

## 基于 ENVI-met 的道路绿带植物配植对 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响模拟

袁楚阳<sup>1</sup>, 章银柯<sup>2</sup>, 朱国亮<sup>3</sup>, 李晓璐<sup>1</sup>, 于慧<sup>1</sup>, 张天然<sup>1</sup>, 黄芳<sup>1</sup>, 莫莉<sup>4</sup>, 邵锋<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 杭州植物园, 浙江 杭州 310012; 3. 缙云县林业局, 浙江 缙云 321400; 4. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

**摘要:** 为改善城市道路人行空间的空气质量, 以杭州市临安区武肃街为研究对象, 将道路分车绿带和行道树绿带两两组合, 构成乔灌-乔草(I)、乔灌-乔灌(II)、灌草-乔草(III)和灌草-乔灌(IV)4种配植方式, 并以无植物种植的道路为参照(CK), 采用实地监测与 ENVI-met 软件模拟相结合的方法, 探究道路绿带内不同植物配植方式对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响。结果表明, 实测 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化(8:00–16:00)表现为上午和下午较高、中午低的趋势; 人行道的 PM<sub>2.5</sub> 浓度实测值与模拟值呈极显著正相关( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.944$ )。模拟显示, CK 的 PM<sub>2.5</sub> 浓度最高值出现在机动车道处, PM<sub>2.5</sub> 随风向外扩散; 相较于 CK, 在垂直方向上, 非机动车道和人行道处 I 和 II 的 PM<sub>2.5</sub> 扩散高度均低于 III 和 IV 的, 且人行道处 III 和 IV 在 4~6 m 高度处均有 PM<sub>2.5</sub> 聚集现象; 在水平方向上, 非机动车道处 4 种配植方式的 PM<sub>2.5</sub> 消减率均下降, 人行道处 I 和 II 的消减率分别增加 1.94% 和 0.87%, 而 III 和 IV 的消减率分别减少 0.51% 和 0.89%。乔灌型分车绿带和乔草型行道树绿带是道路绿带的最佳植物配植方式。

**关键词:** 道路绿带; PM<sub>2.5</sub>; 植物配植; ENVI-met; 模拟

**中图分类号:** X171      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776(2021)01-0024-09

### Simulation on Effect of Road Greenbelt on PM<sub>2.5</sub> Concentration by ENVI-met

YUAN Chu-yang<sup>1</sup>, ZHANG Yin-ke<sup>2</sup>, ZHU Guo-liang<sup>3</sup>, LI Xiao-lu<sup>1</sup>, YU Hui<sup>1</sup>, ZHANG Tian-ran<sup>1</sup>, HUANG Fang<sup>1</sup>, MO Li<sup>4</sup>, SHAO Feng<sup>1</sup>

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. Hangzhou Botanical Garden, Hangzhou 310012, China; 3. Jinyun Forestry Bureau of Zhejiang, Jinyun 321400, China; 4. Monitoring Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In one daytime of September, October and November 2019, determinations were made on PM<sub>2.5</sub> concentration in road greenbelts with different plant distribution on Wusu Street of Lin'an, Zhejiang province. Simulation was implemented by ENVI-met with open space as control. The results revealed that the daily PM<sub>2.5</sub> concentrations (8:00-16:00) were higher in the morning and in the afternoon than those at noon. There was a significant positive correlation between the measured PM<sub>2.5</sub> concentration on the pavement and the simulation value ( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.944$ ), indicating ENVI-met could simulate PM<sub>2.5</sub> concentration. The simulation indicated that the highest PM<sub>2.5</sub> concentration located in the drive way of CK. The experiment demonstrated that the best plant distribution for drive way division was tree with shrub, and for pavement was tree and grass.

**Key words:** road greenbelt; PM<sub>2.5</sub>; plant distribution; ENVI-met; simulation

随着城市化和工业化进程的加快, 大气污染已成为我国面临的重大环境问题。细颗粒物(Fine Particulate Matter, PM<sub>2.5</sub>)作为主要的大气污染物之一, 会对人体健康造成严重危害<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 汽车尾气排放是 PM<sub>2.5</sub> 的重要来源之一<sup>[3-4]</sup>。植物可以滞留和吸附 PM<sub>2.5</sub>, 植物树冠能通过降低风速使 PM<sub>2.5</sub> 沉落至叶片或地面, 从而降

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-12-14

作者简介: 袁楚阳, 硕士, 从事园林植物应用与园林生态研究; E-mail: chzxyqy@qq.com。通信作者: 邵锋, 副教授, 博士, 从事园林植物应用与园林生态研究; E-mail: shaofeng@zafu.edu.cn。

低 PM<sub>2.5</sub> 的浓度<sup>[5-9]</sup>。道路绿带植物配植可有效消减道路上的 PM<sub>2.5</sub>。于丽胖等<sup>[10]</sup>认为, 道路绿化中结构疏松的植物配植方式要比紧密的方式更有利于 PM<sub>2.5</sub> 的扩散。李新宇等<sup>[11]</sup>研究证实, 群落内郁闭度高的复层结构绿地对 PM<sub>2.5</sub> 的消减作用优于郁闭度低的单层结构绿地。但也有研究表明, 植被对于 PM<sub>2.5</sub> 的阻碍作用强于其对 PM<sub>2.5</sub> 的吸附与沉降作用, 从而不利于 PM<sub>2.5</sub> 的扩散, 反而可能增加 PM<sub>2.5</sub> 的浓度<sup>[12-13]</sup>。

与 FLUENT 和 PHOENICS 等软件侧重对建筑内外气流和传热过程的模拟不同, ENVI-met 基于流体动力学模型计算和热力学对三维微气候模型进行分析, 更加关注植物对环境微气候的影响, 因此, 更适合研究中小尺度区域内植物与大气污染物之间的关系<sup>[14-16]</sup>。该软件在住宅微气候<sup>[17]</sup>、街区热舒适度<sup>[18]</sup>和大气颗粒物扩散<sup>[19]</sup>等方面已有较多应用, 而有关植物与大气颗粒物之间的模拟研究较少。本文以杭州市临安区武肃街为研究对象, 采用实地监测与 ENVI-met 软件模拟相结合的方法, 探究城市道路分车绿带和行道树绿带内不同植物配植方式对 PM<sub>2.5</sub> 的影响, 分析 PM<sub>2.5</sub> 的扩散规律, 为城市道路绿带的植物配植提供科学依据。

## 1 研究区概况

杭州市临安区, 地理坐标为 29°56'~30°23' N, 118°51'~119°52' E, 地处长三角南翼、杭州市西部, 与安徽省接壤。属季风型气候, 年平均气温为 16.4℃, 年均日照时数为 1 837.9 h, 年均降水量为 1 613.9 mm。本研究选择武肃街作为试验样地。该样地位于临安主城区东北部, 道路全长约 3.7 km, 东临科技大道、西接临天路, 途经浙江农林大学地铁站、浙江农林大学南门、宝龙广场、浙皖农贸城和林水山居小区等, 是临安重要的城市主干道之一。武肃街道路断面为三板四带式双向四车道, 其交通流量大 (监测车流量为 1 068 veh·h<sup>-1</sup>)。道路红线内机动车道宽 16 m, 两侧各有一条分车绿带 (宽 2.5 m)、非机动车道 (宽 4.5 m) 和人行道 (宽 5 m), 人行道靠近非机动车一侧是行道树绿带。分车绿带的植物配植为: 银杏 *Ginkgo biloba*-红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum* (篱)+金边大叶黄杨 *Euonymus japonicus* var. *aurea-marginatus* (篱)、木犀 *Osmanthus fragrans*-红花檵木 (球)-麦冬 *Ophiopogon japonicus* 和侧柏 *Platycladus orientalis*-红花檵木 (球)+金边大叶黄杨 (篱); 行道树绿带配植为: 樟 *Cinnamomum camphora*-麦冬。

## 2 研究方法

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 浓度实地监测

为总结道路绿带内 PM<sub>2.5</sub> 浓度的日变化规律, 并为后续软件模型验证提供基础数据, 试验首先开展了绿带内 PM<sub>2.5</sub> 浓度实地监测。调查发现, 样地周边以住宅和商业建筑为主, 主要污染源是机动车尾气。通常机动车道处产生的 PM<sub>2.5</sub> 会向非机动车道和人行道扩散, 因此, 充分考虑现场环境条件及试验安全性等因素, 本研究在靠近分车绿带的机动车道处和人行道处各设置 1 个监测点, 其中, 监测点 1 的数据主要用于模型验证时污染源的参数设置, 监测点 2 的数据主要用于模型验证时的对比检验及分析和总结 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化规律 (图 1)。

于天气晴朗、微风条件下, 在 2 个监测点各布置 1 台微电脑激光粉尘仪 LD-5C(B) 进行 PM<sub>2.5</sub> 浓度监测。仪器架设高度距离地面为 1.5 m (同成人呼吸高度)。监测数据采集频率为 1 次·min<sup>-1</sup>, 设置精度 (k

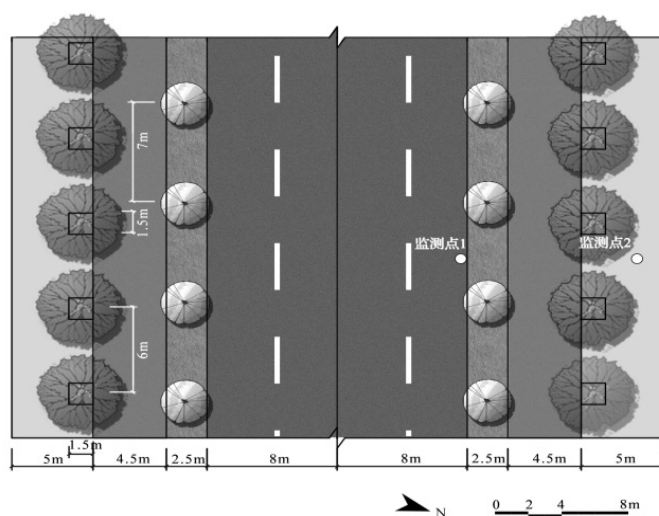


图 1 监测点位置

Figure 1 Location of monitoring points

值)为 0.001。实地监测时间为 2019 年 9 月 12 日、10 月 22 日和 11 月 23 日。由于夜晚的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化不如白天的变化明显,因此,本研究仅监测白天(8:00–16:00)的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。在监测点 1 处设置 1 台数字风速仪 MS6252B 测定温度、相对湿度和风速等气象因子数据,仪器架设高度与粉尘仪一致。

## 2.2 ENVI-met 模型设置

本研究为小尺度场地范围内的数值模拟,因此,网格尺寸精度设置较高,以提高模拟的准确性,同时,不影响模拟效率。在水平方向上,  $X$  轴代表研究范围内道路的宽度,而  $Y$  轴为道路长度,两者均选择 1 m 的最高分辨率,网格数均为 60,为减少边界失真,最外围 2 格为嵌套网格。 $Z$  轴表示模型中的垂直高度,单元网格为 1 m,共设置 30 格,采用等距网格划分方式,软件会将最底层的网格自动细划分成 5 等份。综上,本次模拟试验中的模型网格为  $60 \times 60 \times 30$  格,每个网格大小为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,总区域大小为  $60 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。将监测地段的道路平面图导入 ENVI-met 软件,建立实地模型。污染源的参数为监测点 1 的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度值,气象参数来自风速仪记录的数据。经模拟后得到人行道处的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度模拟值,然后将模拟值与实测值进行比较和分析,以此验证模拟研究的可行性、准确性和可靠性。随后,以实地模型为基础,改变道路绿带中的植物配植方式。分车绿带选择“乔灌”和“灌草”,行道树绿带选择“乔灌”和“乔草”,通过两两组合,构成乔灌-乔草(I)、乔灌-乔灌(II)、灌草-乔草(III)和灌草-乔灌(IV)4 种配植方式的研究模型,并以无植物种植的道路(CK)为参照模型,5 种模型的道路断面如图 2 所示。

4 种研究模型中的植物种植间距与实地模型的一致,分车绿带的植物株距为 7 m,行道树绿带的为 6 m。为研究不同植物配植方式对汽车尾气排放产生的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响,需忽略城市背景浓度值,在软件中根据机动车的  $\text{PM}_{2.5}$  排放特点估算其排放速率<sup>[20]</sup>。实地监测的单向车流量  $q = 534 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,参考 CHENG 等<sup>[21]</sup>研究成果,机动车尾气  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子  $E$  值确定为  $0.131 \text{ g} \cdot \text{veh}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,根据公式  $v = E \cdot q$ ,求得排放速率  $v$ 。

经计算,本试验中单向车道  $\text{PM}_{2.5}$  线源污染物排放速率约为  $19.4 \mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。武肃街为双向四车道,故设 2 条线性污染源,排放高度为 0.3 m,排放速率恒定,不考虑车流量变化对  $\text{PM}_{2.5}$  排放速率的影响。在 11 月 23 日的天气条件下,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度日变化表现为典型的“双峰单谷”型变化趋势。为使模型更好地反映  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化规律,以该日的气象因子数据作为研究模型的气象参数,风向采用杭州市临安区气象局提供的数据( $270^\circ$ ),模拟时间则与实测时间相同(8 h)。

## 2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 消减率计算

参考王佳等<sup>[22]</sup>的研究方法,将 4 种植物配植方式与 CK 进行叠加比较。同一位置处  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化值( $C$  值)

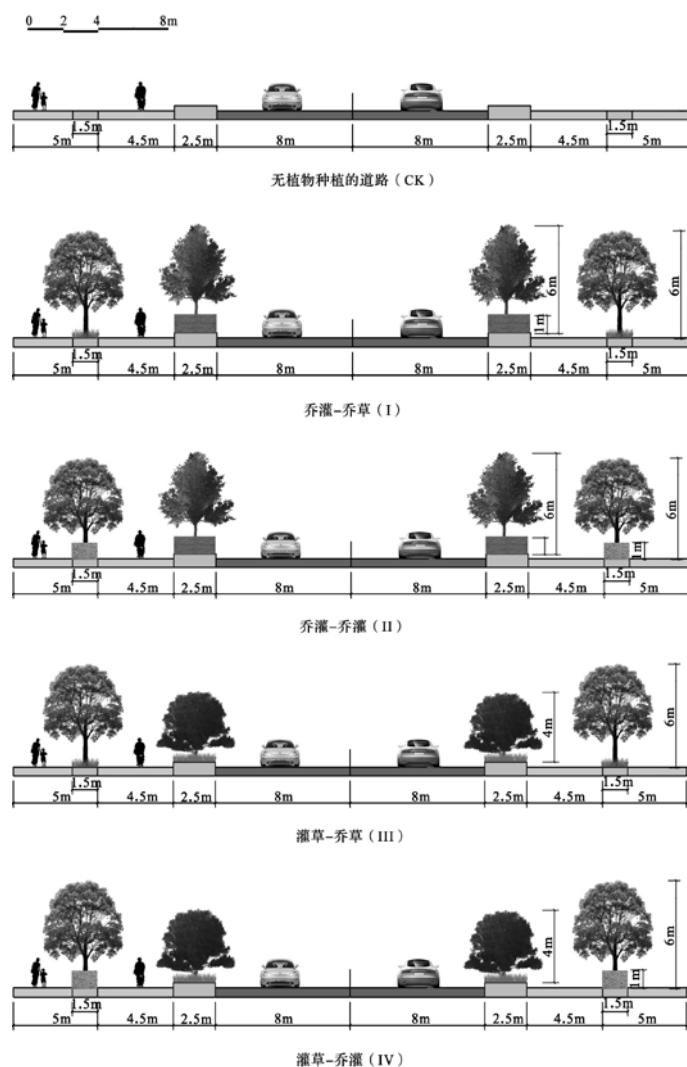


图 2 5 种模型的道路断面

Figure 2 Road sections of five models

=某一植物配植方式的 PM<sub>2.5</sub> 浓度 - CK 的 PM<sub>2.5</sub> 浓度, 得到剖面差值图和平面差值图。剖面图选取  $Y = 30$  m, 为 PM<sub>2.5</sub> 扩散较稳定区域; 平面图选取  $Z = 1.5$  m, 为行人呼吸高度。而非机动车道 ( $X = 42 \sim 45$  m) 和人行道 ( $X = 48 \sim 50$  m) 处 PM<sub>2.5</sub> 的浓度变化是本文的研究重点。

在各模型的平面图上, 从机动车道边缘  $Y = 3$  m 开始, 纵向每间隔 10 m 选取 1 个监测点, 共计 5 个; 在非机动车道处和人行道处分别选取对应监测点, 即纵向与机动车道监测点设置相同, 每种模型共计 15 个点, 计算各模型的 PM<sub>2.5</sub> 浓度平均消减率。消减率计算公式为:

$$P = \frac{(C_s - C_m)}{C_s} \times 100\%$$

式中,  $P$  为 PM<sub>2.5</sub> 浓度消减率,  $C_s$  是机动车道边缘的 PM<sub>2.5</sub> 浓度,  $C_m$  是不同模型中非机动车道处或人行道处的 PM<sub>2.5</sub> 浓度<sup>[23]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 实测 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化

人行道处实测 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化情况如图 3。由图 3 可知, 人行道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化总体呈现上午和下午较高, 中午低的趋势。PM<sub>2.5</sub> 浓度最大值 ( $157 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 出现在 11 月 23 日的 9:30, 最小值 ( $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 出现在 11 月 23 日的 13:30。9 月 12 日, PM<sub>2.5</sub> 浓度在 9:50 达到高峰值 ( $152 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 后持续下降, 12:40 降到低谷值 ( $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 之后呈平缓上升趋势, 16:00 时浓度升高至  $61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。10 月 22 日 10:10 - 12:45, PM<sub>2.5</sub> 浓度从高峰值 ( $148 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 下降至低谷值 ( $41 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); 12:45 - 14:30, 浓度有所上升; 14:30 - 16:00, 浓度又从  $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  降至  $46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。11 月 23 日, PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化与 9 月 12 日的相似。

#### 3.2 实地模型验证

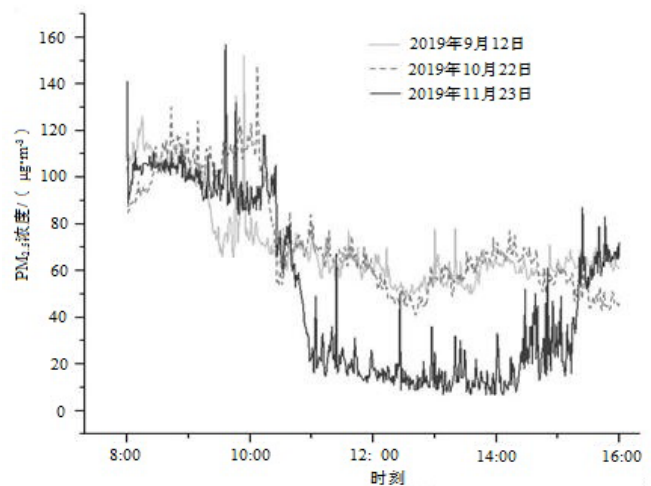


图 3 人行道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化

Figure 3 Daily variation of PM<sub>2.5</sub> concentration on the pavement

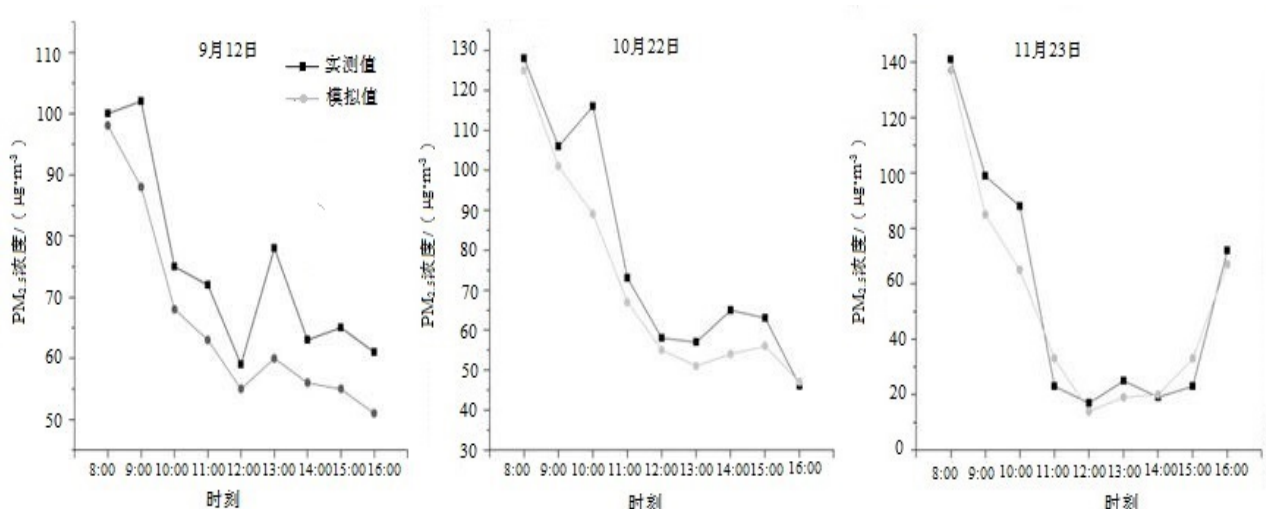


图 4 人行道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度实测值与模拟值

Figure 4 Measured and simulated PM<sub>2.5</sub> concentration on the pavement

图 4 为人行道处  $\text{PM}_{2.5}$  浓度实测值（以下称实测值）和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度模拟值（以下称模拟值）的对比图。由图 4 可知，模拟值与实测值的变化趋势基本相同，且模拟值均小于实测值。利用 Pearson 分析方法对实测值与模拟值进行相关性分析，2019 年 9 月 12 日、10 月 22 日和 11 月 23 日的相关系数分别为 0.955、0.964 和 0.976， $P < 0.01$ ，两者之间存在极显著正相关。通过趋势拟合可得到线性方程  $Y = 2.267\ 64 + 0.872\ 11X$  ( $R^2 = 0.944$ ) (图 5)，模拟值与实测值相关性较高，符合  $\text{PM}_{2.5}$  扩散规律，表明 ENVI-met 可用于  $\text{PM}_{2.5}$  浓度模拟。

### 3.3 ENVI-met 模型道路 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

#### 3.3.1 无植物种植的道路 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

对无植物种植的道路进行可视化分析，得到剖面图和平面图，分别表示  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在垂直方向和水平方向上的分布情况，如图 6。由图 6 可知，在剖面图上，

垂直方向  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最大值 ( $33.94\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 出现在  $Z = 1\ \text{m}$  的机动车道处；在平面图上，水平方向  $\text{PM}_{2.5}$  呈扇形扩散，下风向的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高于上风方向的， $\text{PM}_{2.5}$  浓度最大值 ( $11.19\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 出现在  $X = 38\ \text{m}$  的机动车道处。研究表明，CK 的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在污染源处（机动车道处）最高，且随风向向外扩散。

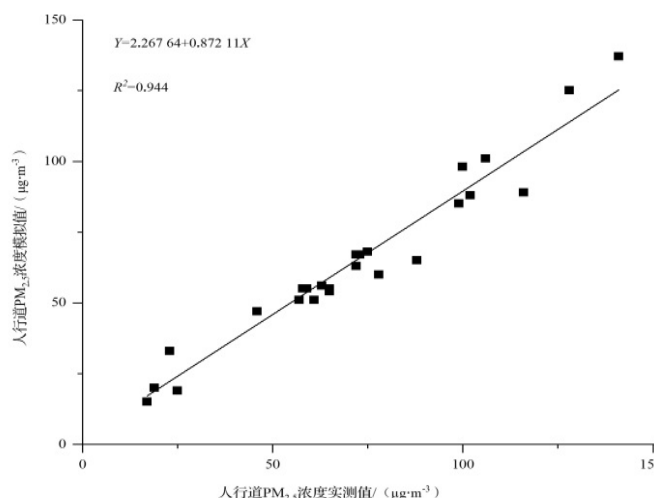


图 5  $\text{PM}_{2.5}$  浓度实测值与模拟值拟合方程图

Figure 5 Fitted equation for measured and simulated  $\text{PM}_{2.5}$  concentration

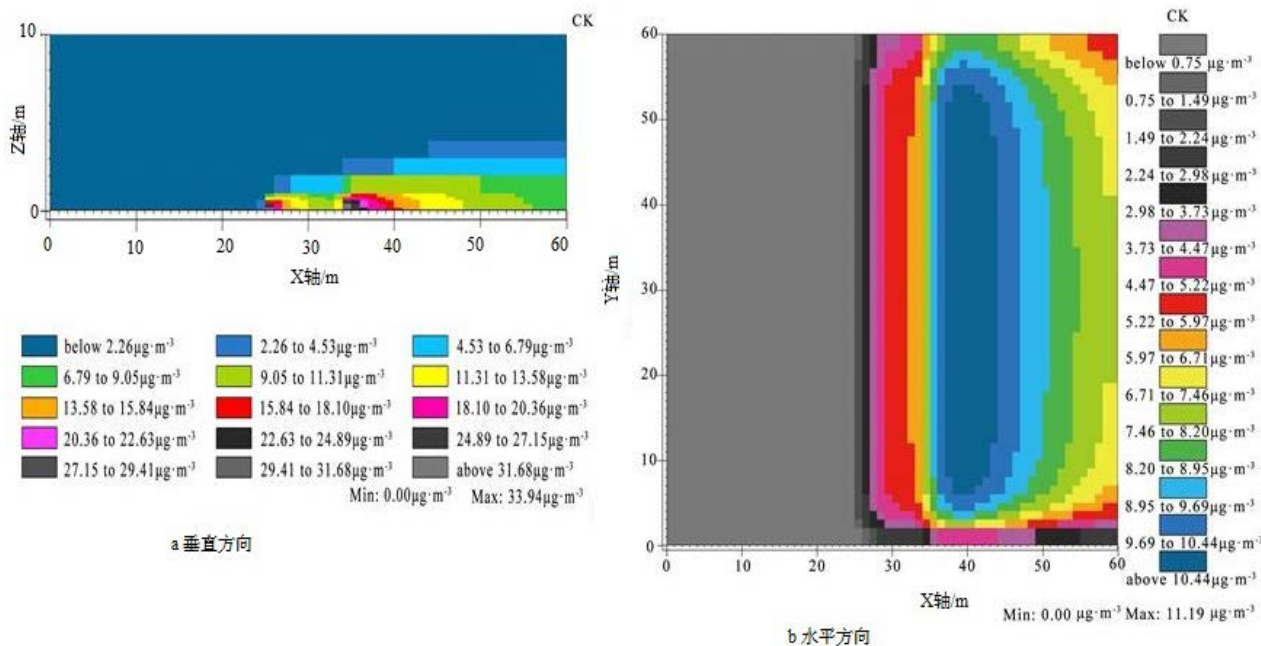


图 6 无植物种植道路内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度垂直方向和水平方向分布模拟

Figure 6 Vertical and horizontal simulation of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in the road without plants

#### 3.3.2 不同植物配植方式对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

(1) 垂直方向。将 4 种植物配植方式的道路分别与 CK 叠加，得到  $\text{PM}_{2.5}$  浓度剖面差值图，见图 7。由图 7 可知，在垂直方向上， $Z < 2\ \text{m}$  时，机动车道处的  $C$  值均为正值，其中，I 和 II 的  $C$  值较大，而 III 和 IV 的较小，表明 4 种植物配植方式的道路机动车道处均有  $\text{PM}_{2.5}$  聚集现象。此外，非机动车道和人行道处 I 和 II 的  $\text{PM}_{2.5}$  仅扩散至  $3\ \text{m}$  高度处，低于 III 和 IV 的，且人行道处 III 和 IV 在  $Z = 4 \sim 6\ \text{m}$  高度处均有  $\text{PM}_{2.5}$  聚集现象。



其原因是分车绿带为“灌木”时, 植物配植对 PM<sub>2.5</sub> 影响较小, 部分 PM<sub>2.5</sub> 会扩散至高空, 而行道树绿带的乔木会滞留这部分 PM<sub>2.5</sub>。

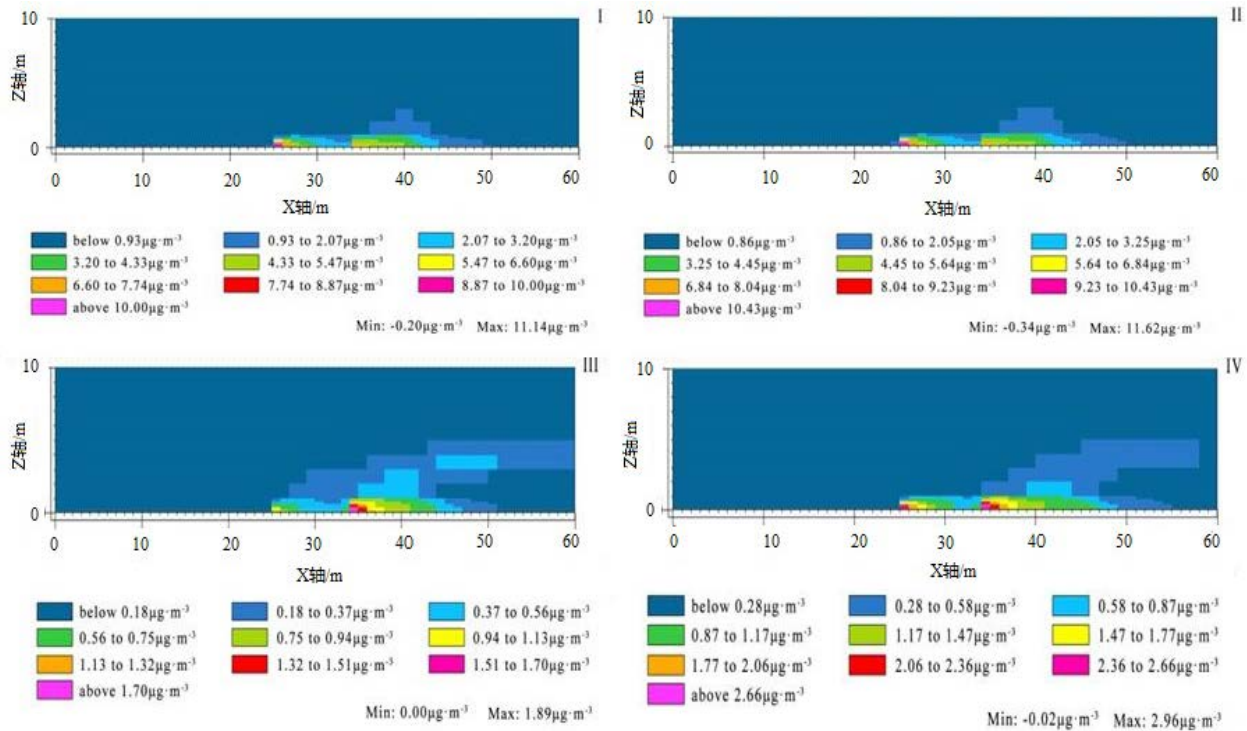


图 7 不同植物配植方式的 PM<sub>2.5</sub> 浓度剖面差值图

Figure 7 Section differential diagram of PM<sub>2.5</sub> concentration with different plant distribution

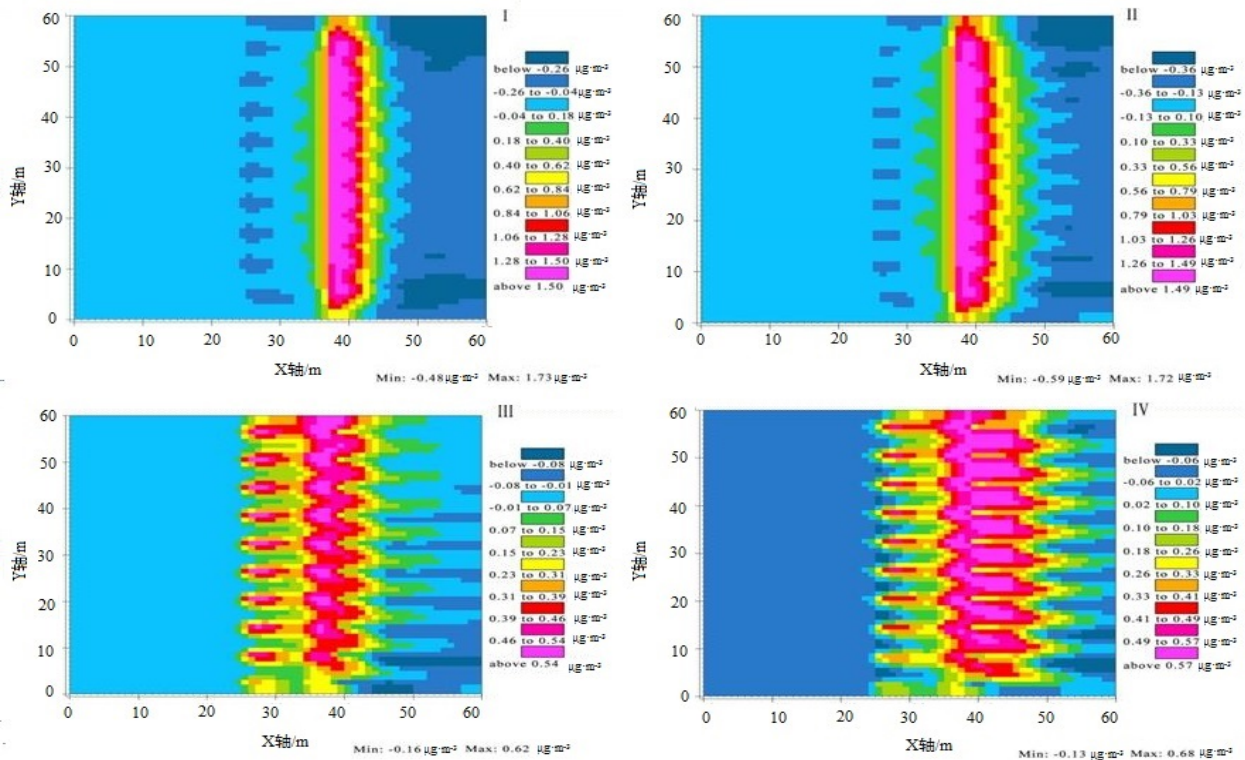


图 8 不同植物配植方式的 PM<sub>2.5</sub> 浓度平面差值图

Figure 8 Plane differential diagram of PM<sub>2.5</sub> concentration with different plant distribution

(2) 水平方向。图 8 为 4 种植物配植方式的道路分别与 CK 叠加后的  $PM_{2.5}$  浓度平面差值图, 其中,  $Y$  轴边界处出现边界失真, 故取  $Y=3 \sim 58\text{ m}$  进行研究。由图 8 可知, 在水平方向上, 非机动车道处 I 和 III 部分点的  $C$  值为负值, 且 III 的  $PM_{2.5}$  浓度下降区域略大于 I 的; 其余两组的非机动车道处的  $C$  值均为正值, 无浓度下降区域。对模拟结果进行方差分析, 结果见表 1。由表 1 可知, 非机动车道处  $C_1$  值为: II ( $0.648 \pm 0.086\ 4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>IV ( $0.499 \pm 0.086\ 2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>I ( $0.475 \pm 0.088\ 8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>III ( $0.195 \pm 0.089\ 0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 均为正值, 即相较于 CK, 水平方向上非机动车道处的  $PM_{2.5}$  浓度均呈上升趋势。I 和 IV 的  $C_1$  值之间不存在显著差异 ( $P \geq 0.05$ ), 其他配植方式间的  $C_1$  值间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

计算非机动车道处 4 种植物配植方式与 CK 的  $PM_{2.5}$  平均消减率, 结果见图 9。由图 9 可知, 5 种模型  $PM_{2.5}$  的平均消减率均为负值, 其大小排序为: CK (  $-11.19\%$  )>III (  $-12.92\%$  )>I (  $-14.21\%$  )>IV (  $-16.02\%$  )>II (  $-16.53\%$  )。植物对非机动车道处的  $PM_{2.5}$  有聚集作用。相较于 CK, II、IV、I 和 III 的  $PM_{2.5}$  消减率分别下降 5.34%、4.83%、3.02%和 1.73%。非机动车道处  $PM_{2.5}$  消减率下降, 这可能是其距离污染源较近, 且两侧有绿带阻挡,  $PM_{2.5}$  无法快速扩散, 导致浓度升高。

由图 8 可知, 在水平方向上, 人行道处 ( $X=48 \sim 50\text{ m}$ ) I 和 II 各点的  $C$  值大多为负值, 即相较于 CK, 其  $PM_{2.5}$  浓度普遍呈下降趋势; IV 相反, 各点的  $C$  值基本均为正值, 相较于 CK, 其  $PM_{2.5}$  浓度呈上升趋势; III 的  $PM_{2.5}$  浓度变化相对均衡。对人行道处模拟结果进行方差分析, 结果见表 2。由表 2 可知, 人行道处的  $C_2$  值为: IV ( $0.237 \pm 0.138\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>III ( $0.043 \pm 0.063\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>II (  $-0.103 \pm 0.143\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  )>I (  $-0.161 \pm 0.081\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  )。4 种植物配植方式的  $C_2$  值之间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

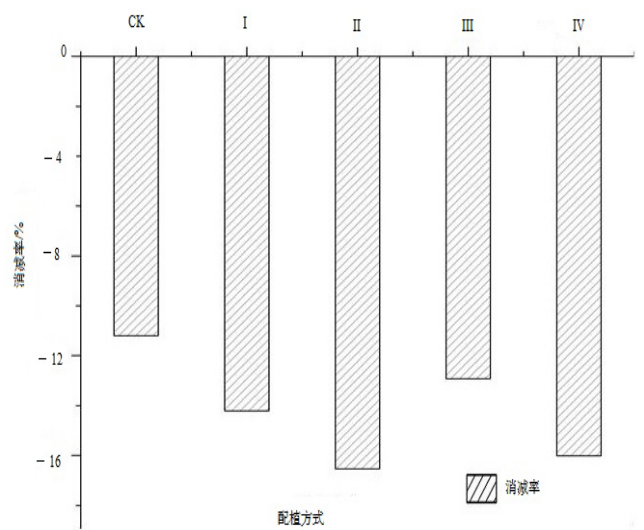


图 9 非机动车道处不同植物配植方式的  $PM_{2.5}$  浓度消减率  
Figure 9 Reduction rate of  $PM_{2.5}$  concentration with different plant distribution in bicycle lane

表 1 非机动车道处  $PM_{2.5}$  浓度方差分析与多重比较  
Table 1 ANOVA and multiple comparison of  $PM_{2.5}$  concentration in bicycle lane

配植方式	$C_1/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		显著性水平 0.05
	平均值	标准差	
I	0.475	0.088 8	b
II	0.648	0.086 4	a
III	0.195	0.089 0	c
IV	0.499	0.086 2	b

注: 同一列不同字母表示经 LSD 检验差异显著, 下同。

表 2 人行道处  $PM_{2.5}$  浓度方差分析与多重比较  
Table 2 ANOVA and multiple comparison of  $PM_{2.5}$  concentration on the pavement

配植方式	$C_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		显著性水平 0.05
	平均值	标准差	
I	-0.161	0.081	d
II	-0.103	0.143	c
III	0.043	0.063	b
IV	0.237	0.138	a

注: 同一列不同字母表示经 LSD 检验差异显著。

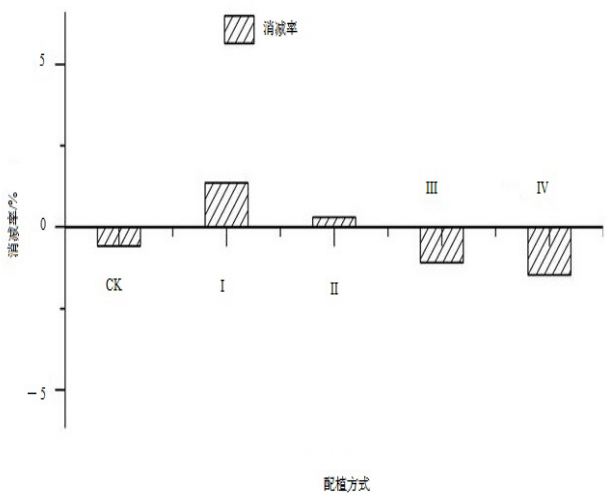


图 10 人行道处不同植物配植方式的  $PM_{2.5}$  浓度消减率  
Figure 10 Reduction rate of  $PM_{2.5}$  concentration with different plant distribution on the pavement

计算人行道处 4 种植物配植方式与 CK 的 PM<sub>2.5</sub> 平均消减率, 结果见图 10。由图 10 可知, 人行道处的 PM<sub>2.5</sub> 平均消减率大小排序为: I (1.36%) > II (0.29%) > CK (-0.58%) > III (-1.09%) > IV (-1.47%)。相较于 CK, I 和 II 的 PM<sub>2.5</sub> 消减率为正值, 即人行道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度有所下降, I 和 II 的消减率分别增加 1.94% 和 0.87%, 而 III 和 IV 的消减率分别减少 0.51% 和 0.89%。造成 III 和 IV 消减率减少的原因是分车绿带中“灌草”无法有效消减 PM<sub>2.5</sub>, 导致其人行道处浓度升高。

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

实测表明, 武肃街人行道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化表现为上午和下午较高、中午低的趋势, 这与刘浩栋等<sup>[24]</sup>、王成等<sup>[25]</sup>和郭建超等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。其主要原因是监测的前一天夜晚温度较低、湿度较大, PM<sub>2.5</sub> 不断沉降, 当日早晨空气湿度较大、逆温层变厚, 不利于 PM<sub>2.5</sub> 扩散, 而 8:00–9:30 又是上班早高峰, 导致 PM<sub>2.5</sub> 浓度达到高峰值; 9:30–13:30, 随着车流量的减少及气象因子的影响, 使得 PM<sub>2.5</sub> 浓度持续降低; 13:30 以后, PM<sub>2.5</sub> 浓度略有升高。10 月 22 日, 14:30–16:00, PM<sub>2.5</sub> 浓度有所下降, 这可能与当日风速和风向变化有关, 风速和风向变化是影响 PM<sub>2.5</sub> 扩散的重要因素之一<sup>[26-27]</sup>。

模拟研究表明, 机动车道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度在垂直方向上的分布情况与郭晓华等<sup>[23]</sup>的研究结果相同, 而水平方向上则不同; 相较于 CK, 在水平方向上, 非机动车道处 4 种配植方式的 PM<sub>2.5</sub> 消减率均下降, 这与其他学者<sup>[12,28-29]</sup>的研究结论基本一致。其原因可能是本研究模拟的区域尺度较小、道路绿带长度有限, 道路中 PM<sub>2.5</sub> 浓度会受到绿带的相互影响而升高, 也可能是植物已滞留的部分 PM<sub>2.5</sub> 会受到气流影响再次扩散, 形成二次扬尘(上层乔木分枝点高, 不易受低空气流影响; 下层草本低矮, 能够有效阻滞地面扬尘; 中层密植的灌木反而会受到气流影响使部分 PM<sub>2.5</sub> 再次扩散至空中)。此外, 杨貌等<sup>[30]</sup>和张灵芝等<sup>[31]</sup>研究认为, 乔草型植物配植方式在水平方向上吸附 PM<sub>2.5</sub> 效果好, 这与本研究结果一致。

### 4.2 结论

对杭州市临安区武肃街道绿带内不同植物配植方式对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响研究表明, 人行道处 PM<sub>2.5</sub> 浓度实测值与模拟值呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.944$ ), 表明 ENVI-met 可用于 PM<sub>2.5</sub> 浓度模拟。模拟研究显示, CK 中 PM<sub>2.5</sub> 浓度最高值出现在机动车道处, PM<sub>2.5</sub> 随风向向外扩散, 下风向的 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于上风向的。相较于 CK, 在垂直方向上, 非机动车道和人行道处 I 和 II 的 PM<sub>2.5</sub> 扩散高度均低于 III 和 IV 的, 且人行道处 III 和 IV 在 4~6 m 高度处均有 PM<sub>2.5</sub> 聚集现象; 在水平方向上, 非机动车道处 4 种配植方式的 PM<sub>2.5</sub> 消减率均下降, 降幅大小依次为 II (5.34%) > IV (4.83%) > I (3.02%) > III (1.73%), 人行道处 I 和 II 的消减率分别增加 1.94% 和 0.87%, 而 III 和 IV 的消减率分别减少 0.51% 和 0.89%。乔灌型分车绿带和乔草型行道树绿带是道路绿带的最佳植物配植方式。

### 参考文献:

- [1] LIU X G, LI J, QU Y, et al. Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China[J]. Atmosph Chem Phys, 2013, 13: 4501–4514.
- [2] LI J, WANG Z F, HUANG H L, et al. Assessing the effects of trans-boundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring over East China[J]. Tellus B: Chem Phys Meteorol, 2013, 65: 20052.
- [3] 汪鹏, 熊春, 吴育杰, 等. 杭州市 2017 年冬季一次重灰霾过程中 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征、来源及成因分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46 (3): 345–353.
- [4] 吴琳, 沈建东, 冯银厂, 等. 杭州市灰霾与非灰霾日不同粒径大气颗粒物来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27 (4): 373–381.
- [5] 贾彦, 吴超, 董春芳, 等. 7 种绿化植物滞尘的微观测定[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43 (11): 4547–4553.
- [6] 陈玮, 何兴元, 张粤, 等. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (12): 2113–2116.



- [7] KULSHRESHTHA K, RAI A, MOHANTY C S, et al. Particulate pollution mitigating ability of some plant species[J]. *Int J Environ Res*, 2009, 3 ( 1 ) : 137 – 142.
- [8] 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19 ( 6 ) : 1465 – 1470.
- [9] 邵锋, 钱思思, 孙丰宾, 等. 杭州市区春季绿地对  $PM_{2.5}$  消减作用的研究[J]. *风景园林*, 2017, 24 ( 5 ) : 79 – 86.
- [10] 于丽胖, 鄯光发, 王成. 夏季城市两种道路绿化类型空气颗粒物浓度的变化对比研究[J]. *中国城市林业*, 2009, 7 ( 3 ) : 55 – 57.
- [11] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 等. 北京市不同主干道绿地群落对大气  $PM_{2.5}$  浓度消减作用的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23 ( 4 ) : 615 – 621.
- [12] VOS P E J, MAIHEU B, VANKERKOM J, et al. Improving local air quality in cities: to tree or not to tree?[J]. *Environ Pollut*, 2013, 183: 113 – 122.
- [13] HAGLER G S W, LIN M Y, KHLYSTOV A, et al. Field investigation of roadside vegetative and structural barrier impact on near-road ultrafine particle concentrations under a variety of wind conditions[J]. *Sci Tot Environ*, 2012, 419: 7 – 15.
- [14] LIU Z X, ZHENG S L, ZHAO L H. Evaluation of the ENVI-met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area[J]. *Atmosphere*, 2018, 9 ( 5 ) : 198.
- [15] 顾康康, 钱兆, 方云皓, 等. 基于 ENVI-met 的城市道路绿地植物配置对  $PM_{2.5}$  的影响研究[J]. *生态学报*, 2020, 40 ( 13 ) : 4340 – 4350.
- [16] 吴思佳, 董丽, 贾培义, 等. 基于计算流体力学数值模拟的城市绿地温湿效应及室外热舒适评价研究进展[J]. *风景园林*, 2019, 26 ( 12 ) : 79 – 84.
- [17] 王婷, 陈小芮, 章家恩, 等. 不同绿化改造方案对小区微气候环境影响的 ENVI-met 模拟研究[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40 ( 4 ) : 61 – 68.
- [18] YIN S, LANG W, XIAO Y Q. The synergistic effect of street canyons and neighbourhood layout design on pedestrian-level thermal comfort in hot-humid area of China[J]. *Sustain Cit Soc*, 2019, 49: 101571.
- [19] 翁佳烽, 林满, 王宝民, 等. 不同气象条件小区通风与污染物扩散模拟[J]. *中山大学学报 ( 自然科学版 )*, 2019, 58 ( 1 ) : 30 – 38.
- [20] 张伟. 居住小区绿地布局对微气候影响的模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [21] CHENG Y, LEE S C, HO K F, et al. On-road particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) and gaseous emissions in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong[J]. *Atmosph Environ*, 2006, 40: 4235 – 4245.
- [22] 王佳, 吕春东, 牛利伟, 等. 道路植被结构对大气可吸入颗粒物扩散影响的模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 ( 20 ) : 225 – 232.
- [23] 郭晓华, 戴菲, 殷利华. 基于 ENVI-met 的道路绿带规划设计对  $PM_{2.5}$  消减作用的模拟研究[J]. *风景园林*, 2018, 25 ( 12 ) : 75 – 80.
- [24] 刘浩栋, 陈亚静, 李清殿, 等. 城市道路林对细颗粒物( $PM_{2.5}$ )的阻滞作用解析[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37 ( 3 ) : 397 – 406.
- [25] 王成, 郭二果, 鄯光发. 北京西山典型城市森林内  $PM_{2.5}$  动态变化规律[J]. *生态学报*, 2014, 34 ( 19 ) : 5650 – 5658.
- [26] 郭建超, 齐实, 申云康, 等. 2 种城市林地  $PM_{2.5}$  质量浓度变化及其与气象因子的关系[J]. *水土保持学报*, 2014, 28 ( 6 ) : 88 – 93, 100.
- [27] ABHIJITH K V, KUMAR P. Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions[J]. *Atmosph Environ*, 2019, 201: 132 – 147.
- [28] WANIA A, BRUSE M, BLOND N et al. Analyzing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations[J]. *J Environ Manag*, 2012, 94: 91 – 101.
- [29] JIN X M, YANG L J, DU X Z, et al. Transport characteristics of  $PM_{2.5}$  inside urban street canyons: the effects of trees and vehicles[J]. *Build Simul*, 2017, 10: 337 – 350.
- [30] 杨貌, 张志强, 陈立欣, 等. 春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用[J]. *生态学报*, 2016, 36 ( 7 ) : 2076 – 2083.
- [31] 张灵芝, 秦华. 城市道路行道树绿带对  $PM_{2.5}$  的滞尘效应及其变化分析[J]. *中国园林*, 2015, 31 ( 5 ) : 106 – 110.