropriate ways to reduce the concentration of air pollutants, and are widely used in the study of urban street and valley environment. This paper selects the typical street space of Harbin as the research object, and studies the influential mechanism of the green interface in the valley on the concentration field of PM2.5. In this paper, six typical Harbin typical street valleys with an aspect ratio of about 1.0 are selected. The concentration of PM2.5, leaf area index and leaf area density in six street valleys are measured in four seasons to analyze the density of different leaf areas. The influence of leaf area index and planting interval on the distribution field of concentration in PM2.5, determines the core influencing factors of PM2.5 distribution field, and establishes the concentration database of PM2.5 in different seasons. Through the analysis and excavation of the measured data, the following conclusions are drawn: the concentration of PM2.5 in the morning of typical street space indicates an average of 37.75% higher than the afternoon, and 4.7 times higher than the summer in winter.

Considering twelve o'clock as the dividing line, the average concentration of the morning and afternoon of the six streets is compared. Except for the morning concentration of the company street (Fengqi Street-Railway Section), which is 0.54% lower than the afternoon concentration, the morning concentration of other streets is higher than the afternoon concentration. The values are: 62.77% of Company Street, 38.02% of Customs Street, 45.44% of Fuhua Sidao Street, 39.19% of Shangjiashu Street and 3.36% of Postal Street.

According to the seasonal distribution of the average concentration of PM2.5, the concentration in PM2.5 of the six streets shows the highest in winter and the lowest in summer. The average concentration of PM2.5 in the northwest-southeast Sanjie Street in winter is 4.73 times of that in summer. The average concentration of PM2.5 in the three northeast-southwest streets in winter is 4.76 times of that in summer. Secondly, the shrub band in the street space has positive contribution with an average rate of 18.62% to the PM2.5 concentration field.

There are two streets in the sample containing shrubs, which are the northwest-southeast-oriented Customs Street (Post Street-Manzhouli Street) and the northeast-southwest-oriented

Post Street (Customs Street-Beijing Section). Compared with the two measuring points of shrubs and street trees, the peaks of concentration in terms of the PM2.5 of the four seasons are smaller than the measuring points of the street trees. The specific values are: Customs Street (Post Street-Manzhouli Street), 40.43% in winter, 4.92% in spring, 20.97% in summer, 19.54% in autumn. Post Street (Customs Street - Beijing Street) 5.74% in winter, 3.76% in spring, 36.01% in summer and 17.62% in autumn. It can be seen that the shrub plays a positive role in the reduction of concentration in PM2.5.

Finally, the PM2.5 concentration distribution field shows a significant negative correlation with leaf area density (LAD) in the green interface, while it is significantly correlated with another parameter leaf area index (LAI). Correlation analysis between leaf area density (LAD) and leaf area index (LAI) and PM2.5 attenuation coefficient (PMDA) data is performed by SPSS. The results show that the correlation coefficient between PMDA and LAD is 0.04 (less than the significant correlation standard threshold of 0.05), showing a significant negative correlation and the correlation coefficient is -0.598. Meanwhile, the correlation coefficient with LAI is 0.082, showing no significant correlation between the two. Therefore, in the study of the green interface and PM2.5 concentration field, it is more appropriate to use the leaf area density (LAD) with greater correlation weight as the green interface index.

Keywords: Street Canyon; Concentration Distribution Field of PM2.5; Green Interface Index

0 引言

近年来,在国家新型城镇化政策大背景下,2016年全国城市化率达57.35%,城镇人口数量达7.9亿。黑龙江省户籍人口城市化率2017年达50%,而哈尔滨作为省会城市,始终保持在65%以上的高城市化阶段^[1]。随着城市化速度的加快,城市人、车流量激增,城市空间环境承载力受到前所未有的挑战,其中空气污染尤其是PM2.5污染是首要问题。根据联合国环境规划署(UNEP)的统计,每年有超过十亿人口遭受户外空气污染^[2]。哈尔滨地处中国北方高纬度严寒气候区,其空气颗粒物分布具有特殊性,尤其是冬季采暖的影响表现更

为明显^[3-5]。造成这种特殊性的原因,一方面是PM2.5污染来源较为复杂,冬季供暖大量使用“蒙煤”等褐煤,大量的汽车尾气,大型重工业企业废气排放,市民露天烧烤污染,周边农村的秸秆焚烧等^[6-7]。另一方面,哈尔滨城市结构形成于历史上的日俄殖民时期的城市总体规划,城市整体形态相对规整,表现为与南北方向呈45°的“棋盘格”街区形式(图1)。对于常年以偏正南风向为主的哈尔滨来说,这种城市街区形态极易形成街谷湍流及局部的环流,从而造成PM2.5在街谷空间下部积累,使行人暴露在其中,严重危及市民人身健康。

现实街谷内污染物扩散是多种物理因素综合影响的结果,其中,街谷两侧的建筑布局 and 结构、来流风向的实时变化^[8-11]等对污染物扩散产生的影响较大,此外还受到绿化树木、行驶车辆、温度^[12]等方面的影响。从解决问题角度出发,在社会各方面控制污染源的同时,以建筑学的视角调整城市街区结构,增加有利于空气污染物快速流通“风廊道”,优化城市街谷空间“软界面”是可行有效的方法之一。而作为城市空间“硬界面”的实体建筑来说,一般很难做出即时调整,而对城市“软界面”的街谷绿色景观界面来说,则有很大的可塑性与优化空间。此外,软界面从营造景观美学等角度

上,也对人的健康性起到积极的作用^[13-14]。

已有学者以数值模拟及风洞试验等方法研究绿色植物对街谷内的污染物浓度的影响^[15-19],本文从街道朝向、尺度、功能三方面对哈尔滨典型街谷空间进行取样,对不同季节的街谷空间内PM2.5的浓度分布进行现场监测并记录,同时以叶面积密度(LAD)、叶面积指数(LAI)为实测要素,实测街谷空间绿色界面指数,进而揭示哈尔滨地区典型街谷空间PM2.5浓度分布场与绿色界面指数的内在相关性。

1 样本选取与实验方法

1.1 街谷样本选取原则

1.1.1 典型性原则

南岗区西大直街街区是哈尔滨最典型的的城市形态之一,街区内街道有西北—东南与东北—西南两个朝向。排除具有地道桥、高架桥等特殊形式的街道,从单幅路中选取两个朝向的街道各三条为研究样本(图2)。

1.1.2 尺度性原则

依据阿里图德特^[20]等人对于街道的分类,高宽比为0.5—1之间定义为典型街谷空间。所选样本区域内高宽比约为1的街道占比71%,本文选取高宽比约为1的典型街谷峡谷作为样本(表1)。

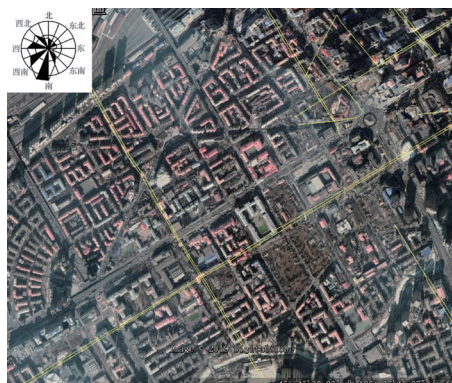


图1 哈尔滨“棋盘格”街区形式肌理图

Fig.1 Harbin “checkerboard” block form texture map

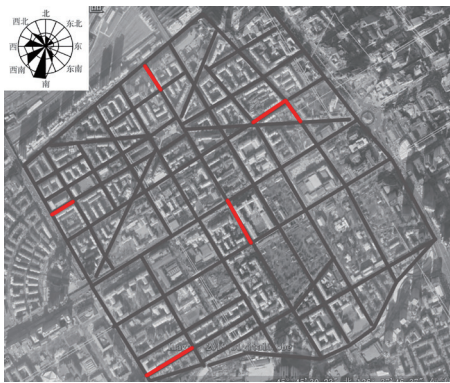


图2 街道研究样本
Fig.2 street study sample

1.1.3 景观性原则

对样本区域内街谷空间来说,以行道树不同种植密度和间距来确定不同类型的研究对象,分别选取无树木种植街道、中密度树木种植以及高密度树木种植三种情况(表2)。

此外,哈尔滨部分街道种植红皮云杉等常绿树种,但由于针叶树与阔叶树在空气动力学中的拖曳力系数相差较大,故对空气流通、PM2.5分布的物理影响效果相差较大,不能同时讨论,且常绿树一年四季的叶面积指数与叶面积密度变化较小,因此本文不选择种植常绿树的街道为研究对象。

1.1.4 功能性原则

因为PM2.5对人身健康危害严重,所以样本街谷空间选取均为市民生活聚集较

表1 样本街谷高宽比一览表

Tab.1 aspect ratio list of sample street valley

街道	走向	宽度/ (m)	长度/ (m)	建筑高度/ (m)	高宽比	行道树 树种	主要情况
公司街(凤翥街—铁路街段)	西北—东南	23	108	21	约为1:1	无树木	单向二车道,路边侧方停车位
公司街(西大直街—邮政街段)	西北—东南	18	180	20	约为1:1	杨树、柳树	单向二车道,路边侧方停车位
海关街(满洲里街—邮政街段)	西北—东南	20	110	13	约为0.7:1	杨树	单向一车道,路边侧方停车位
复华四道街(复华街—教化街段)	东北—西南	22	239	25	约为1:1	无树木	单向二车道,路边侧方停车位
上夹树街(利群街—教化街段)	东北—西南	20	110	21	约为1:1	榆树、柳树	单向二车道,路边侧方停车位
邮政街(海关街—北京街段)	东北—西南	28	151	28	约为1:1	榆树	单向二车道,路边侧方停车位

多的生活性街道^[21]。

1.2 PM2.5浓度监测点布设原则

1.2.1 可接触性

本文PM2.5监测点布设在街道两侧人行道位置,高度设置为1.5 m处,与人呼吸带高度相同,此位置为行人与PM2.5接触性最强的位置。

1.2.2 均质性

考虑到街谷空间内不同位置的通风性差异,在PM2.5监测点布设时选取平行于街道方向与垂直于街道方向两个界面进行布设。在平行于街道方向,分别在街谷两边以及中间部分布设三个监测点;在垂直

于街道方向,选取街谷中间的垂直界面,分别在道路两侧选取监测点,以平衡街谷内迎风面与背风面对PM2.5监测的影响。每条街道选取五个测点(图3)。

1.2.3 有效性

由于不同街谷空间绿色界面指数不同,有些除高大乔木的行道树外,还在人行

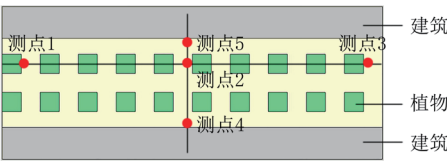


图3 测点布置示意图

Fig.3 schematic diagram of measuring points

表2 样本街谷绿色界面一览表

Tab.2 green interface list of sample street valley

街道	行道树树种	高度/(m)	行道树冠幅/ (m)	分叉点高度/ (m)	种植间距/ (m)	灌木带树种	灌木带宽度/ (m)	树冠投影/ (m)	树冠分支点 高度/(m)	树冠高度/ (m)
公司街(凤翥街—铁路街段)	无数木种植	—	—	—	—	—	—	—	—	—
公司街(西大直街—邮政街段)	杨树、柳树	13.00	13.0	4.00	8.00	—	—	—	—	—
海关街(满洲里街—邮政街段)	杨树	15.00	20.00	4.50	5.00	丁香	2.00	1.80	1.20	2.00
复华四道街(复华街—教化街段)	无数木种植	—	—	—	—	—	—	—	—	—
上夹树街(利群街—教化街段)	榆树、柳树	15.00	15.00	4.50	7.00	—	—	—	—	—
邮政街(海关街—北京街段)	榆树	15.00	28.00	4.00	5.00	丁香	5.50	1.50	1.00	1.50

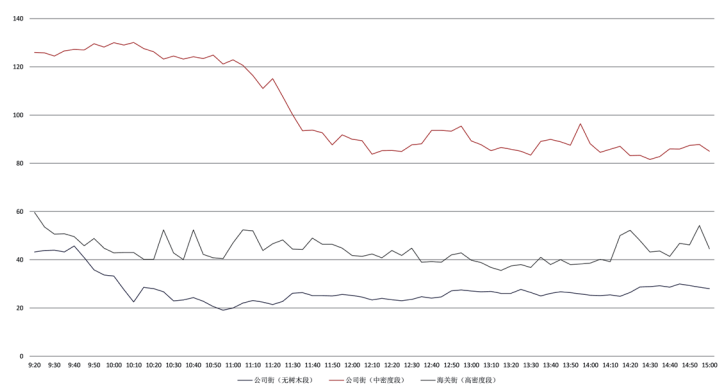


图4 西北—东南走向街道冬季PM2.5浓度对比图

Fig.4 comparison of the PM2.5 concentration of the northwest-southeast trending streets in winter

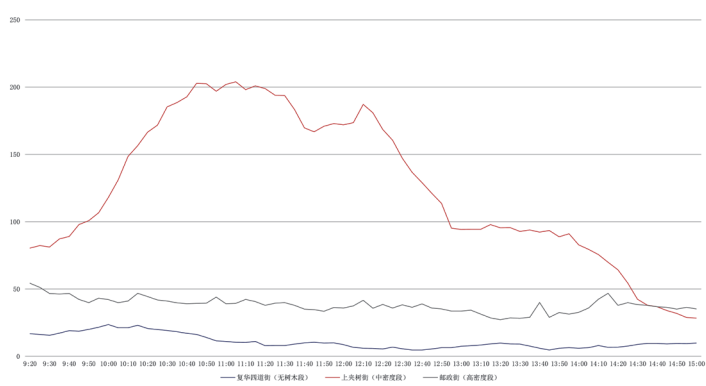


图5 东北—西南走向街道冬季PM2.5浓度对比图

Fig.5 comparison of the PM2.5 concentration of the northeast-southwest trending street in winter

道处种植灌木。为了完整验证街谷内绿色界面对于PM2.5的影响,在街谷中间位置设置监测点时,在灌木绿篱的两侧设置测点,在不具有灌木绿篱的街道,在相同位置的人行道两侧也设置监测点,以对比验证街道内不同绿化环境对PM2.5的影响,保证测试结果的有效性。

1.3 实验仪器

本次实测采用Nova PM2.5检测仪对哈尔滨市典型街谷空间内PM2.5进行实测。

对于街谷绿色界面的两个重要指数叶面积密度(LAD)和叶面积指数(LAI)的测量,本文中叶面积密度是指植物总叶面积与所占空间体积之比,反映植物叶片重叠的密集程度,单位是 $m^2 \cdot m^{-3}$,叶面积指数是指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数,单位是 $m^2 \cdot m^{-2}$ 。本次实测采用植物冠层图像分析仪进行。

2 实测结果与数据分析

2.1 街谷空间四季PM2.5浓度对比

2.1.1 冬季实测数据

在2017年11月对所选6条街道进行冬季实测,取各街道测点取平均值为街道内PM2.5浓度值,对比结果如图4、图5所示。

冬季测量时间内温度选择在-5℃~5℃之间,风速在2 m/s以下,测试时间保持一致,从9:20—15:00(表3)。由实测结果来看,两个走向的街道PM2.5浓度对比出现相似结果,由于上夹树街测试街段内分布

表3 冬季测量天气数据表

Tab.3 winter weather measurement data

街道	测试日期	温度/(℃)	湿度/(%PH)	风速/(m/s)	风向
公司街(凤翥街—铁路街段)	2017年11月11日	4.60	47.20%	1.20	测点1吹向测点3方向
公司街(西大直街—邮政街段)	2017年11月9日	4.80	48.60%	1.50	测点1吹向测点3方向
海关街(满洲里街—邮政街段)	2017年11月12日	1.40	62.30%	1.75	测点1吹向测点3方向
复华四道街(复华街—教化街段)	2017年11月15日	-5.10	75.80%	1.32	测点1吹向测点3方向
上夹树街(利群街—教化街段)	2017年11月16日	-5.30	51.80%	0.89	测点1吹向测点3方向
邮政街(海关街—北京街段)	2017年11月13日	-0.50	63.10%	1.80	测点1吹向测点3方向

有一所小学,中午时段人流车流量较大,PM2.5出现明显波动外,其他街道PM2.5浓度在测试时间段内整体趋势较平稳。两个走向的街道PM2.5浓度值均出现中密度树木种植街段最大,高密度树木种植街段其次,无树木种植街段最低的结果。这可能是由于无树木种植街段通风最好,因此PM2.5不易囤积,所以此段街道PM2.5浓度值最低。

2.1.2 春季实测数据

哈尔滨植物通常在4月份开始发芽生叶,因此选择2018年4—5月对所选街道进行春季实测,取各街道测点取平均值为街道内PM2.5浓度值,对比结果如图6、图7所示。

所选时间内街道温度在18℃~23℃之间,风速低于2 m/s,测试时间保持一致,

从9:20—15:00(表4)。由实测结果来看,两个走向的街道PM2.5浓度均体现出中密度树木种植街段最高的现象,这是因为无树木种植街道通风效果好,利于PM2.5扩散,而高密度树木种植的树冠形成顶棚,一定程度上对大气从街谷上方进入街谷内部的PM2.5进行了阻隔,因此两种情况下街谷内PM2.5浓度相对中密度树木种植情况稍低。在西北—东南走向三条街道中,无树木种植街段浓度整体平稳,无明显波动,高密度树木种植街段在上午时间段内浓度较高,中午浓度下降,下午时段内与无树木种植街段内浓度差异不大。东北—西南走向三条街道中,高密度树木种植街段浓度整体平稳,无明显波动,且浓度最低。

2.1.3 夏季实测数据整理

对2018年所选六条街道夏季实测结果



图6 西北—东南走向街道春季PM2.5浓度对比图

Fig.6 comparison of the PM2.5 concentration of the northwest-southeast trending street in spring

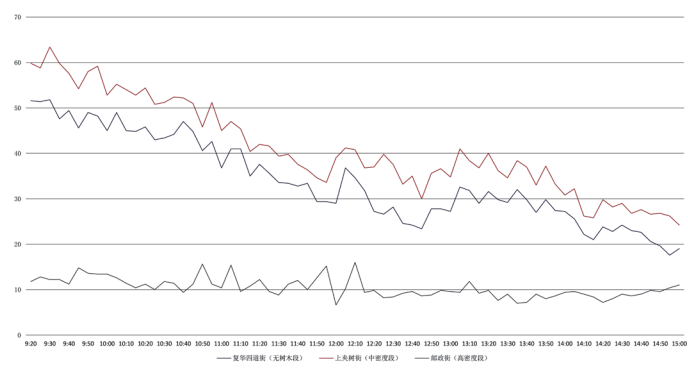


图7 东北—西南走向街道春季PM2.5浓度对比图

Fig.7 comparison of the PM2.5 concentration of the northeast-southwest trending street in spring

整理,取浓度平均值,对比结果如图8、图9所示。

所选时间内街道温度在25℃以上,风速低于2 m/s,测试时间保持一致,从9:20—15:00(表5)。由实测结果来看,夏季实测结果与其它季节相比PM2.5浓度较低,且两个走向的街道PM2.5浓度均体现出高密度树木种植街段浓度最低的现象,这是由于高种植密度的树木形成了对PM2.5的隔离,使街谷内的浓度值较低。此外,从走向上可以看出,高密度种植街段全天的PM2.5浓度呈平稳态势,而无树木种植街段和中密度种植街段则呈现出明显的下降趋势,上午浓度高,下午浓度低。

2.1.4 秋季实测数据整理

对2018年所选六条街道夏季实测结果整理,取浓度平均值,对比结果如图10、图11所示。

所选时间内街道温度在17℃~20℃左

表4 春季测量天气数据表

Tab.4 spring weather measurement data

街道	测试日期	温度/(℃)	湿度/(%RH)	风速/(m/s)	风向
公司街(凤翥街—铁路街段)	2018年5月1日	21.50	27.20	2.56	测点1吹向测点3方向
公司街(西大直街—邮政街段)	2018年4月29日	18.90	29.60	1.74	测点1吹向测点3方向
海关街(满洲里街—邮政街段)	2018年5月4日	19.30	22.20	1.76	测点1吹向测点3方向
复华四道街(复华街—教化街段)	2018年5月13日	21.90	55.50	1.56	测点1吹向测点3方向
上夹树街(利群街—教化街段)	2018年5月12日	22.70	27.50	1.45	测点1吹向测点4方向
邮政街(海关街—北京街段)	2018年5月7日	20.50	31.80	0.97	测点1吹向测点3方向

右,风速低于2 m/s,测试时间保持一致,从9:20—15:00(表6)。由实测结果来看,六条街道PM2.5浓度整体态势较平稳,稍呈下降趋势;同一走向街道相比,高密度种植

街段PM2.5浓度较高,这是由于实测时间恰好在哈尔滨冬季供暖准备期调试锅炉产生污染,造成街谷内PM2.5浓度高,而高密度种植街段树冠浓密,使街谷内PM2.5囤积

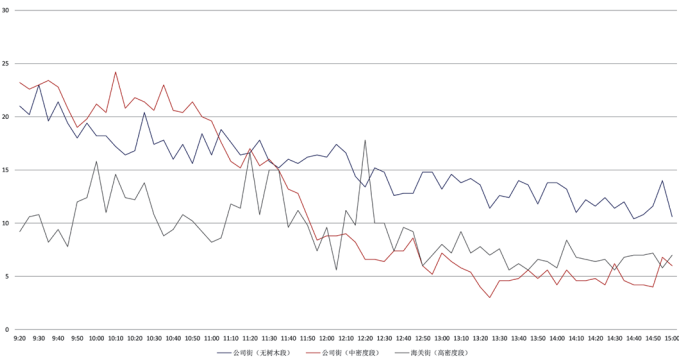


图8 西北—东南走向街道夏季PM2.5浓度对比图

Fig.8 comparison of the PM2.5 concentration of the northwest-southeast trending streets in summer

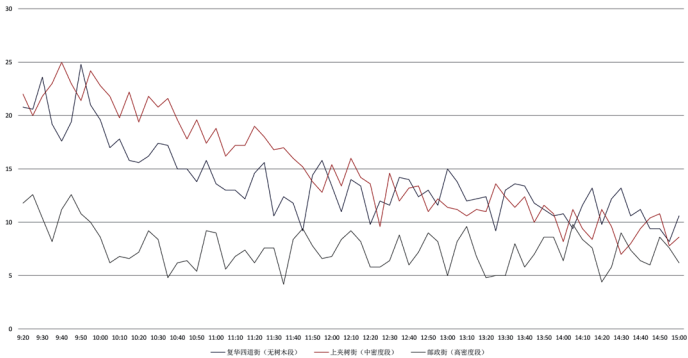


图9 东北—西南走向街道夏季PM2.5浓度对比图

Fig.9 comparison of the PM2.5 concentration of the northeast-southwest trending streets summer

于此，不易扩散，因此造成街谷内PM2.5浓度偏高。

2.2 街谷空间灌木层对PM2.5浓度影响

灌木层作为街谷空间绿色界面的一部分，其对PM2.5浓度的影响机制一直不够明晰。此次样本中选择两条带有灌木带的街道进行PM2.5浓度影响性实测分析。同时，将具有灌木的两条街道海关街（满洲里街—邮政街段）和邮政街（海关街—北京街段）中位于灌木侧的测点（测点5）与行道树测点（测点2）数据进行对比分析（图12-15）。

从以上结果可以看出，秋冬两季海关街（满洲里街—邮政街段）走向的灌木带侧PM2.5浓度差异较大，春夏季浓度差异相对较小。同一街道灌木测点（测点5）浓度低于行道树测点（测点2）浓度，差异值为：海关街（邮政街—满洲里街段）冬季40.43%，春季4.92%，夏季20.97%，秋季19.54%；邮政街（海关街—北京街段）冬季5.74%，春季3.76%，夏季36.01%，秋季17.62%。整体上看，街谷空间的灌木层对PM2.5浓度的稀释缓解有着积极地贡献，其平均积极贡献率为18.62%。

2.3 绿色界面指数实测

街谷空间绿色界面指数的实测内容为：四季不同街谷空间的叶面积密度（LAD）和叶面积指数（LAI）。实测的设备采用植物冠层图像分析仪进行，利用鱼镜头和CCD图像传感器直接获取植物冠

表5 夏季测量天气数据表

Tab.5 summer weather measurement data

街道	测试日期	温度/(℃)	湿度/(%RH)	风速/(m/s)	风向
公司街（凤翥街—铁路街段）	2018年8月13日	25.30	52.00	1.98	测点3吹向测点1方向
公司街（西大直街—邮政街段）	2018年6月6日	4.60	47.20	1.20	测点1吹向测点3方向
海关街（满洲里街—邮政街段）	2018年8月11日	26.40	66.70	0.40	测点3吹向测点1方向
复华四道街（复华街—教化街段）	2018年8月11日	27.00	55.90	2.20	测点3吹向测点1方向
上夹树街（利群街—教化街段）	2018年8月12日	27.20	57.70	1.14	测点3吹向测点1方向
邮政街（海关街—北京街段）	2018年8月11日	25.50	62.70	0.41	测点1吹向测点3方向

表6 秋季测量天气数据表

Tab.6 autumn weather measurement data

街道	测试日期	温度/(℃)	湿度/(%RH)	风速/(%RH)	风向
公司街（凤翥街—铁路街段）	2018年9月26日	19.90	44.10	1.10	测点1吹向测点3方向
公司街（西大直街—邮政街段）	2018年9月26日	20.10	41.30	0.50	测点3吹向测点1方向
海关街（满洲里街—邮政街段）	2018年9月27日	17.60	60.10	0.47	测点3吹向测点1方向
复华四道街（复华街—教化街段）	2018年9月26日	18.00	58.10	0.68	测点3吹向测点1方向
上夹树街（利群街—教化街段）	2018年9月26日	18.70	49.50	0.89	测点1吹向测点3方向
邮政街（海关街—北京街段）	2018年9月27日	18.40	59.10	0.51	测点1吹向测点3方向

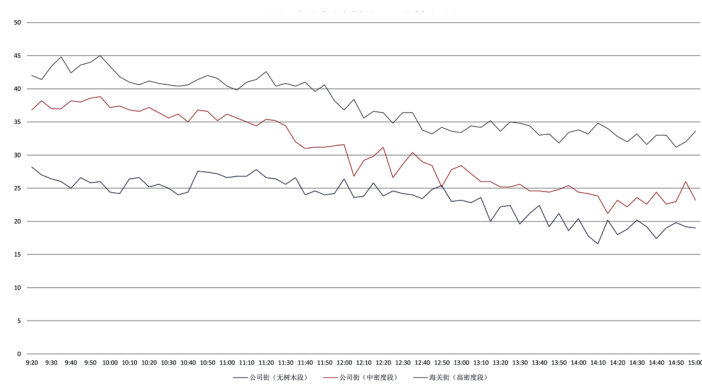


图10 西北—东南走向街道秋季PM2.5浓度对比图

Fig.10 comparison of the PM2.5 concentration of the northwest-southeast trending street in autumn

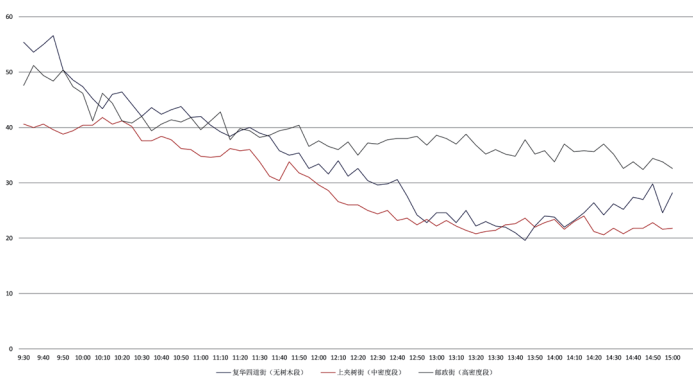


图11 东北—西南走向街道秋季PM2.5浓度对比图

Fig.11 comparison of the PM2.5 concentration of the northeast-southwestern trending street in autumn

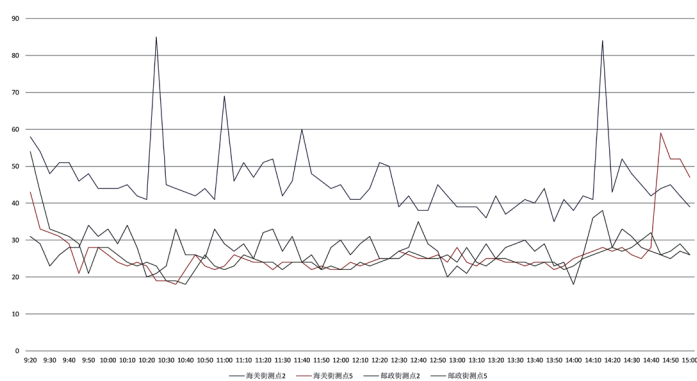


图12 冬季灌木带两侧PM2.5浓度实测图
Fig.12 measurement of PM2.5 concentration on both sides of the shrub belt in winter

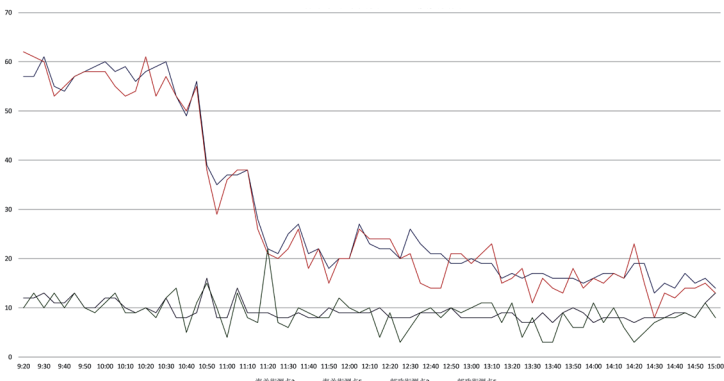


图13 春季灌木带两侧PM2.5浓度实测图
Fig.13 measurement of PM2.5 concentration on both sides of the shrub belt in spring

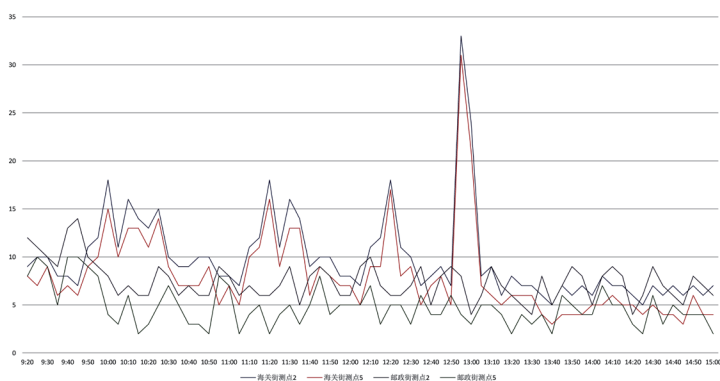


图14 夏季灌木带两侧PM2.5浓度实测图
Fig.14 field measurement of PM2.5 concentration on both sides of the shrub belt in summer

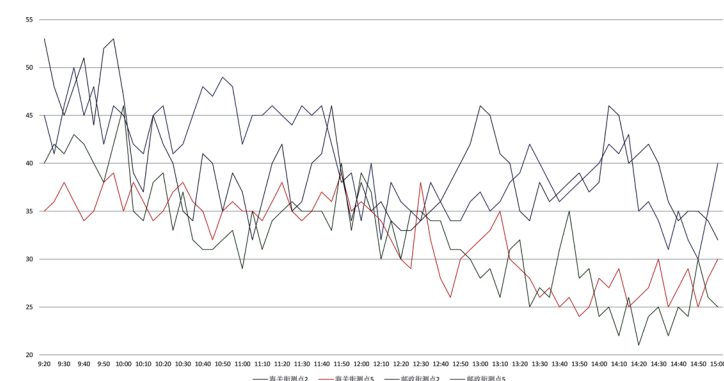


图15 秋季灌木带两侧PM2.5浓度实测图
Fig.15 field measurement of PM2.5 concentration on both sides of the shrub belt in autumn

层图像, 通过其专用分析软件, 获得植物冠层的相关指标和参数 (表7), 为下一步绿色界面指数与 PM2.5浓度场相关性数据耦合提供依据。

由于冬季叶片掉落, 因此植物叶面积密度和叶面积指数均为0, 上述数据表只展示春季、夏季和秋季三季的结果。公司街 (凤翥街—铁路街段) 和复华四道街 (复华街—教化街段) 由于无树木种植, 因此无叶面积密度和叶面积指数。

2.4 数据分析

Jin S在研究街道树木对PM2.5在垂直方向上扩散的影响中, 定义了衰减系数PMAC计算公式, 以此对测量数据进行量化分析^[22]。本文依此定义了典型街谷PM2.5浓度分布衰减率PMDA计算公式:

$$PMDA = \frac{C'_{\lambda} - C'_{\text{出}}}{C'_{\lambda}} \times 100\% - \frac{C_{\lambda} - C_{\text{出}}}{C_{\lambda}} \times 100\%$$

C'_{λ} ——指对照组街谷入风口PM2.5浓度;

表7 实测LAD、LAI数据表

Tab.7 measured LAD, LAI data sheet

季节	走向	街道	LAD/m ² /m ⁻³	LAI/m ² /m ⁻²
春季	西北—东南	公司街 (中密度段)	0.17	0.25
		海关街 (高密度段)	0.20	0.36
	东北—西南	上夹树街 (中密度段)	0.26	0.44
		邮政街 (高密度段)	0.20	0.31
夏季	西北—东南	公司街 (中密度段)	0.45	0.90
		海关街 (高密度段)	0.77	1.64
	东北—西南	上夹树街 (中密度段)	0.73	1.60
		邮政街 (高密度段)	0.89	1.80
秋季	西北—东南	公司街 (中密度段)	0.57	0.85
		海关街 (高密度段)	0.66	0.96
	东北—西南	上夹树街 (中密度段)	0.61	0.77
		邮政街 (高密度段)	0.69	0.91

$C'_{\text{出}}$ ——指对照组街谷出风口PM2.5浓度;
 C_{λ} ——指街谷入风口PM2.5浓度;
 $C_{\text{出}}$ ——指街谷出风口PM2.5浓度。

以每条平行于街谷空间的截面数据为准, 选取街谷两端测点, 即入风口处测点

和出风口处测点, 计算通过街谷内的PM2.5浓度变化情况。由于无树木种植街道无法研究PM2.5浓度变化与LAD和LAI的相关情况, 因此将无树木种植街道设置为对照组, 并以对照组PM2.5浓度变化率与其余

表8 PMDA与LAD、LAI影响分布表

Tab.8 impact distribution table of PMDA and LAD, LAI

季节	走向	街道	LAD/m ² /m ³	LAI/m ² /m ²	PMDA/%
冬季	西北—东南	公司街（无树木段）	/	/	/
		公司街（中密度段）	/	/	16.39
		海关街（高密度段）	/	/	13.75
	东北—西南	复华四道街（无树木段）	/	/	/
		上夹树街（中密度段）	/	/	37.38
		邮政街（高密度段）	/	/	35.79
春季	西北—东南	公司街（无树木段）	/	/	/
		公司街（中密度段）	0.17	0.25	8.26
		海关街（高密度段）	0.20	0.36	69.35
	东北—西南	复华四道街（无树木段）	/	/	/
		上夹树街（中密度段）	0.26	0.44	63.94
		邮政街（高密度段）	0.20	0.31	27.26
夏季	西北—东南	公司街（无树木段）	/	/	/
		公司街（中密度段）	0.45	0.90	17.49
		海关街（高密度段）	0.77	1.64	30.41
	东北—西南	复华四道街（无树木段）	/	/	/
		上夹树街（中密度段）	0.73	1.60	13.76
		邮政街（高密度段）	0.89	1.79	-12.78 /
秋季	西北—东南	公司街（无树木段）	/	/	/
		公司街（中密度段）	0.57	0.85	15.67
		海关街（高密度段）	0.66	0.96	8.96
	东北—西南	复华四道街（无树木段）	/	/	/
		上夹树街（中密度段）	0.61	0.77	27.15
		邮政街（高密度段）	0.69	0.91	11.16

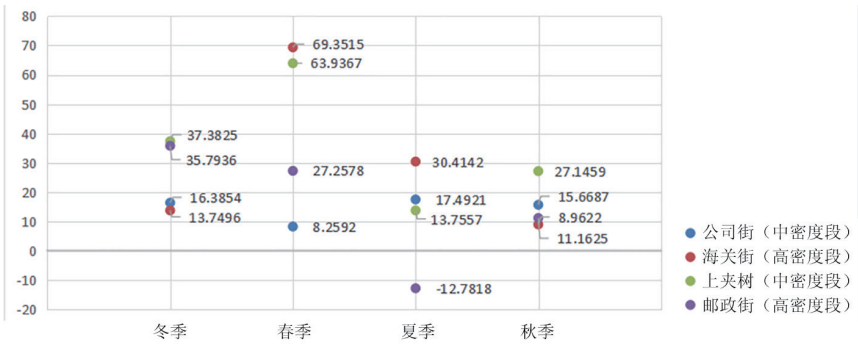


图16 不同季节不同街道PMDA数据图

Fig.16 PMDA data graphs for different streets in different seasons

表9 PMDA与LAD相关性分析

Tab.9 correlation analysis between PMDA and LAD

	PMDA	LAD
Pearson相关性	1	-0.60*
PMDA 显著性（双侧）		0.04
N	12	12
Pearson相关性	-0.60*	1
LAD 显著性（双侧）	0.04	
N	12	12

★.在0.05水平（双侧）上显著相关。

表10 PMDA与LAI相关性分析

Tab.10 correlation analysis between PMDA and LAI

	PMDA	LAI
Pearson相关性	1	-0.52
PMDA 显著性（双侧）		0.08
N	12	12
Pearson相关性	-0.52	1
LAI 显著性（双侧）	0.08	
N	12	12

实验组街道PM2.5浓度变化率的差值定义为PM2.5浓度分布衰减率PMDA。对6条街道实测数据的PMDA处理结果如表8。

将上表PMDA数据整理得可视化变化图（图16）。

从PM2.5衰减率PMDA数据图中可以看出，除邮政街（海关街—北京街段）夏季时PMDA数据为负值外，其他街段所得PMDA数据均为正值。也就是说，夏季时，邮政街（海关街—北京街段）PM2.5浓度变化量相对于同方向对照组的复华四道街（复华街—教化街段）的PM2.5浓度变化量大12.78%，而其余各实验组不同季节PM2.5浓度变化量比对应反向对照组的街道小26.45%，同时PMDA值越大，这种差异越明显。此外，公司街（西大直街—邮政街段）四季差值相差不大，在8.26%~17.49%之间变化；海关街（满洲里街—邮政街段）与上夹树街（利群街—教化街段）春季差异较大，变化幅度超过60%；邮政街（海关街—北京街段）除夏季呈现特殊性外，春、秋季差异程度相差较小，在27.26%~35.79%之间变化，冬季相差较大，变化幅度达35.79%。

通过把以上实测结果分析量化，进而通过SPSS统计学软件与各自绿色界面指数（LAD 和 LAI）进行相关性分析，以确定PM2.5浓度场与LAD和LAI的准确相关性，为下一步研究工作做出基础结论。在具体相关性分析的过程中，采用Pearson相关系数进行双侧分析（表9-10）。

统计学中定义：“当两变量不相关的概率小于0.05，即5%，即可认为两变量显著相关”。从表中看出，叶面积密度（LAD）与衰减率PMDA显著相关性为0.04，小于0.05，故可以认为二者在0.05（双侧）水平上显著负相关，相关系数为-0.598。而叶面积指数LAI与衰减率PMDA相关性并不十分明显。因此在研究PM2.5浓度场与街谷绿色界面之间的影响关系时，采用显著相关性权重更大的叶面积密度（LAD）作为绿色界面指数更为合适。

3 讨论

实际街谷内大气中PM2.5的来源复杂

多样,如秸秆焚烧、工业排放、机动车尾气排放等来源的比例不同,街谷内绿色界面对PM2.5分布场的影响不同。

街谷内PM2.5扩散主要依靠来流风,植物会降低风速,从而阻碍PM2.5扩散。以行道树为例,从行人角度看,行道树树冠会形成顶棚,将街谷内部大气与外部大气隔开,当街谷内部空间产生的PM2.5(如机动车尾气)浓度高于大气中的PM2.5浓度时,此时树木的存在会阻碍街谷内PM2.5向外扩散,而将其围积在街谷内部,此时,越高种植密度、高叶面积密度的绿色界面造成的阻碍越强;而当大气中来流风所含PM2.5浓度大于街谷内部产生的浓度时,植物的存在则会形成一道隔离屏障,将PM2.5过滤隔离在街谷之外,此时对于街谷内的行人来说是有利的。

由于不同季节下大气中的PM2.5浓度不一致,因此在实际绿色界面种植设计中需要根据实际情况,依据不同的PM2.5来源和比例,在不同时期对街谷内的植物进行合适的修剪控制,以起到最有利于降低街谷内PM2.5浓度的效果。

4 结 论

根据以上对哈尔滨典型街道PM2.5分布场的实测数据及分析结果,得到以下结论。

一是哈尔滨典型街道PM2.5全天时段浓度呈现上午比下午平均高出37.75%,冬季比夏季平均高出4.7倍的特性。

以中午12时为分界线,对六条街道的上下午平均浓度进行比较,除公司街(凤翥街—铁路街段)上午浓度比下午浓度低0.54%外,其他街道上午浓度均高于下午浓度,数值分别为:公司街62.77%,海关街38.02%,复华四道街45.44%,上夹树街39.19%,邮政街3.36%。

对PM2.5平均浓度季节性分布规律看出,六条街道的PM2.5浓度呈现出冬季最高、夏季最低的特性,西北—东南走向的三条街冬季PM2.5平均浓度是夏季浓度的4.73倍,东北—西南走向的三条街道冬季PM2.5平均浓度是夏季浓度的4.76倍。

二是街谷空间的灌木带对PM2.5浓度场平均积极贡献率为18.62%。

样本中有两条街道含灌木带,分别是西北—东南走向的海关街(邮政街—满洲里街段)和东北—西南走向的邮政街(海关街—北京街段)。以灌木与行道树的两个测点比较,四季PM2.5浓度灌木测点均小于行道树测点,具体值为:海关街(邮政街—满洲里街段)冬季40.43%,春季4.92%,夏季20.97%,秋季19.54%;邮政街(海关街—北京街段)冬季5.74%,春季3.76%,夏季36.01%,秋季17.62%。由此可见,灌木对PM2.5浓度的降低起到积极作用。

三是PM2.5浓度分布场与绿色界面中的叶面积密度(LAD)呈显著负相关特性,而与另一个参数叶面积指数(LAI)显著相关性较弱。

通过SPSS将叶面积密度(LAD)与叶面积指数(LAI)分别与PM2.5衰减系数(PMDA)数据进行相关性分析。结果显示:PM2.5与LAD相关系数为0.04(小于显著相关性标准界限值0.05),呈显著负相关,相关系数为-0.598;而与LAI相关系数为0.082,二者显著相关性并不明显。因此,在进行绿色界面与PM2.5浓度场相关研究时,采用显著相关性权重更大的叶面积密度(LAD)作为绿色界面指数更为合适。

参考文献:

- [1] 张艳. 1978年以来哈尔滨市域城市化特征及其动力分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- ZHANG Y. Harbin's Characteristics of Urbanization and Its Dynamic Analysis Since 1978[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2013.
- [2] WANIA A, BRUSE M, BLOND N, *et al.* Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 94(1): 91-101.
- [3] 程慧波. 中国北方城市可吸入颗粒物时空分布特征及气象因素对其影响分析[C]//中

国环境科学学会. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 9.

CHENG H B. Temporal and spatial distribution characteristics of inhalable particulate matter and the influence of meteorological factors in northern China[C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2015 Annual Conference of Chinese Society of Environmental Sciences. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015: 9.

- [4] 王婷婷, 任桂林, 王华昕. 2013—2015年哈尔滨市空气质量特征分析[J]. *黑龙江气象*, 2017, 34(1): 25-27.

WANG T T, REN G L, WANG H X. Analysis of Air Quality Characteristics of Harbin City from 2013 to 2015[J]. *Heilongjiang Meteorology*, 2017, 34(1): 25-27.

- [5] 张莹, 魏晓慧, 王阿川. 哈尔滨市PM2.5质量浓度变化特征及影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(3): 188-191.

ZHANG Y, WEI X H, WANG A C. Analysis of Variation Characteristics and Influencing Factors of PM2.5 Mass Concentration in Harbin[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 39(3): 188-191.

- [6] 刘彦飞, 邵龙义, 王彦彪, 等. 哈尔滨春季大气PM2.5物理化学特征及来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2010(2): 131-134.

LIU Y F, SHAO L Y, WANG Y B, *et al.* Physical and Chemical Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM2.5 in Harbin in Spring[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010(2): 131-134.

- [7] 迟晓德, 周晶. 哈尔滨城市空气PM2.5污染主要来源分析[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(11): 1-4.

CHI X D, ZHOU J. Analysis of Main Sources of PM2.5 Pollution in Urban Air in Harbin[J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(11): 1-4.

- [8] COPPALLE. A street canyon model for low wind-speed conditions[J]. International Journal of Environment & Pollution, 2001, 16(1): 417-434.
- [9] DE PAUL F T, SHEIH C M. Measurements of wind velocities in a street canyon[J]. Atmospheric Environment, 1986, 20(3): 455-459.
- [10] YANG Y, SHAO Y. Numerical simulations of flow and pollution dispersion in urban atmospheric boundary layers[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(7): 906-921.
- [11] SOULHAC L, PERKINS R J, SALIZZONI P. Flow in a Street Canyon for any External Wind Direction[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2008, 126(3): 365-388.
- [12] NAKAMURA Y, OKE T R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon[J]. Atmospheric Environment, 1988, 22(12): 2691-2700.
- [13] 叶鹤宸, 朱逊. 哈尔滨市秋季城市公园空间特征健康恢复性影响研究——以兆麟公园为例[J]. 西部人居环境学刊, 2018, 33(4): 79-85.
- YE H Z, ZHU X. Study on the Effect of Spatial Characteristics and Health Restoration of Urban Parks in Harbin City in Autumn—Taking Zhaolin Park as an Example[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2018, 33(4): 79-85.
- [14] 卓健, 曹根榕. 街道空间管控视角下城市设计法律效力提升路径和挑战[J]. 规划师, 2018(7): 18-25.
- ZHUO J, CAO G R. The Pathway And Challenges Of Improving Statutory Power Of Urban Design In The Street Governance View[J]. Planners, 2018(7): 18-25.
- [15] GHASEMIAN M, AMINI S, PRINCEVAC M. The influence of roadside solid and vegetation barriers on near-road air quality[J]. Atmospheric Environment, 2017, 170(12): 108-117.
- [16] MORADPOUR M, AFSHIN H, FARHANIEH B. A numerical study of reactive pollutant dispersion in street canyons with green roofs[J]. Building Simulation, 2017, 11(1): 1-14.
- [17] GROMKE C, RUCK B. Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies[J]. Forestry, 2008, 81(3): 243-258.
- [18] MORI J, FINI A, GALIMBERTI M, *et al.* Air pollution deposition on a roadside vegetation barrier in a Mediterranean environment: Combined effect of evergreen shrub species and planting density[J]. Science of The Total Environment, 2018, 643: 725-737.
- [19] 林钰琼, 姚佳伟, 郑静云, 等. 基于风洞可视化的环境性能建筑生形方法研究[J]. 南方建筑, 2018(2): 24-29.
- LIN Y Q, YAO J W, ZHENG J Y, *et al.* Research on the Building Morphology Generation Method Based on the Wind Tunnel Visualization of Environmental Performance [J]. South Architecture, 2018(2): 24-29.
- [20] ALI-TOUDERT F, MAYER H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. Building & Environment, 2006, 41(2): 94-108.
- [21] 鲍越. 基于环境行为学的城市街道空间互动性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- BAO Y. Research on spatial interaction of urban street based on environmental behavior[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [22] JIN S, GUO J, WHEELER S, *et al.* Evaluation of impacts of trees on PM_{2.5} dispersion in urban streets[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99(99): 277-287.

图表来源:

图1: 来源于谷歌地球

图2-16: 作者绘制

表1-10: 作者绘制

收稿日期: 2018-10-29

(编辑: 苏小亨)