

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.018

基于响应面法研究植被对城市街谷内 汽车尾气暴露的影响

逯永行¹, 刘晓平¹, 许文文¹, 徐世鹏²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海 519070)

摘要:合理的城市植被设计已被证明能改善街道峡谷内的空气状况,但目前缺乏对带有城市植被的街道峡谷内多个因素影响程度的系统研究。文章以减少街道峡谷内的行人以及道路沿线居民的污染暴露为目标,将响应面方法(response surface methodology, RSM)与计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)结合起来,研究不同因素间的交互影响,并给出街道峡谷高宽比 H/W 、风向角 θ 和绿化带叶面积密度 D_{LA} 对街道峡谷内汽车尾气扩散的影响程度排序。通过对建立的个人吸入分数(personal intake fraction, P-IF)的二次回归预测模型进行方差分析并评估性能,表明回归预测模型可以很好地预测各因素与目标之间的关系,最小 P-IF 的最佳条件是 $H/W=1.50$ 、 $D_{LA}=0.50\text{ m}^{-1}$ 、 $\theta=0^\circ$ 。该研究结果可为城市规划者和政策制定者制定城市环境控制策略、减少道路沿线人类的暴露提供依据。

关键词:街道峡谷;道路绿带;汽车尾气;响应面方法;暴露

中图分类号:X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)06-0842-08

Investigating the effects of vegetation on vehicular exhaust exposure within urban street canyons using response surface methodology

LU Yonghang¹, LIU Xiaoping¹, XU Wenwen¹, XU Shipeng²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. GREE Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Zhuhai 519070, China)

Abstract: Reasonable urban vegetation design has been proven to improve air quality within street canyons. However, current research lacks a systematic understanding of the extent to which multiple factors affect street canyon environments with urban vegetation. This study combines response surface methodology(RSM) with computational fluid dynamics(CFD) with the goal of reducing pollution exposure for pedestrians within the canyon and residents along the roadway. It investigates the interactive effects of different factors and ranks the influence of canyon aspect ratio(H/W), wind direction(θ), and leaf area density(D_{LA}) of green belts on vehicular exhaust dispersion within street canyons. Performance evaluation of the quadratic regression predictive model of personal intake fraction(P-IF) through analysis of variance indicates that the regression predictive model can effectively predict the relationship between various factors and objectives. The optimal conditions for minimizing P-IF are found to be an H/W of 1.50, a D_{LA} of 0.50 m^{-1} , and a θ of 0° . The study results can inform urban planners and policymakers in formulating urban environmental control strategies to reduce human exposure along roadways.

Key words: street canyon; roadside green belt; vehicular exhaust; response surface methodology(RSM); exposure

收稿日期:2024-03-07;修回日期:2024-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274184)

作者简介:逯永行(1999—),男,山东广饶人,合肥工业大学硕士生;

刘晓平(1978—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: liuxp@hfut.edu.cn.

0 引言

伴随着城市化进程的加快,车辆交通量大幅增加,从而加剧了空气质量问题,交通排放已成为城市空气污染的主要原因^[1]。而街道峡谷作为人们户外活动的重要场所,其独特的建筑结构具有复杂的风模式,容易造成人员暴露,对城市居民的健康产生不利的影响。合理的城市规划(如选择树种、树篱和绿色基础设施)被证明可以吸收街道峡谷内的空气污染物^[2]。因此,研究城市植被对交通污染物的扩散影响是重要的和必要的。

城市植被对街道峡谷环境的影响在过去十几年中一直是一个活跃的研究领域,已有大量研究通过室外测量^[3]、风洞实验^[4-5]和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)^[6]模拟来研究树木的特性。一方面,植被在街道水平和屋顶上方的自由流动形成屏障^[7],阻碍尾气 and 新鲜空气的混合,通风减少导致污染物不能及时排出峡谷,造成浓度增加,即植被的空气动力学效应;另一方面,树木通过颗粒物沉积在叶片来过滤空气中的颗粒物^[8],即植被的沉积效应。但目前研究缺乏对植物屏障影响路边污染分布系统认识,无法寻找最优化的策略来最大程度地降低道路污染物对行人的危害。

本文将 CFD 模拟和响应面分析方法(response surface methodology, RSM)相结合,研究峡谷高宽比、风向角及绿化带叶面积密度与人员暴露之间的关系,以确定峡谷中绿化布置的最佳方案。基于试验设计分析和中心复合设计(central composite design, CCD)方法,得到个人吸入分数(personal intake fraction, P_{IF})的响应模型。拟合的 RSM 模型通过方差分析进行统计检验,并对 RSM 模型的准确性进行验证。

1 数值模型描述

1.1 几何模型

本研究基于德国 Karlsruhe 大学的大气边界层风洞进行的风洞实验中采用的 1:150 比例模型,构建了 CFD 模拟中使用的带有植被的街道峡谷配置。

该模型是一个孤立的街道峡谷,由 2 个平行排列的建筑物构成。建筑物的宽度为 12 cm,长度 $L=120$ cm。街道峡谷宽度 $W=24$ cm,3 种不同的街道峡谷高度为 12、24、36 cm(全尺度下 18、36、54 m)代表街道峡谷宽度高度比 H/W 为

0.50、1.00、1.50。本文将树模型简化为六面体,树模型沿街道两侧放置。通过在街道表面释放位置指定恒定通量边界条件来模拟交通排放。在峡谷区域设置 4 条沿街道水平的道路面源^[9],采用惰性气体 CO 来充当道路释放污染物,每个面源的释放速率为 0.01 kg/s。

道路截面形式及计算域示意图如图 1 所示。根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)^[10],道路设计标准根据特定道路的指定速度规定了车道宽度。考虑到现实街道峡谷中大多数机动车道为双向四车道,本文中设置单条机动车道与非机动车道宽度均为 3.5 m,4 条机动车道总宽度为 14 m。在文献[11]中,灌木与乔木结合的方式被证明对减少峡谷内污染物浓度的效果更明显。按照《城市道路绿化规划与设计规范》(CJJ 75—97)^[12]的规定,本文设置分车绿带的灌木宽度为 2.5 m,行道树绿带的灌木宽度设置为 1.5 m,高度为 0.9 m,乔木树冠直径为 5 m,树冠底部距离地面 4 m,高度为 4~9 m,并满足人行道最小宽度为 2.0 m,本设计在道路绿化带设计中符合要求。

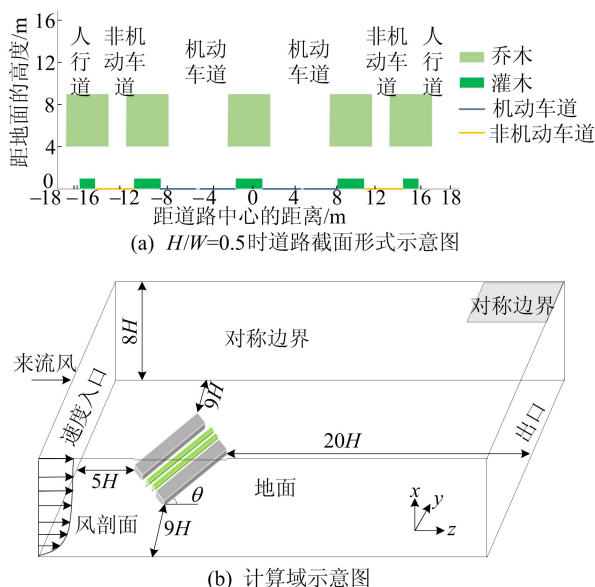


图1 道路截面形式及计算域示意图

CFD 模拟的计算域进口边界与迎风面建筑物的距离为 $5H$,出流边界与顺风面建筑物的距离为 $20H$,侧边界与建筑物的距离为 $9H$,计算域的高度为 $8H$ 。街道峡谷内的区域由最小的单元组成,具有 $\delta_x \times \delta_y \times \delta_z$ 为 $0.048H \times 0.083H \times 0.048H$ 的均匀尺寸,街道峡谷外的区域拉伸比低于 1.05。网格总数约为 270×10^4 ,已经确保进一

步增加网格数不会对结果产生明显改善。

1.2 边界条件

边界条件根据大气边界层风洞实验^[13]设置。入口边界遵循速度的幂律分布,具体为:

$$U(z) = U_H \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (1)$$

入口处垂直剖面的湍流动能 k 及耗散率 ϵ 为:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (3)$$

其中: $U(z)$ 为高度 z 处的平均速度; $U_H=4.70$ m/s 为建筑高度 H 处的平均速度; $\alpha=0.30$ 为平均速度剖面指数; $u_*=0.52$ m/s 为摩擦速度; δ 为边界层深度; $\kappa=0.4$ 为冯卡门常数; $C_\mu=0.09$ 为湍流模型中定义涡流黏度的系数。

出口平面采用自由出流条件,出口平面处法线方向上所有通量为 0。计算域顶部和两侧采用对称边界条件。在建筑物表面采用无滑移壁面。对于地面边界,采用表面粗糙度为 $0.0275H$ 的完全粗糙度函数。

采用 ANSYS Fluent 求解湍流流场,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,采用二阶迎风格式对质量、动量、湍动能及湍流耗散率的控制方程进行空间离散,采用默认的松弛因子进行计算。对于所有变量的残差,收敛残差设置为 10^{-7} 。此外,建筑物表面和地面的第 1 个近壁网格的 y^+ 平均为 32 以下,其处于对数律层 $30 < y^+ < 300$ 。

1.3 树冠模型

树冠模型是评价树木对城市室外微气候最常用的模型之一。用于支撑树冠的树干被忽略,树冠被认为是可渗透气流的多孔物体。在大多数关于树木影响的 CFD 研究中,通过将动量损失 S_U 作为汇项添加到 RANS 方程中的动量方程中来模拟空气动力学效应。假设形状阻力比黏性阻力大得多,通过将压力损失系数添加到植被区以说明由植被引起的惯性阻力。树冠的动量汇项建模为:

$$S_U = -1/(2\rho U u_i) \quad (4)$$

其中: U 为当地平均风速; u_i 为 i 个方向的风速分量; λ 为压力损失系数, $\lambda=2C_D D_{LA}$, D_{LA} 为叶面积密度,即单位植被冠层体积的单面叶面积总和, C_D 为无量纲阻力系数。

在上述模型中,树冠的空气动力学效应由压力损失系数 u_i 定义,取决于 C_D 和 D_{LA} 这 2 个参数,这 2 个参数与植被种类有关。对于行道树而言, D_{LA} 的范围^[14] 为 $0.2 \sim 2.0$ m⁻¹,文献^[15]取 0.5 、 1.0 、 2.0 m⁻¹ 这 3 个水平的 D_{LA} 值来讨论,因此本文选择 D_{LA} 值为 $0.5 \sim 2.0$ m⁻¹ 来表征行道树密度的影响。灌木的密度通常大于树木,因此取灌木的 D_{LA} 为^[15] 4.0 m⁻¹。文献^[16]调查了大多数植被 C_D 的范围为 $0.1 \sim 0.3$,本文设定 $C_D=0.2$ 以反映平均值。因此全尺度下行道树 λ 为 $0.2 \sim 0.8$ m⁻¹,灌木 $\lambda=1.6$ m⁻¹。

1.4 个人吸入分数

为了更直观地分析道路污染物的影响,本文采用个人吸入分数量化人群对车辆污染物的暴露影响。吸入分数表示被人体吸入的污染物占总释放量的比值,是指特定人群从排放 1 kg 的污染物中吸入 1 mg。

特定人群的吸入分数 IF 被定义为:

$$F_{IF} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_i B_{r_{i,j}} \Delta t_{i,j} C_{e_j} / m \quad (5)$$

其中: N 为不同年龄组的种群数量; M 为不同微环境的数量; P_i 为第 i 个人群中暴露的总人数; $B_{r_{i,j}}$ 为第 j 个微环境中第 i 个群体组的平均容积呼吸率; $\Delta t_{i,j}$ 为在第 j 个微环境中第 i 个群体组所停留的时间; C_{e_j} 为微环境 j 中的污染物质量浓度; m 为考虑时间内的总排放量。

为消除种群密度和规模的影响,文献^[17]定义了 P_{-IF} ,表示分布在街道峡谷两侧的所有房间中每个人的平均 IF。 P_{-IF} 的定义为:

$$P_{P-IF} = F_{IF} / \sum_{j=1}^M P_i \quad (6)$$

各年龄组的呼吸率 B_r 、时间活动模式见表 1 所列。

表 1 各年龄组的呼吸率、时间活动模式

组别	家中室内($j=1$)		其他室内位置($j=2$)		车辆附近($j=3$)		其他室外位置($j=4$)	
	B_r / (m ³ /d)	时间占比/%	B_r / (m ³ /d)	时间占比/%	B_r / (m ³ /d)	时间占比/%	B_r / (m ³ /d)	时间占比/%
儿童	12.5	61.7	14.0	28.9	14.0	5.5	18.7	3.9
成年人	13.8	59.5	15.5	28.7	15.5	7.1	20.5	4.7
老年人	13.1	71.5	14.8	16.7	14.8	3.2	19.5	8.6

1.5 模型验证

在 CODASC 风洞实验中, SF₆ 是从嵌入街道的 4 个线源释放, 以模拟交通废气的释放, 线源在每侧超过街道峡谷 10%。近壁浓度是在风洞中距离建筑物墙壁几毫米的地方测量的, 对应全尺度下 0.75 m。归一化浓度计算公式为:

$$C^+ = \frac{C_{\text{SF}_6} u_H H}{Q_T} \times L \quad (7)$$

其中: C_{SF_6} 为测量的混合物中 SF₆ 的体积分数; Q_T 为 SF₆ 的源强度; L 为线源长度。

在风洞实验中, 通过使用具有不同孔隙度的多孔介质模拟树冠。在强制对流条件下, 压力损失系数 λ 计算公式为:

$$\lambda = \frac{\Delta p_{\text{stat}}}{p_{\text{dyn}} d} = \frac{p_1 - p_2}{(1/2) \rho u^2 d} \quad (8)$$

其中: Δp_{stat} 为强制对流条件下多孔障碍物迎风面 p_1 与背风面 p_2 的静压差; $p_{\text{dyn}} d$ 为动压; u 为平均流速; d 为多孔障碍物沿流向的厚度。松散 $P_{\text{vol}}=97.5\%$ 和密集 $P_{\text{vol}}=96.0\%$ 填充模型树冠的压力损失系数分别为 $\lambda=80 \text{ m}^{-1}$ 和 $\lambda=200 \text{ m}^{-1}$, 表示全尺寸下 $\lambda=0.53 \text{ m}^{-1}$ 和 $\lambda=1.33 \text{ m}^{-1}$ 。

风洞实验及数值模拟验证对比如图 2 所示。图 2 中, D 为距地面的距离。由图 2 可知, CFD 结果与风洞实验测量数据吻合较好。因此, 在这项研究中使用的 CFD 模型可以很可靠地预测街道峡谷内的气流流动和污染物扩散。

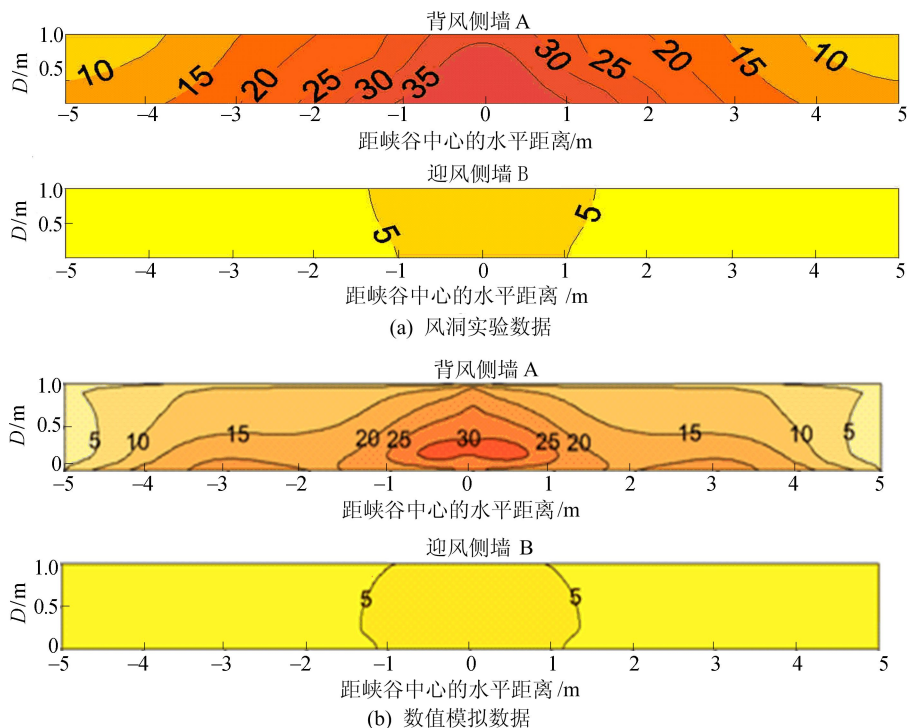


图2 风洞实验及数值模拟验证对比

2 结果与讨论

2.1 响应面试验设计

响应面方法是一种建立独立设计变量和响应结果近似值的方法, 已被广泛应用于计算机实验^[18]、化学和生物化学等领域, 其能通过相对较少的试验次数提取出影响因变量因素的有意义信息, 并将复杂的多元关系转化为直观易懂的二维或三维图形。

本文选择 3 个可量化的设计变量 A 、 B 、 C , 分别为峡谷高宽比 H/W 、叶面积密度 D_{LA} 和风向角 θ , 采用个人吸入分数 P_{IF} 作为设计目标 y_1 , 则

实际响应值取决于设计变量的函数关系可表示为 $\hat{y}=f(x_1, x_2, x_3)$ 。本文将 3 种影响因素分别划分成 3 个水平值, 低、中、高水平分别用编码 -1、0、1 表示, 设计试验的因素水平见表 2 所列。利用 Design Expert13.0 CCD 方法进行试验研究, 具体见表 3 所列。

表2 试验因素及水平设计

编码	A	B/m^{-1}	$C/(^\circ)$
-1	0.50	0.50	0
0	1.00	1.25	45.00
1	1.50	2.00	90.00

表 3 基于 CCD 设计方法的数据

序号	A	B/m ⁻¹	C/(°)	y ₁
1	0.50	0.50	0	129.962
2	1.50	0.50	0	89.537
3	0.50	2.00	0	150.181
4	1.50	2.00	0	115.636
5	0.50	0.50	90.00	387.227
6	1.50	0.50	90.00	259.245
7	0.50	2.00	90.00	402.744
8	1.50	2.00	90.00	292.512
9	0.29	1.25	45.00	251.460
10	1.71	1.25	45.00	108.471
11	1.00	0.19	45.00	129.382
12	1.00	2.31	45.00	190.135
13	1.00	1.25	-18.64	155.694
14	1.00	1.25	108.64	289.039
15	1.00	1.25	45.00	176.225

2.2 回归预测模型分析

本研究利用表 3 中的设计数据,为个人吸入分数建立了二阶多项式方程,然后利用 Design Expert13.0 软件对得到的回归预测模型进行详细分析,得到关于个人吸入分数的响应曲面拟合方程,即

$$y_1 = 152.60 - 42.95A + 15.09B + 87.09C + 2.95AB - 20.41AC + 0.3083BC + 19.59A^2 + 9.49B^2 + 40.80C^2 \quad (9)$$

P-IF 模拟值和预测值的对比如图 3 所示。

从图 3 可以看出,各点均匀分布在 45°线附近,表明模型的模拟值与预测值之间具有良好的相关性。

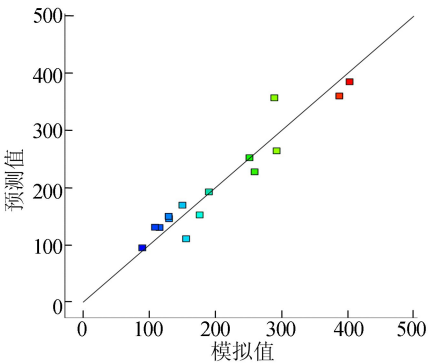


图 3 P-IF 的模拟值和预测值对比

应用于 P-IF 的二次方模型的方差分析结果见表 4 所列。模型的 *F* 值为 6.03,表明模型具有显著性。

由表 4 可知,在本回归模型下,因子 *A*(高宽比)、*C*(风向角)被认为是显著的模型项,由于其相应的 *P* 值低于 0.050 0,因子 *B*(叶面积密度)不显著。这表明街道峡谷内的高宽比和风向角对 P-IF 有非常显著的影响。模型的 *R*² 为 0.915 6,接近于 1,表明模型拟合效果较好,可用于接下来的模型分析。

表 4 二次方模型的方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	1.286×10 ⁵	9	14 285.28	6.03	0.031 0	显著
<i>A</i>	22 136.12	1	22 136.12	9.34	0.028 2	显著
<i>B</i>	2 730.56	1	2 730.56	1.15	0.332 1	不显著
<i>C</i>	91 004.60	1	91 004.60	38.40	0.001 6	显著
<i>AB</i>	69.80	1	69.80	0.029 5	0.870 5	不显著
<i>AC</i>	3 331.08	1	3 331.08	1.41	0.289 1	不显著
<i>BC</i>	0.760 1	1	0.760 1	0.000 3	0.986 4	不显著
<i>A</i> ²	2 047.38	1	2 047.38	0.863 9	0.395 3	不显著
<i>B</i> ²	480.01	1	480.01	0.202 5	0.671 5	不显著
<i>C</i> ²	8 877.56	1	8 877.56	3.75	0.110 7	不显著
残差	11 849.83	5	2 369.97			
总离差	1.404×10 ⁵	14				

P-IF 的二阶多项式方程系数见表 5 所列。根据回归模型系数的正负值和大小可判断影响 P-IF 的因素从高到低依次为风向角(正效应)、高宽比(负效应)、叶面积密度(正效应)。对于风向角而言,随着角度的增大,来流风进入峡谷的空气量逐渐减少,依靠空气带走峡谷内污染物的量

也减少,更多的污染物沉积在建筑表面,导致个人吸入分数升高。

对于高宽比而言,随着建筑高度逐渐升高,峡谷内涡旋不易使污染物到达高度较高的上层用户,使建筑表面的平均污染物质量浓度显著减少。*D*_{LA} 的增大降低了空气速度,压力损失系数增大

并增强了植被的空气动力学效应,使得停留在建筑背风面的污染物质量浓度显著提高,综合考虑

建筑迎风面和背风面的污染物质量浓度也是提高的,这在前人的研究中也有提到。

表5 P-IF的二阶多项式方程系数

模型项	拟合系数	自由度	标准误差	95%置信区间下限	95%置信区间上限	方差膨胀因子
截距	152.60	1	39.74	50.44	254.75	
A	-42.95	1	14.05	-79.08	-6.82	1.00
B	15.09	1	14.05	-21.04	51.21	1.00
C	87.09	1	14.05	50.96	123.22	1.00
AB	2.95	1	17.21	-41.29	47.20	1.00
AC	-20.41	1	17.21	-64.65	23.84	1.00
BC	0.308 3	1	17.21	-43.94	44.55	1.00
A ²	19.59	1	21.08	-34.60	73.78	1.20
B ²	9.49	1	21.08	-44.70	63.68	1.20
C ²	40.80	1	21.08	-13.39	94.99	1.20

2.3 响应面模型分析

自变量的交互作用对P-IF的影响如图4所示。从图4a可以看出,P-IF随着 H/W 的增大而减小,在 H/W 较低时,改变 D_{LA} 的值对P-IF的影响较大,在图4b中体现为斜率的大小,而无论 D_{LA} 值的大小,改变 H/W 对P-IF的影响程度相似。从图4c可以看出,P-IF随着 H/W 的增大而减小; θ 较小时, H/W 的增大对P-IF的影响幅度相对较小,随着 θ 的增加, H/W 的增大对P-

IF的影响幅度越来越大,从曲面陡峭程度可以看出;同样,在 H/W 较小时,改变 θ 的值对P-IF的影响程度较大。从图4d可以看出,P-IF的最大值出现在 θ 从 $75^\circ \sim 90^\circ$, H/W 从 $0.50 \sim 0.90$ 的范围内。

从图4e可以看出,无论 θ 值如何变化,P-IF随着 D_{LA} 值的增大而增大,在 D_{LA} 值较低时,改变 θ 对P-IF的影响较大,在图4f体现为当 D_{LA} 值较小时,等值线更密。

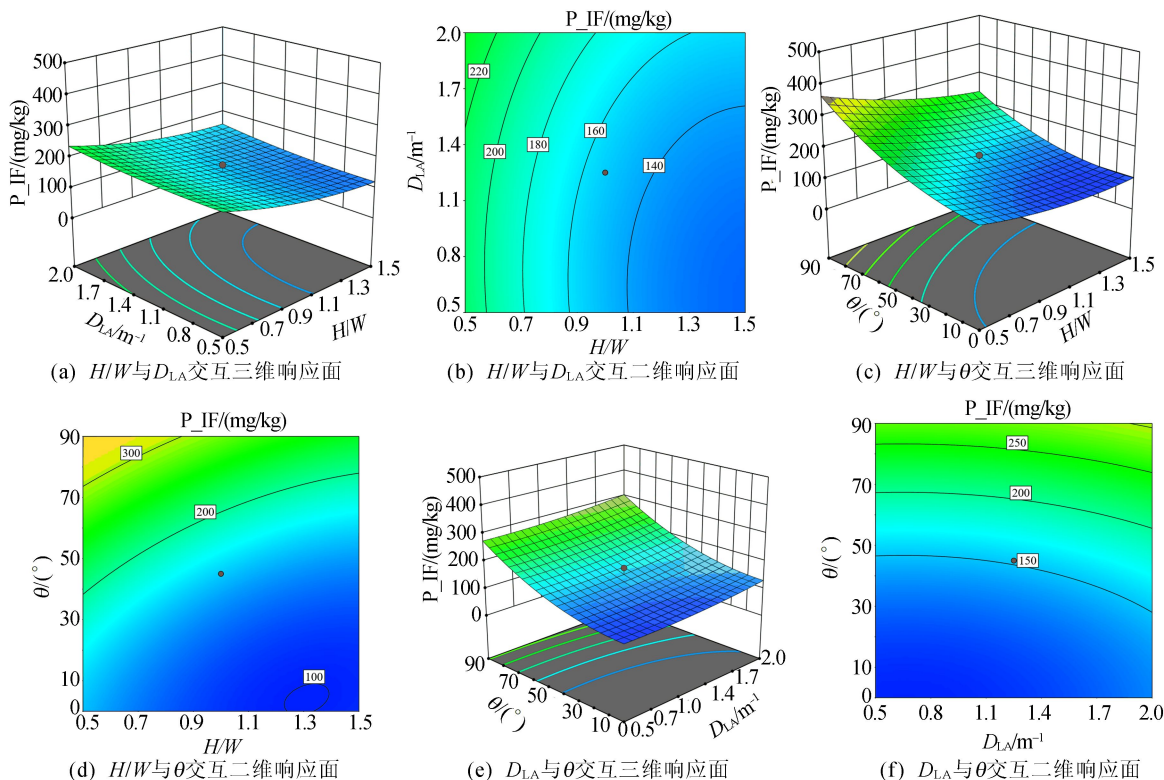


图4 自变量对P-IF的交互作用的三维响应面图和二维等值线图

2.4 响应面模型验证

在进行响应面模型验证之前,首先要证明本研究所选定的变量之间不存在强相关性,这是利用响应面设计方法进行分析的前提。为此,本文使用斯皮尔曼秩相关法进行相关分析。

斯皮尔曼秩相关法是建立在统计数据等级之上的一项分析方法,反映两变量间变化趋势的方向以及程度,其值范围为 -1 到 $+1$ 。数值为 0 表示两变量不相关,正值表示正相关,负值表示负相关,值越大表示相关性越强。3个设计变量与响应值之间的相关性通过回归预测模型进行分析。 $P-IF$ 、 H/W 、 D_{LA} 与 θ 相关系数分别为 -0.397 、 0.139 、 0.805 。 H/W 与 $P-IF$ 之间的相关性为负,说明增大高宽比会导致 $P-IF$ 的减小,而 D_{LA} 、 θ 与 $P-IF$ 之间的相关性均为正,说明 D_{LA} 和 θ 的增加会导致 $P-IF$ 增大。在3个设计变量中, θ 与 $P-IF$ 的绝对相关值最大,表明风向角是对 $P-IF$ 影响最大的设计变量,峡谷高宽比是第二大影响设计因素,叶面积密度是影响最小的设计因素。此外,从两两设计变量之间的相关性可看出,这些变量之间的绝对值在 0 附近,证明了本研究所选定的变量之间不存在强相关性。

为检查RSM模型的准确性,本节提供了额外的验证。使用额外的4个方案来进行测试,以满足总算例的30%($15 \times 30\%$)作为测试数据集的要求^[19]。所选用的测试数据集的设计点见表6所列,这些设计点全部取在了设计空间中独立于轴向点、阶乘点和中心点的位置。预测值和测试值的 R^2 为 0.93 ,表明RSM模型与CFD模拟结果显现出很好的一致性。

表6 测试数据集设计点

序号	A	B/m^{-1}	$C/(^{\circ})$
1	0.75	1.00	15
2	0.75	1.50	30
3	1.25	0.75	60
4	1.25	1.75	75

2.5 响应面模型优化

使用Design Expert13.0软件进行数值优化,考虑3个自变量和1个响应值。权重反映了赋予目标的重要性,可在 $0.10 \sim 10.00$ 之间选择,允许强调或不强调目标值^[20]。选定 $P-IF$ 最小作为优化目标,并使用后向回归消除方法对模型进行优化,得到最佳优化条件为:高宽比 1.50 ,叶面积密度为 $0.50 m^{-1}$,风向角为 0° 。回归模型预测

最小 $P-IF$ 为 87.396 ,而实际模拟条件下, $P-IF$ 的模拟结果为 89.537 ,在5%的置信水平内,表明与RSM模型预测的结果吻合得很好。

3 结 论

1) 本文采用CFD模拟与响应面分析相结合的方法建立回归方程模型该模型能较好地描述了峡谷高宽比、风向角及绿化带叶面积密度与人员暴露之间的关系,其 R^2 为 0.9156 ,模型显著且拟合较好。

2) 响应面分析表明,在影响个人吸入分数的因素从高到低依次为风向角(正效应)、高宽比(负效应)、叶面积密度(正效应)。

3) 通过模型优化得到最佳优化条件为高宽比 1.50 、叶面积密度为 $0.50 m^{-1}$ 、风向角为 0° ,且预测值与模拟值误差较小。

[参 考 文 献]

- [1] PU Y, YANG C. Estimating urban roadside emissions with an atmospheric dispersion model based on in-field measurements[J]. Environmental Pollution, 2014, 192: 300-307.
- [2] TOMSON M, KUMAR P, BARWISE Y, et al. Green infrastructure for air quality improvement in street canyons[J]. Environment International, 2021, 146: 106288.
- [3] VRANCKX S, VOS P, MAIHEU B, et al. Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: a numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium[J]. Science of the Total Environment, 2015, 532: 474-483.
- [4] GROMKE C, JAMARKATTEL N, RUCK B. Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons[J]. Atmospheric Environment, 2016, 139: 75-86.
- [5] BUCCOLIERI R, GROMKE C, DI-SABATINO S, et al. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407: 5247-5256.
- [6] HUANG Y, LI M, REN S, et al. Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon[J]. Building and Environment, 2019, 165: 106385.
- [7] GROMKE C, BLOCKEN B. Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part I: quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations[J]. Environmental Pollution, 2015, 196: 214-223.
- [8] XUE F, LI X. The impact of roadside trees on traffic released PM_{10} in urban street canyon: aerodynamic and deposition effects[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 30: 195-204.

(下转第 856 页)

- 试验研究[J]. 实验力学, 2003, 18(3): 301-307.
- [2] 姚国文, 黄培彦, 牛鹏志, 等. 循环载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁的疲劳性能试验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 349-353.
- [3] 唐义军. 碳纤维布加固高温作用后的连续梁试验研究和可靠度分析[J]. 实验力学, 2006, 21(3): 265-270.
- [4] 路森, 蔡建林, 张庆宗, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土吊车梁疲劳刚度研究[J]. 实验力学, 2007, 22(5): 472-476.
- [5] 彭晖, 王浩, 付俊俊, 等. 冻融循环下预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的耐久性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 344-352.
- [6] 周云, 王廷彦, 张军伟. CFRP 加固钢筋混凝土短梁抗弯刚度计算方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 9-20, 35.
- [7] 王知乐, 袁学锋, 姜荣斌. 侵蚀环境下多维修方式加固混凝土梁桥受力性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(11): 174-177, 183.
- [8] 沈华. 增大截面加固梁的正截面抗弯性能试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(12): 1639-1645.
- [9] 陈大川, 胡海波. 某商业楼重大火灾后检测鉴定与加固修复设计[J]. 建筑结构, 2010, 40(12): 105-108, 121.
- [10] 钟聪明, 朱岩松, 王福安. 京广中心加固改造设计[J]. 建筑结构, 2014, 44(24): 89-94.
- [11] 罗育明, 彭建新, 张建仁. 在役钢筋混凝土 T 型梁桥增大截面加固后可靠度研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊 1): 611-616.
- [12] 蒋济同, 张琪. 应力滞后对增大截面加固受弯构件抗弯承载力的影响研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊 1): 862-869.
- [13] 杜德润, 江生煌. 基于 BIM 的混凝土框架梁增大截面法加固设计研究[J]. 四川建材, 2020, 46(7): 60-61, 63.
- [14] 罗永成, 谯旭东, 郭川, 等. 组合加固混凝土悬挑梁力学性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(16): 97-101.
- [15] 李妍, 李冬一. 二次受力下绿色纤维增强水泥基复合材料加固 RC 梁抗弯性能数值仿真模拟[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 1): 2114-2119.
- [16] 王华, 陈翀. 利用引桥承担部分水平推力加固的刚架拱桥二次加固设计[J]. 广东公路交通, 2021, 47(4): 130-133.
- [17] 李越, 滕志功. 粘贴钢板加固法在钢筋混凝土梁二次加固中的设计原理[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(3): 76-79, 84.
- [18] 李双, 吴熠哲, 朱慈祥. 预应力混凝土连续梁桥二次加固及效果分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 113-118.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 21-23.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 848 页)

- [9] ZHU X, WANG X, LEI L, et al. The influence of roadside green belts and street canyon aspect ratios on air pollution dispersion and personal exposure[J]. Urban Climate, 2022, 44: 101236.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2016: 1-50.
- [11] ZHANG L, ZHANG Z, MCNULTY S, et al. The mitigation strategy of automobile generated fine particle pollutants by applying vegetation configuration in a street-canyon[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122941.
- [12] 中华人民共和国建设部. 城市道路绿化规划与设计规范: CJJ 75—97[S]. 北京: 中国城市规划设计研究院, 1998: 1-13.
- [13] GROMKE C, BUCCOLIERI R, DI-SABATINO S, et al. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-evaluation of CFD data with experimental data[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 8640-8650.
- [14] LALIC B, MIHAILOVIC D. An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43: 641-645.
- [15] ZHANG L, ZHANG Z, FENG C, et al. Impact of various vegetation configurations on traffic fine particle pollutants in a street canyon for different wind regimes[J]. Science of the Total Environment, 2021, 789: 147960.
- [16] KATUL G, MAHRT L, POGGI D, et al. One-and two-equation models for canopy turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 113: 81-109.
- [17] HANG J, XIAN Z, WANG D, et al. The impacts of viaduct settings and street aspect ratios on personal intake fraction in three-dimensional urban-like geometries[J]. Building and Environment, 2018, 143: 138-162.
- [18] DU Y, MAK C, LI Y. Application of a multi-variable optimization method to determine lift-up design for optimum wind comfort[J]. Building and Environment, 2018, 131: 242-254.
- [19] SHEN X, ZHANG G, BJERG B. Investigation of response surface methodology for modelling ventilation rate of a naturally ventilated building[J]. Building and Environment, 2012, 54: 174-185.
- [20] NG K, KADIRGAMA K, NG E. Response surface models for CFD predictions of air diffusion performance index in a displacement ventilated office[J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 774-781.

(责任编辑 吴 亮)