

城市街谷内流场及污染物的实测分析

邹惠芬¹,李宗昆¹,殷梅梅¹,叶盛²,李绥³

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学商学院,辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究街谷内污染物质量浓度的日间变化规律和空间分布特征,温度和车流量与街谷内污染物质量浓度的关系,以便于分析城市绿化灌木对街谷内大气环境的影响.方法 根据沈阳市典型街谷内的实测数据,采用 ORIGIN 软件分析沈阳市可吸入颗粒物的空间分布特征及其与风速、温度、车流量等要素的相关性.结果 实测条件下街谷内的污染物分布受多种因素的影响,污染物质量浓度日变化呈现一定的规律性,峰值值周期性出现;测量结果表明,在空间上,街谷内颗粒污染物质量浓度的垂直分布具有明显的分层特征,水平方向上则呈现近似对称分布的特点.结论 微风条件下,街谷内颗粒污染物质量浓度主要受两个因素的影响:一个是背景质量浓度的变化;另一个是机动车排放物在街谷内的累积.街谷内污染物质量浓度的日间变化规律与背景质量浓度变化相似,与车流量并无直观的相关性.城市街谷内绿化树木对街谷内污染物分布与扩散的影响作用比较复杂.绿化树木对颗粒物有一定的吸附作用,但其也能阻碍污染物向街谷外扩散,从而引起街谷内污染物质量浓度的升高.

关键词 城市街谷;大气环境;颗粒污染物;实测;绿化树木

中图分类号 X511

文献标志码 A

The Measured Data Analysis of Flow Fields and Pollutants in the City Street

ZOU Huifen¹, LI Zongkun¹, YIN Meimei¹, YE Sheng², LI Sui³

(1. School of Municipal and Environment Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Commerce, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Architecture and Urban, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: According to the measured data of Shenyang typical street valley, the spatial distribution characteristics of inhalable particles in Shenyang and their correlation with wind speed, temperature and traffic flow are analyzed by using the ORIGIN software. The daytime variation and spatial distribution characteristics of pollutant mass concentration in street valley, the relationship between temperature and vehicle flow and pollutant mass concentration in street valley, and the influence of

收稿日期:2017-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51208313)

作者简介:邹惠芬(1972—),女,教授,主要从事建筑节能和空气品质保障技术等方面研究.

urban greening shrubs on the atmospheric environment in street valley were obtained. Under the measured conditions, the distribution of pollutants in the street valley is affected by many factors, such as the diurnal variation of pollutant mass concentration shows certain regularity, and the peak and valley values appear periodically. The conditions in the street canyon particulate pollutant mass concentration is mainly influenced by two factors; one is the change of background mass concentration; the other is a cumulative emissions from motor vehicles in the street canyon. However, the diurnal variation of pollutant mass concentration in the street was similar to that of background mass concentration, and there was no visual correlation with traffic flow. The effect of greening trees on the distribution and diffusion of pollutants in the valley of urban street is more complex. The greening trees have certain adsorption effect on the particulate matter, but it can also prevent the pollutant from spreading outside the mass concentration of pollutants in the street valley.

Key words: urban canyon; atmospheric environment; particulates; actual measurement; afforestation trees

改革开放以来,我国经历了世界历史上规模最大、速度最快的城镇化进程,而城市的发展伴随着人口的增多和机动车使用量的增加,机动车尾气排放直接进入街道,对街谷内空气品质造成直接影响,并且汽车尾气多也在 $\text{PM}_{2.5}$ 范围内的颗粒物,对雾霾的产生也有着推动作用^[1-3]. 浙江大学王纪武^[4]指出城市的街谷空间形态是影响街谷局地流场,并导致空气污染物聚集的重要原因. 刘乙等^[5]通过分析实地测量和数值模拟的结果,在不同维度上总结北京市街道峡谷内流场特征和污染物扩散规律. 顾兆林^[6]的研究表明,街谷布局对街谷内风场有直接作用,污染物扩散主要受街谷内涡流结构的影响.

作为东北老工业基地的重点城市,沈阳市的空气品质一直受到机动车排放尾气和燃煤锅炉等产生的固体颗粒物污染^[7-12]. 从室外空气品质优劣的角度出发,研究街谷内污染物的分布状况和日变化规律,以尽可能减小行人对污染物的暴露概率已经成为重要研究的课题之一^[13-14]. 基于此,笔者以沈阳市为例,针对沈阳市3条主要东西向街道进行了实地测量,测量内容包括 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、车流量、空气温度和风速风向的日变化等,通过获取第一手资料来研究污染物在城市边界层范围内的传输和扩散机制,得出了污染物

在城市街谷内,尤其是深街谷内的扩散规律,同时分析了街谷内污染物日变化规律及影响因素,探讨了街谷内绿化树木对街谷内污染物分布与扩散的影响作用.

1 街谷测量地点布置

所测量目标街谷选择沈阳高密度中心地区——和平区的三条街谷(文化路、文艺路和文萃路)的基本状况如图1所示. 其中,测量点①、②、③分别位于文艺路、文化路和文萃路上,街谷内三个测量点西向距离小南街约20 m;测量点④位于沈阳建筑大学内,作为测量的背景点.

文艺路街道的绿化作用较好,街道两侧的树木相对来讲高大浓密,树木和植被在街谷顶部形成了状如顶盖的分布,这样的街谷称为绿化街谷. 而文化路和文萃路两个街谷内绿化作用较小,树木和植被没有形成规模性的分布,我们称这样的街谷为裸露街谷. 文艺路和文化路街道宽度约为30~40 m,街谷两侧的建筑物高度约为25 m,街谷形状因子大概为0.7. 而文萃路街谷的街道宽度约为25 m,两侧建筑的高度也约为25 m,所以其街谷形状大概为1,是3条街谷里面最大的. 3条街谷的实际街景状况如图2所示.



图 1 街谷测量点的分布位置

Fig. 1 The distribution measurement point position of the valley street

在环境因素相对稳定的情况下街谷内的风场和颗粒污染物的分布也可以认为是相对稳定的,但是实际街谷内的环境受到背景气象条件的影响,其处于动态变化之中^[15]. 然而在实际测量街谷内气象数据的时候,同一时间点的测量无法做到同时同刻,达不到严格意义上的同步,这种获取实验数据的方法称作虚拟同步测试法^[16]. 为了获取相对准确可靠的数据,需遵守以下条件:

(1)总测量时间尽量要小. 为了使同一时刻的测量数据满足背景来流以及街谷内的气象参数相对一致,每次测量持续时间最好不超过 30 min.

(2)在测量时间段内,街道上的车流量不能波动太大. 通过对测量前后街道上的车流量进行统计和对比,对该条件进行考核评估,以确定客观条件是否满足.

(3)单个采样点的持续时间要足够. 街谷内汽车尾气排放颗粒污染物的过程并不是连续不间断的,在对每个测量点进行数据采集的过程中,街道上的车流量要能达到一定的统计量. 此外,为了满足街道两侧污染物在



图 2 测量点所在的实际街景图

Fig. 2 Practical view of measurement point

垂直方向上的对比分析要求,每一次的数据采样时间均要长于街谷内颗粒污染物的循环时间,所以在本次测量的过程中,每一次的采样时间控制在5~10 min.

2 测量结果与分析

测量时间:2017年7月26-29日.

测试仪器:温湿度自记录仪、PM_{2.5}测试仪和风速测试仪.街道车流量采用人工统计的方法.背景风速和风向的测量数据在沈阳建筑大学内的邻近文华街的一幢宿舍楼楼顶获取.

测量中,一台DUSTTRAKTM固定在路南侧备用车道外沿,离路南侧建筑约为4 m,另外一台DUSTTRAKTM测量点不定,其测量结果与固定点相比,用于街谷内污染物质量浓度分布分析.7月26日的测量在文艺路上,7月27日测量在文化路上,7月28日的

测量在文萃路上,7月29日在背景点测量PM_{2.5}背景质量浓度.背景质量浓度的测量在沈阳建筑大学内贴近文华街的一幢宿舍楼楼顶,离地面约24 m.背景质量浓度测量点离最近的交通干道(浑南大道)超过120 m,可以忽略局部污染源的影响.每次现场测量时间为7:00—20:00.现场测量的4天中,沈阳市经历着相似的天气过程,主要特征是晴天、高温及微风.

2.1 背景风环境

测量时间段风俗和风向条件如图3所示,在测量时段内,沈阳地区风速风向变化很小,风速较小,平均值只有1.36 m/s,主导风向为南风 and 偏南风.风速下午略高于上午,且在18:00—19:00时达到最大值.虽然来流风向与街谷走向垂直,但是微风在驱动街谷内的空气时,难以形成典型的环流漩涡,此时,街谷内颗粒物扩散主要受湍流作用影响.

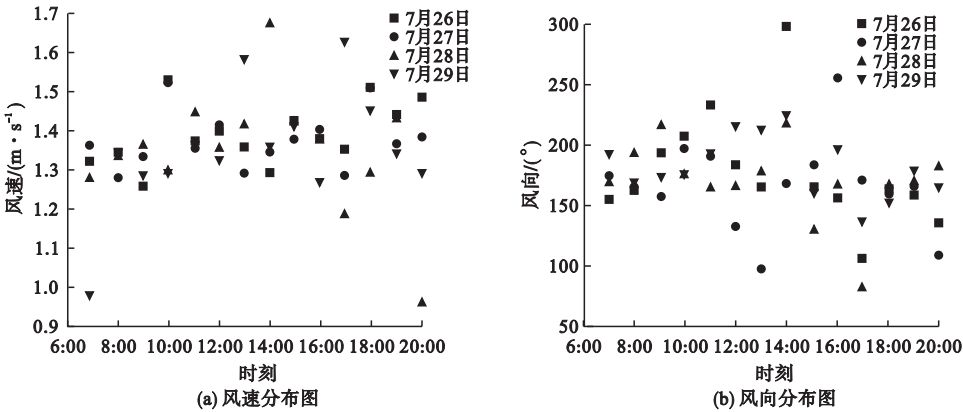


图3 测量时间段内的风速和风向条件

Fig. 3 Measurement period of wind speed and wind conditions

2.2 街谷内污染物日间变化规律

清晨气温较低,大气边界层受温度影响,处于收缩状态,街谷内颗粒污染物质量浓度的浓缩和累积达到最大值.随着上午温度的不断升高,颗粒污染物质量浓度逐渐降低,并在16:00左右达到最小值,之后颗粒污染物质量浓度开始增加.测量期间,街谷内和背景测量点的污染物质量浓度日间变化规律基本一致,但是变化程度不同,如图4所示.但是,7月26日和27日的测量结果与背景质量浓

度变化规律不同,主要是上午的变化趋势有很大.这两日的实测结果表明,街谷内污染物在上午是逐渐累积增加的,并在11:00左右达到峰值,之后开始减小.这是因为26日之前沈阳地区出现了连续的降雨.因此,在7月26日和27日早晨大气边界层云层较厚,边界层的膨胀也来得较慢.可见,在这次测量期间,街谷内颗粒污染物质量浓度与大气边界层的变化有密切关系.

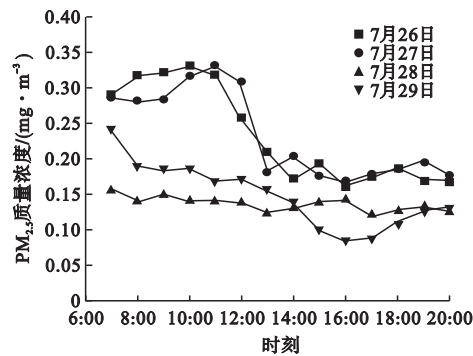


图4 街谷内 $PM_{2.5}$ 质量浓度日间变化
Fig. 4 Street valleys $PM_{2.5}$ mass concentration change in the day

2.3 街谷内污染物质量浓度空间分布特征

在测量实验中,一台 DUSTTRAKTM 位置被固定,而另一台 DUSTTRAKTM 的位置根据需要移动,从而得到不同时间段内街谷内污染物质量浓度的不同分布.测量中仍然采用虚拟同步的测量方法.图5为文化路南侧离建筑物壁面1 m处 $PM_{2.5}$ 质量浓度的垂直分布.由于测量实验期间,背景风速很弱(见图3),不足以在街谷内驱动典型的环流漩涡,因此街谷内污染物的扩散主要受街谷内空气流动湍流特征的影响.街谷内污染物质量浓度的分布呈现分层分布的特点.在微风条件下,文化路内测量结果显示该街谷内污染物质量浓度除了在地面附近很高外,在大约10 m的高度处还经常出现另一个污染物(PM_{10})质量浓度极大值.

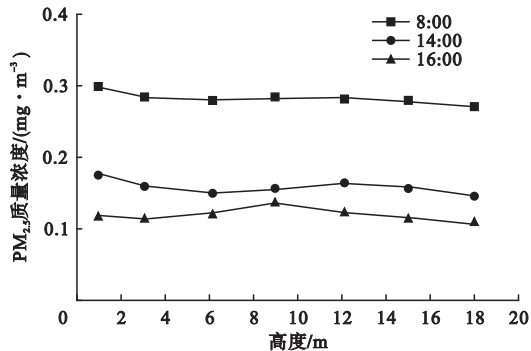


图5 建筑物壁面1 m处 $PM_{2.5}$ 质量浓度垂直分布
Fig. 5 $PM_{2.5}$ mass concentration vertical distribution from 1 m

图6为污染物质量浓度在街谷内约1.5 m高处的水平分布特点.其中横坐标表示测量点离路南侧建筑物的距离,8 m和24 m的两个测量点分别位于主车道的南、北侧外沿.在街谷两侧,污染物质量浓度并没有明显的一侧高(背风面)、另一侧低(迎风面)的变化规律.这同样说明街谷内空气流动没有典型漩涡的存在,影响街谷内污染物分布的主要因素是街谷内空气流动的湍流特点.

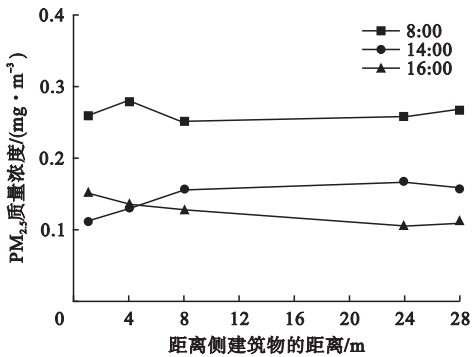


图6 街谷内污染物质量浓度的水平分布
Fig. 6 The horizontal distribution of pollutant mass concentration in canyon

已有研究表明,在微风条件下,街谷内空气流动主要受行驶车辆诱导湍流的影响.在双向行驶的街谷内,行驶车辆在街谷两侧的影响应该具有相似性.所以,街谷污染物质量浓度的水平分布没有明显的高低变化.可见,在微风条件下,影响街谷内污染物质量浓度分布的主要影响因素是街谷内的湍流特征,尤其是行驶车辆诱导的街谷内空气湍流流动.

2.4 温度与街谷内污染物质量浓度的关系

大气边界层的变化主要受大气温度影响^[17].比较街谷内颗粒污染物质量浓度与温度的变化规律,可以体现大气边界层对街谷内颗粒污染物质量浓度的影响.图7为7月26日和27日文艺路和文化路测量点街谷内大气温度和地表平均温度的变化.

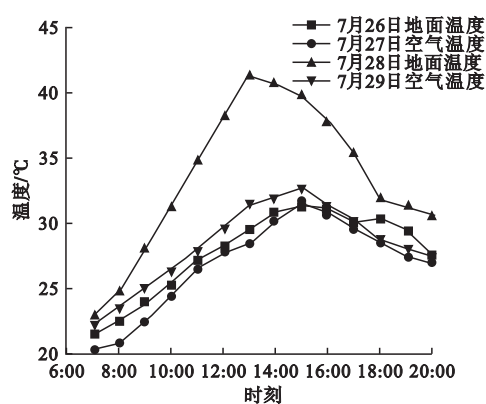


图7 街谷内大气温度和地表平均温度的变化

Fig.7 The change between street valleys atmospheric temperature and the average temperature of the earth's surface

由图7可知,上午街谷内大气温度呈上升趋势,在15:00—16:00时达到最大值.大气边界层在受热时处于膨胀状态,此时街谷内污染物质量浓度随大气边界层膨胀而稀释,因此呈现减小趋势,并在16:00前后达到最小值,之后颗粒污染物质量浓度开始增加.可见,大气边界层受温度变化产生的早晚有规律的膨胀与收缩运动对城市边界层内的污染物质量浓度变化有很大影响.

2.5 车流量与街谷内污染物质量浓度关系

机动车尾气是街谷内颗粒物污染物的主要来源,通常情况下,研究人员希望街谷内颗粒污染物质量浓度与车流量能够有很好的相关性^[18-21].街谷内车流量的变化如图8所示.测量期间,车流量在9:00—11:00和17:00—18:00较大,但是交通峰值并不是很明显.17:00—18:00是下班高峰期,因此车流量较大.在沈阳地区,根据单位性质不同,上班时间也不同,主要分布在8:00—10:00,因此上班时间车流量高峰并不明显.另外,在夏天,居民一般会减少日间外出,尤其是中午,而傍晚外出人数增加,这也导致下午下班时间车流高峰.由图4和图8可见,街谷内颗粒污染物质量浓度与车流量并没有直观的相关性.这是因为街谷内污染物质量浓度的变化是污染源排放过程和扩散过程共同影响的

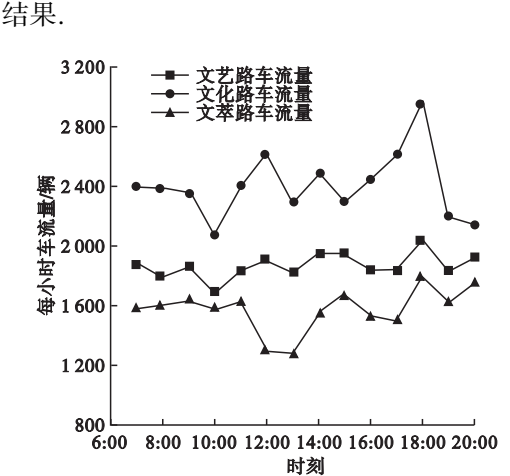


图8 街谷内车流量的日间变化

Fig.8 The daily change of canyon traffic flow

为了更加直接地体现机动车尾气对街谷内颗粒污染物质量浓度的贡献,笔者分析街谷内和背景点污染物质量浓度随时间的相对变化率(RV),如图9所示.相对变化率由式(1)计算:

$$RV_i = \frac{C_{i+1} - C_i}{C_i} \tag{1}$$

式中: C_i 和 RV_i 分别为 $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度和相对变化率, i 为在 i 时刻.

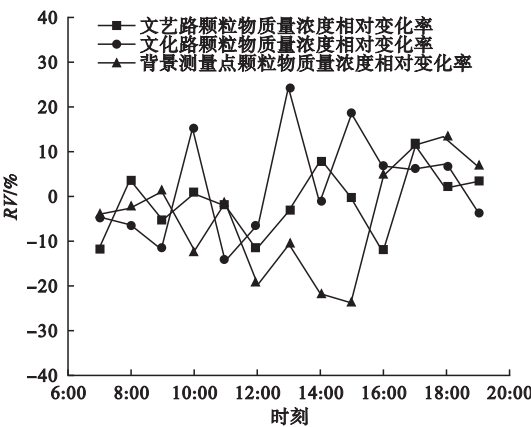


图9 污染物质量浓度相对变化率

Fig.9 The relative change rate of pollutant mass concentration

在不考虑污染源排放时,背景质量浓度在上午时间应该是随时间降低的,根据式(1),背景质量浓度的相对变化变化率应该是负值.图9中7月29日上午背景点污染物

质量浓度的相对变化率并非一直为负,其中 $RV_9 = 1.62$, RV_{11} 也只有 -0.05 。这说明在上午时间内,背景点的污染物质量浓度变化受到来自污染源排放的影响。该影响可能来自城区内城市粗糙层内污染物的向外扩散。

当街谷内污染物质量浓度的相对变化率比背景点污染物质量浓度相对变化率高时,说明街谷内污染物质量浓度处于相对累积的状态。这种相对的累积主要由机动车尾气引起,即街谷内机动车尾气污染物处于累积状态。由图9可见,在11:00以前,除了在9:00和11:00时间外,街谷内污染物质量浓度的相对变化率几乎都比背景点上污染物质量浓度相对变化率高。这种背景点污染物质量浓度相对变化率时而比街谷内污染物质量浓度相对变化率低,时而又比街谷内污染物质量浓度相对变化率高的现象一方面是因为背景点污染物质量浓度受污染物排放源影响,另一方面是受上午边界层膨胀特征的影响。由图7可见,在裸露街谷内,大气温度在11:00以前增加得非常快,导致大气边界层不稳定增加。在这种不稳定大气条件下,大气边界层的膨胀并不是连续的,而是呈现有规律的间歇性。在11:00—15:00时,大气边界层相对稳定。这段时间内,街谷内污染物质量浓度相对变化率明显比背景点污染物相对变化率高。这说明街谷内机动车尾气污染物处于很强的累积状态。从污染物控制的角度出发,适当控制这段时间内的车流量有利于改善街谷的空气质量。16:00以后,大气边界层开始收缩,因此背景点污染物质量浓度开始增加,相对变化率为正值。此时街谷内污染物质量浓度的相对变化率也为正值,显示街谷内污染物处于累积状态。在这段时间,背景点污染物质量浓度的相对变化率比街谷内的高,说明城市大气边界层压缩在城市的郊区比在城市粗糙层内变化更快。另外,16:00以后街谷内污染物质量浓度相对变化率比背景点低,还可能与测量期间16:00以后风速较大有关

(见图7)。

可见,微风条件下城市街谷内污染物质量浓度的日间变化其实主要受两个因素的影响:一个是背景质量浓度随边界层运动的变化;另一个是机动车尾气在城市街谷内的累积。

2.6 城市绿化灌木对街谷内大气环境影响

7月26日和27日的测量实验分别在文艺路和文化路进行,前者为有树木绿化的街谷,后者为裸露街谷。由图8可见,7月27日文化路测量点的车流量明显比26日文艺路车流量大。但是,两点观测的 $PM_{2.5}$ 质量浓度差别并不大。13:00以前时段文化路观测点 $PM_{2.5}$ 质量浓度略高,而16:00以后,文艺路观测点污染物质量浓度略高。

根据风洞实验和数值模拟研究,绿化树木的存在会阻碍污染物的扩散,使绿化街谷的污染物质量浓度比裸露情形时的高。这意味着绿化街谷内污染物的累积比裸露情形时更严重。但是,从污染物质量浓度的相对变化率来看(见图9),7月26日文艺路观测点(绿化街谷)污染物质量浓度的相对变化率并不高。反而是7月27日文化路(裸露街谷)污染物质量浓度的相对变化率频率出现正的极大值。必须指出的是,上述关于绿化街谷的研究均假设街谷内绿化树木在沿街谷方向是连续、均匀分布的,这与真实街谷内的绿化有很大区别。可见,真实街谷内的绿化树木对街谷内污染物分布与扩散过程的影响要比目前人们想象的复杂,有待更加深入的研究。另外,文化路观测点街谷的形状因子较小,且两侧建筑高低变化明显,形成非均匀街谷。街谷非均匀性的影响也能促进街谷内污染物的扩散。

街谷绿化的初衷是改善街谷内的温度环境,提高街谷内行人的舒适度。因此,绿化树木的主要作用体现在对街谷内的温度分布的影响。由图7可见,由于绿化树木对太阳辐射的遮挡,文艺路街谷内地表温度明显比文化

路低.在裸露街谷内,空气温度在 10:00—11:00 时迅速增加,在 11:00—16:00 时裸露街谷内的空气温度都维持在很高的值;而在绿化街谷内,空气温度稳定地缓慢增长,直至 16:00 左右达到最大值,随后开始减小.由图 7 可见,除了最大值外,绿化街谷内的空气温度明显要比同时刻裸露街谷内空气温度低.不同绿化街谷内空气温度都在 16:00 左右达到最大值,且最大值很接近.

表 1 给出了 7 月 26 日所测量的文艺路街谷内 14:00 和 16:00 时的地表、树叶表面、空气等不同介质的温度.在 14:00 时,街谷内空气温度仍然处于上升状态,地表、树叶表面的温度都比空气温度高.可见,此时地表和树叶都是绿化街谷内空气温度的增加的热源.即使在 16:00 时,当空气温度达到最大值时,树叶表面的温度仍然比空气温度略高,但此时地表、树叶表面和空气的温差很小.因此,绿化树木对绿化街谷内空气温度的影响是多方面的:一方面绿化树木遮挡太阳辐射,减小绿化街谷内地表面和空气的温度;另一方面绿化树木冠层(树叶)吸收太阳辐射,自身温度升高,因此对街谷内空气起到加热作用.这说明了绿化树木引起了街谷内大气的不稳定,而街谷内大气不稳定性也会影响街谷内污染物扩散特性.

表 1 7 月 26 日文艺路街谷内不同介质温度

Table 1 The different medium temperature in road street on the 26th

测量时刻	温度/℃		
	地表	树叶表面	空气
14:00	30.8	30.6	30.2
16:00	31.0	31.2	30.7

3 结 论

(1)在微风条件下,城市街谷内部并没有形成明显的空气漩涡,污染物质量浓度分布没有出现背风面高于迎风面的典型环流规律.在空间上,街谷内颗粒污染物质量浓度的

垂直分布具有明显的分层特征,水平方向上则呈现近似对称分布的特点.此时,街谷内污染物分布主要受街谷内空气流动的湍流作用影响.

(2)在微风条件下,街谷内颗粒污染物质量浓度主要受两个因素的影响:一个是背景质量浓度的变化;另一个是机动车排放物在街谷内的累积.然而,街谷内污染物质量浓度的日间变化规律与背景质量浓度变化相似,与车流量并无直观的相关性.

(3)城市街谷内绿化树木对街谷内污染物分布与扩散的影响作用比较复杂.绿化树木对颗粒物有一定的吸附作用,但其也能阻碍污染物向街谷外扩散,从而引起街谷内污染物质量浓度的升高.绿化树木对街谷内的温度场有一定的影响,会增加街谷内大气的不稳定性,进而影响街谷内污染物的扩散特性.

参考文献

[1] 王珊,廖婷婷,王莉莉,等.西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J].环境科学学报,2015,35(11):3452-3462.
(WANG Shan, LIAO Tingting, WANG Lili, et al. Atmospheric characteristics of a serious haze episode in Xi'an and the influence of meteorological conditions[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2015, 35(11):3452-3462.)

[2] 黄巍,龙恩深.成都 PM_{2.5} 与气象条件的关系及城市空间形态的影响[J].中国环境监测,2014(4):93-99.
(HUANG Wei, LONG Enshen. The relationship between PM_{2.5} and meteorological conditions in Chengdu and the impact of urban spatial morphology[J]. Environmental monitoring in China, 2014(4):93-99.)

[3] 陈宏,周雪帆,戴菲,等.应对城市热岛效应及空气污染的城市通风道规划研究[J].现代城市研究,2014(7):24-30.
(CHEN Hong, ZHOU Xuefan, DAI Fei, et al. The study of urban ventilation corridor planning based on the accommodation of urban heat island and pollution[J]. Modern urban research, 2014(7):24-30.)

[4] 王纪武,穆吟.基于街谷尾气污染应对的空间策略研究[J].城市规划,2013,37(5):54-60.
(WANG Jiwu, MU Yin. Study on spatial strategy responding to automobile exhaust pollution

- in urban street canyons[J]. Urban spatial development, 2013, 37(5): 54–60.)
- [5] 刘乙. 基于街谷污染机理的北京建外大街空间优化研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016.
(LIU Yi. Study on the space optimization of Beijing jianwai street based on the theory of automobile exhaust pollution in urban street canyons[D]. Beijing: North China University of Technology, 2016.)
 - [6] 顾兆林, 张云伟. 城市街谷的空气流动与污染物扩散研究: 物理模型的发展及数学模拟[J]. 地球环境学报, 2011, 2(2): 362–373.
(GU Zhaolin, ZHANG Yunwei. A review of studies on air reflow and pollutant dispersion in urban street canyons: development of physical model and mathematical simulations[J]. Journal of earth environment, 2011, 2(2): 362–373.)
 - [7] 仇伟光, 张青新, 陈宗娇, 等. 沈阳市冬季一次典型大气污染过程特征和成因分析[J]. 环境保护科学, 2016, 42(4): 106–109.
(QIU Weiguang, ZHANG Qingxin, CHEN Zongjiao, et al. Characteristics and cause analysis of one typical air pollution in the winter of Shenyang city [J]. Environmental protection science, 2016, 42(4): 106–109.)
 - [8] 刘闯. 沈阳市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 污染现状分析[J]. 环境保护科学, 2011, 3: 13–15.
(LIU Min. Analysis on atmospheric particulate matter $PM_{2.5}$ pollution status in Shenyang[J]. Environmental protection science, 2011, 3: 13–15.)
 - [9] 张丽华, 王恩德. 沈阳市大气环境 $PM_{2.5}$ 污染特征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 778–781.
(ZHANG Lihua, WANG Ende. Pollution characteristics of $PM_{2.5}$ concentration in Shenyang atmosphere[J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2012, 31(5): 778–781.)
 - [10] 郭飞. 沈阳市空气质量状况与气象条件相关性分析及预测[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
(GUO Fei. Correlation analysis and prediction of air quality and meteorological conditions in Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.)
 - [11] 卫亚星, 王莉雯. 沈阳市空气质量影响因素评估[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(8): 24–27+34.
(WEI Yaxing, WANG Liwen. The assessment of factors affecting the air quality in Shenyang [J]. Geographic and spatial information technology, 2016, 39(8): 24–27+34.)
 - [12] 王未来, 李明艳, 张美航, 等. 2014—2015 年东北地区省会城市空气质量特征分析[J]. 中国公共卫生管理, 2016, 32(2): 170–173.
(WANG Weilai, LI Mingyan, ZHANG Meihang, et al. Analysis of characteristics of air quality in the three provincial capital cities of northeast China, 2014—2015[J]. Chinese journal of public health management 2016, 32(2): 170–173.)
 - [13] KWAK K H, LEE S H, SEO J M, et al. Relationship between rooftop and on-road concentrations of traffic-related pollutants in a busy street canyon: ambient wind effects[J]. Environmental pollution, 2016, 208 (Pt A): 185–197.
 - [14] GEORGE H, ARCHONTOULA C. A CFD modeling study in an urban street canyon for ultrafine particles and population exposure: the intake fraction approach[J]. Science of the total environment, 2015, 530–531.
 - [15] 何雨峰. 二维街谷风场和污染物扩散的数值模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
(HE Yufeng. A numerical study of wind field and pollutant dispersion within two-dimensional street canyons [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.)
 - [16] CUI Shiqi, JI Tieming, LI Jilong, et al. What if we ignore the random effects when analyzing RNA-seq data in a multifactor experiment[J]. Statistical application in genetics molecular biology, 2016, 15(2): 87–105.
 - [17] 覃海润. 太湖湖风环流时空分布特征及与城市热岛的相互影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
(QIN Hairun. The temporal and spatial distribution of taihu lake breeze and its interaction with urban heat island [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.)
 - [18] LIU Shuang, GUO Jinyi, CHEN Haibo. Analysis of pollutant exposure of pedestrian in urban street[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2011, 11(4): 180–185.
 - [19] HUANG Lihua, HUANG Yuandong, HE Wenrong, et al. Effect of wind direction on airflow and pollutant dispersion inside a street intersection [J]. Nature environment and pollution technology, 2015, 14(2): 355–360.
 - [20] JIMÉNEZ-HORRNERO F J, GIRÁLDEZ J V, RAVÉ E G D, et al. Description of pollutant dispersion in an urban street canyon using a two-dimensional lattice model[J]. Atmospheric environment, 2007, 41(1): 221–226.
 - [21] 檀姊静. 城市街谷风热环境及污染物分布的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
(TAN Zijing. Numerical study of thermal environment, flow patterns and pollutant dispersion in street canyons [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.)