



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202010134

中图分类号 X531

文献标识码 A

刘伟,袁紫婷,胡伟成,等. 施工扬尘空间扩散特性的模型分析与分级管控措施[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 1976-1987.
LIU Wei, YUAN Ziting, HU Weicheng, et al. Spatial diffusion characteristics and hierarchical control measures of construction dust[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 1976-1987.

施工扬尘空间扩散特性的模型分析与分级管控措施

刘伟*,袁紫婷,胡伟成,王永祥

华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013

第一作者: 刘伟(1982—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 建筑施工扬尘防治。E-mail: liuweijx13@163.com

*通信作者

摘要 基于多个城市施工工地的扬尘监测数据, 对比分析了幂函数、高斯函数和指数律模型在描述施工扬尘空间扩散特性上的适用性。以北京市某工地为例, 基于 CFD 模拟, 研究了施工扬尘的空间分布及扩散特性。通过与实测数据的对比, 验证了模拟结果的准确性, 分析了指数律模型在描述施工扬尘空间扩散特性上的适用性, 并根据扬尘污染程度将施工区域影响范围划分为 3 个等级区, 提出了综合评估施工扬尘污染严重程度的分级方法与管理控制措施。结果表明: 指数律模型适用于描述施工扬尘空间扩散规律, 幂函数模型仅适用于水平方向, 高斯函数模型在水平和垂直方向均不适用; 围挡对施工扬尘的水平影响距离约为 5 倍围挡高度; 工地周围可划分为重度污染区 (<26 m)、中度污染区 (26~42 m) 和轻度污染区 (42~100 m); 可在各污染区布置监测点, 综合评估施工扬尘污染严重程度, 便于扬尘的分级管理与控制。本研究结果可为减少施工扬尘污染、提高环境空气质量提供参考。

关键词 施工扬尘; 空间扩散特性; 指数律模型; 分级管理与控制; 计算流体动力学

空气中颗粒物易引发慢性鼻咽炎和慢性支气管炎等呼吸系统疾病, 从而影响人群健康^[1]。房屋拆迁、土方工程和结构工程等施工过程产生的扬尘是大气颗粒物的重要来源之一^[2]。因此, 研究施工阶段扬尘的空间扩散特性及相应的管理控制措施, 对于改善城市环境空气质量具有重要意义^[3]。

近年来, 国内外学者从扬尘化学元素特征^[4-5]、扬尘空间扩散^[6-8]、扬尘排放因子^[9-10]、扬尘排放特征^[11-13]、扬尘健康损害评估^[14-15]和扬尘控制措施^[16-17]等角度, 对施工扬尘扩散进行了研究。田刚等^[8]对建筑施工扬尘空间扩散模型进行了研究, 结果表明, 二次幂函数模型同时适用于描述水平和垂直方向的扬尘扩散规律; 此外, 还提出了四维通量法施工扬尘排放模型^[9]。也有学者将烟羽扩散高斯模型应用于扬尘扩散研究^[16, 18]。随着计算机技术的发展, 数值模拟逐渐被广泛应用于对空气污染物分布及扩散的研究^[19-20], 为扬尘空间扩散模型及监测控制提供了更多研究途径。然而, 现有数值模拟研究大多是对比分析风速、围挡距离以及围挡高度等因素对扬尘污染的影响, 鲜有结合工地实测扬尘数据来分析扬尘空间扩散模型的研究, 而对相应分级控制措施的研究则更加有限。

收稿日期: 2020-10-23; 录用日期: 2021-02-08

基金项目: 2019 年度江西省高校人文社会科学研究项目 (GL19102); 2020 年江西省社会科学基金项目 (20GL20)

本研究利用多个城市施工工地的现场监测数据,详细探讨了工地周围扬尘在水平和垂直方向的扩散规律,并以北京某工地实测数据为例,利用数值模拟 Fluent 软件,重现了工地周围区域扬尘颗粒的分布情况,并提出了综合评价施工扬尘污染程度的分级方法及管理控制措施,以期为有效解决施工扬尘问题提供参考。

1 数据与方法

1.1 扬尘浓度监测指标

大气污染物主要包括降尘 (dust fall, DF) 和总悬浮颗粒物 (total suspended particulate, TSP) 等,分别表示大气中直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 和小于 $100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物。DF 和 TSP 浓度存在线性相关关系^[12],即 DF 浓度越高, TSP 浓度越大^[21]。

1.2 扬尘扩散规律数学模型

扬尘扩散幂函数模型^[8]表明,在相同高度或水平位置下,扬尘浓度随离工地水平距离或离地高度均呈 2 次幂衰减。该一维模型表达式见式 (1)。

$$f(x) = a(x+b)^{-2} \quad (1)$$

式中: x 为自变量,表示水平距离或离地高度, m ; f 为施工扬尘浓度,表示 DF 时单位为 $\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}$,表示 TSP 时单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,测定扬尘浓度时需扣除背景扬尘浓度; a 和 b 为拟合参数。

该模型应用于垂直方向扬尘浓度分布拟合时,参数 b 等于 0,而参数 a 受现场施工条件和气候等因素影响,变化较大。应用于水平方向时,参数 b 表示等效逸散初始距离(单位为 m),与施工区域沿扩散方向的长度成正相关,对于特定的施工区域为常数;参数 a 的取值变化很大,与施工现场的扬尘污染强度线性相关。

将烟羽扩散高斯模型用于描述扬尘空间扩散规律^[18],其一维模型表达式见式 (2)。

$$f(x) = a\exp\{-bx^2\} \quad (2)$$

式中: x 和 f 的含义与式 (1) 相同; a 和 b 为拟合参数,参数 b 表示扬尘沿 x 方向的扩散系数, m^{-2} 。

由于扬尘的空间扩散主要受风的影响,即主要由空间风速大小决定,而不同地貌条件对于风速的减缓或加速效应有所区别。部分国家的对于风速地形修正系数的建议公式中,引入了指数律模型描述地形修正系数^[22]。如美国的规范中对于地形修正系数中的 K_3 建议取值为 $\exp\{-\gamma y/L_s\}$,与地形类别有关,其中 y 为高度, γ 为高度坐标参数, L_s 为山顶至山体半高度处的距离。本研究将指数律回归模型用于描述扬尘浓度水平和垂直方向的扩散规律,其一维模型表达式见式 (3)。将指数律回归模型用于描述扬尘二维空间扩散规律,则该模型表达式见式 (4)。

$$f(x) = a\exp\{-bx\} \quad (3)$$

$$f(x,y) = a\exp\{-(bx+cy)\} \quad (4)$$

式中: x 为水平距离, m ; y 为离地高度, m ; a 、 b 和 c 为拟合参数,其中参数 b 和 c 分别表示扬尘沿 x 和 y 方向的扩散系数, m^{-1} 。

1.3 扬尘扩散规律模型评估指标

数学模型实际应用时需利用评估指标确定其适用程度,常用的回归模型误差评估指标包括和方差 (sum of squares for error, SSE)、均方差 (mean squared error, MSE)、均方根误差 (root mean squared error, RMSE),以及判定系数 (R-square, R^2) 等。其中, SSE、MSE 和 RMSE 3 者的评估效果基本一致。本研究采用 RMSE 误差和 R^2 指标综合评估, RMSE 值越小, R^2 越接近 1,表示该数学模型回归效果越好。

1.4 扬尘扩散数值模拟

扬尘颗粒扩散是气-固两相运动,以空气为连续介质,扬尘颗粒为离散相。通过建立连续相流场,可计算流场中颗粒受力状态及运动轨迹,进而模拟扬尘扩散过程。模拟计算中,假定空气是不可压缩流体,故控制方程见式(5)~(6)。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu S_{ij} + \tau_{ij}) \quad (6)$$

式中: $x_i(i=1,2,3)$ 分别为 x 、 y 、 z 笛卡尔坐标; u_i 为 i 方向的速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; P 为压强, Pa; t 为时间, s; $S_{ij} = 0.5(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)$; ρ 为空气密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ν 为运动黏度, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; $\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

利用湍流模型对上述方程进行求解时,常用模型包括标准 k - ε 模型、RNG k - ε 模型和 Realizable k - ε 模型。其中,标准 k - ε 模型的应用最为广泛^[7], k 和 ε 的输运方程见式(7)~(9)。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$G_k = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (9)$$

式中: k 为湍动能, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; ε 为湍动能耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$; $\tau_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - 2/3k\delta_{ij}$; $\nu_t = C_\mu k^2/\varepsilon$; C_μ 为 0.09; $C_{1\varepsilon}$ 为 1.44; $C_{2\varepsilon}$ 为 1.92; σ_k 为 1.0; σ_ε 为 1.3。

由式(5)~(9)求得整个区域的风速和压强等流场数据,再结合扬尘颗粒的粒径、位置和速度等,计算每个颗粒的运行轨道。考虑到颗粒对连续相介质的反作用及颗粒之间的耗散,模拟时引入双向耦合算法和随机轨道模型^[23-24]。

1.5 工程概况

为对比各扬尘扩散数学模型的准确性,选取多个工地及施工阶段(拆除旧建筑、土方施工和主体结构施工等)水平和垂直方向扬尘监测数据^[8,16,25-26]进行综合分析,结果见表1。表中数据来源广泛,可保证模型验证结果的可靠性与普遍性。

2 扬尘的空间扩散特性

2.1 扬尘在水平方向的扩散规律

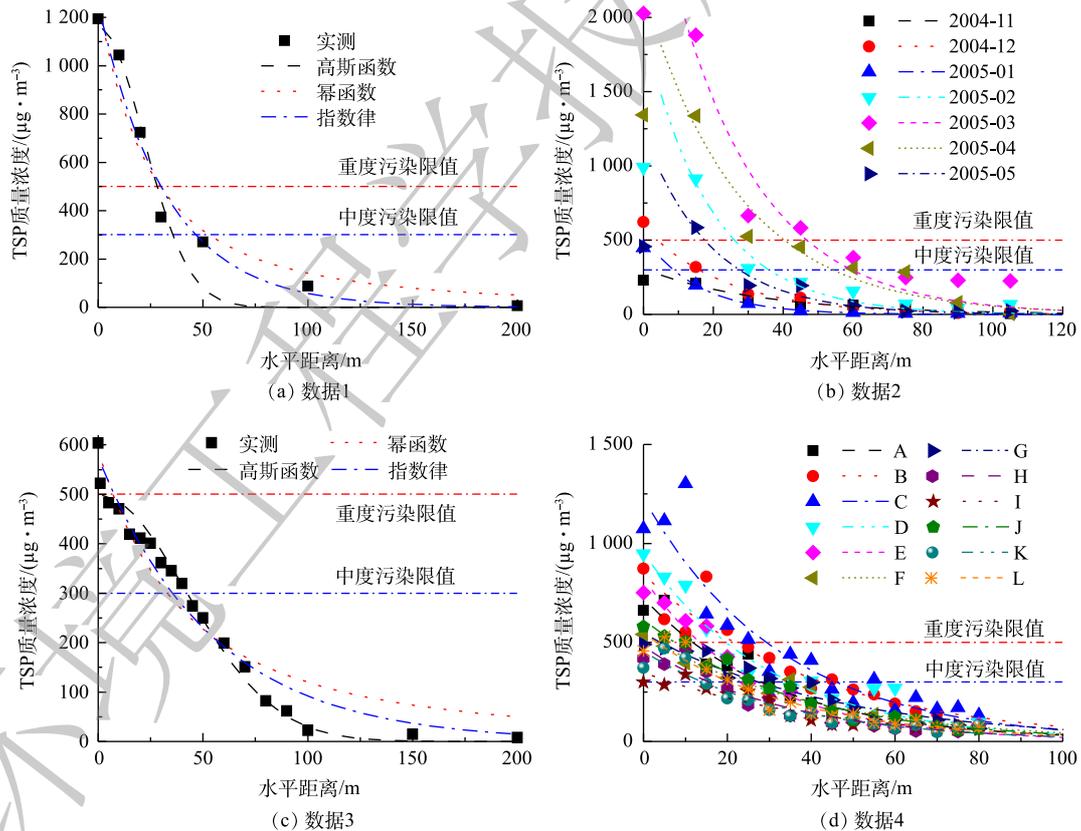
根据表1第2栏中数据1~4,应用模型(1)~(3)对比分析了特定气象要素和施工条件下施工扬尘沿水平方向的扩散规律。为便于分析,以扬尘健康损害评估指标 TSP 浓度为基准^[28],将扬尘浓度监测数据统一。其中,数据1、3、4为 TSP 浓度,无需变换;数据2为 DF 浓度,可根据 TSP 与 DF 的关系式^[21]进行变换。其可行性是由于变换模型由北京市6个工地实测数据拟合得到,且数据2所在工地位于拟合区域内;另外,变换基于线性关系式,故不会影响扬尘浓度衰减曲线,若 DF 浓度满足指数律衰减形式,变换后仍满足指数律衰减。为便于分级管控,将扬尘 TSP 浓度为 $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 设定为限值,超过相应限值分别表示重度和中度污染区域。

由第2栏数据1~4得到的水平方向扬尘浓度扩散拟合结果如图1所示。其中,由于数据量较大,数据2和4只显示指数律拟合结果。由图1可知,扬尘浓度随水平距离的增加呈衰减趋势,基本在100 m左右趋于稳定。因此,指数律扩散模型可较准确地描述扬尘浓度在水平方向的扩散规律。

表 1 施工扬尘浓度实测数据来源与信息

Table 1 Detailed information of construction dust concentration

| 方向 | 数据编号 | 文献 | 工地类型及施工阶段 | 监测日期 | 监测仪器及监测指标 | 监测位置 |
|----|------|------|--|-----------------|-------------------------|----------------------------------|
| 水平 | 数据1 | [26] | 郑州市某人行天桥建设工程及道路改造工程 | 2010-04 | DustMate粉尘仪, TSP浓度 | 离地1 m, 距工地10~200 m布置8个测点 |
| | 数据2 | [8] | 国家游泳中心建筑工地 | 2004-11—2005-05 | 集灰缸, DF浓度 | 离地3 m, 距工地0~105 m布置8个测点 |
| | 数据3 | [16] | 南昌市某学校教学楼拆除工程 | 2018-09 | HT-9600粉尘仪, TSP浓度 | 离地1.8 m, 距工地0~200 m布置18个测点 |
| | 数据4 | [25] | 成都市新都区12个建筑工地, 包括土方工程、基础工程、主体施工工程和装饰施工工程 | 2018-01—2018-12 | DustTRAK TM粉尘监测仪, TSP浓度 | 距工地0~80 m布置17个测点 |
| 垂直 | 数据5 | [8] | 西城区5栋大楼建筑工地, 经历土方工程和主体施工工程 | 2004-05—2004-11 | 集灰缸, DF浓度 | 工地边界离地2.7~4.1 m高度布置5个测点 |
| | 数据6 | [27] | 兰州大学内某地下燃气锅炉房建筑施工工地, 经历土方工程、基础工程、主体施工工程和水电安装工程 | 2009-03—2009-08 | 集灰缸, DF浓度 | 工地周围A、B、C、D位置布置离地3.9~18.9 m共6个测点 |



注:数据1为郑州某天桥和道路工程(文献[26])扬尘实测数据和3种函数拟合结果;数据2为国家游泳中心建筑工地(文献[8])7月份的实测数据和指数律拟合结果;数据3为南昌市某学校拆除工程(文献[16])扬尘实测数据和3种函数拟合结果;数据4表示成都市新都区(文献[25])12个工地的实测数据和指数律拟合结果。

图 1 水平方向扬尘浓度扩散曲线

Fig. 1 Horizontal dust concentration diffusion curve

第2栏数据1~4包含15个工地的21组扬尘监测数据,可用于3种扩散模型的综合对比分析。图2为模型误差对比箱线图。由图2可知,幂函数和指数律模型拟合得到的RMSE误差波动较小,且均值均小于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, R^2 的均值大于0.93;高斯模型拟合得到的RMSE误差较大,且 R^2 的均值远小于1,效果较差。综上所述,高斯模型不适于模拟水平方向的扬尘扩散规律,而幂函数和指数律模型更适于描述扬尘浓度在水平方向的扩散规律,且稳定性更好。

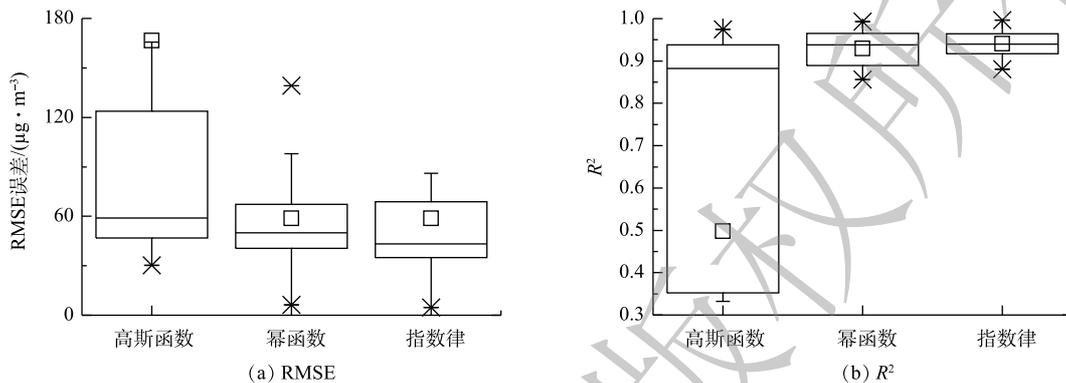


图2 水平方向扬尘浓度扩散模型误差箱线图

Fig. 2 Box charts for model errors of horizontal dust concentration diffusion

2.2 扬尘垂直方向扩散规律

根据表1中第2栏数据5~6,应用模型(1)~(3)对比分析特定气象要素和施工条件下施工扬尘沿垂直方向的扩散规律,结果见图3~4。指数律模型表明,扬尘浓度随水平高度增加逐渐衰减,达到稳定所需高度与具体施工强度和高度等因素相关^[8]。图3表明,2004年5—6月的土方施工期间,车辆的往来运输导致近地面扬尘浓度最高;而图4表明,相同月份时4个测点的垂直向扬尘浓度分布基本相同,表明扬尘在该监测点水平方向较均匀。相同高度下,3—5月扬尘浓度最高,6月次之,7—8月最低。这是由于不同月份对应的施工内容不同:3—5月为土方回填和基坑开挖阶段,车辆来往运输频繁,产生扬尘量最多;6月为主体施工阶段,木模板加工产生的扬尘较多,且无法扩散;7—8月为水电安装阶段,产生扬尘最少。不同阶段扬尘浓度不同,达到稳定所需高度亦不同,但沿高度衰减的速率基本一致,故相同施工阶段下,施工区域垂直向扬尘扩散规律基本一致。综上所述,不同施工阶段,施工区域的垂直向扬尘浓度不同,土方施工时最大,主体施工时次之,装修阶段最小,然而各阶段的衰减速率相差不大。

第2栏数据5~6包含2个工地的36组扬尘监测数据,各模型误差对比结果见图5。由图5可知,指数律模型拟合的RMSE误差波动较小,且均值小于 $0.03 \text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{d})^{-1}$, R^2 均值大于0.97;高斯函数和幂函数模型拟合RMSE误差较大,且波动性大。因此,幂函数和高斯函数模型对于垂直方向扬尘扩散规律的适用性较差,而指数律模型的适用性与稳定性均较好。

2.3 扬尘空间扩散规律

指数律模型适用于描述扬尘水平和垂直方向一维扩散规律,幂函数模型仅适用于水平方向,高斯函数模型则均不太适用。为验证指数律模型在扬尘空间扩散规律上的准确性,得到式(4)形式的空间扩散数学模型,选取2004年

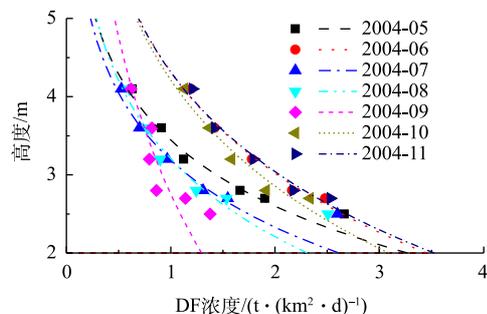


图3 垂直方向扬尘浓度扩散曲线-数据5

Fig. 3 Vertical dust concentration diffusion curve - Data 5

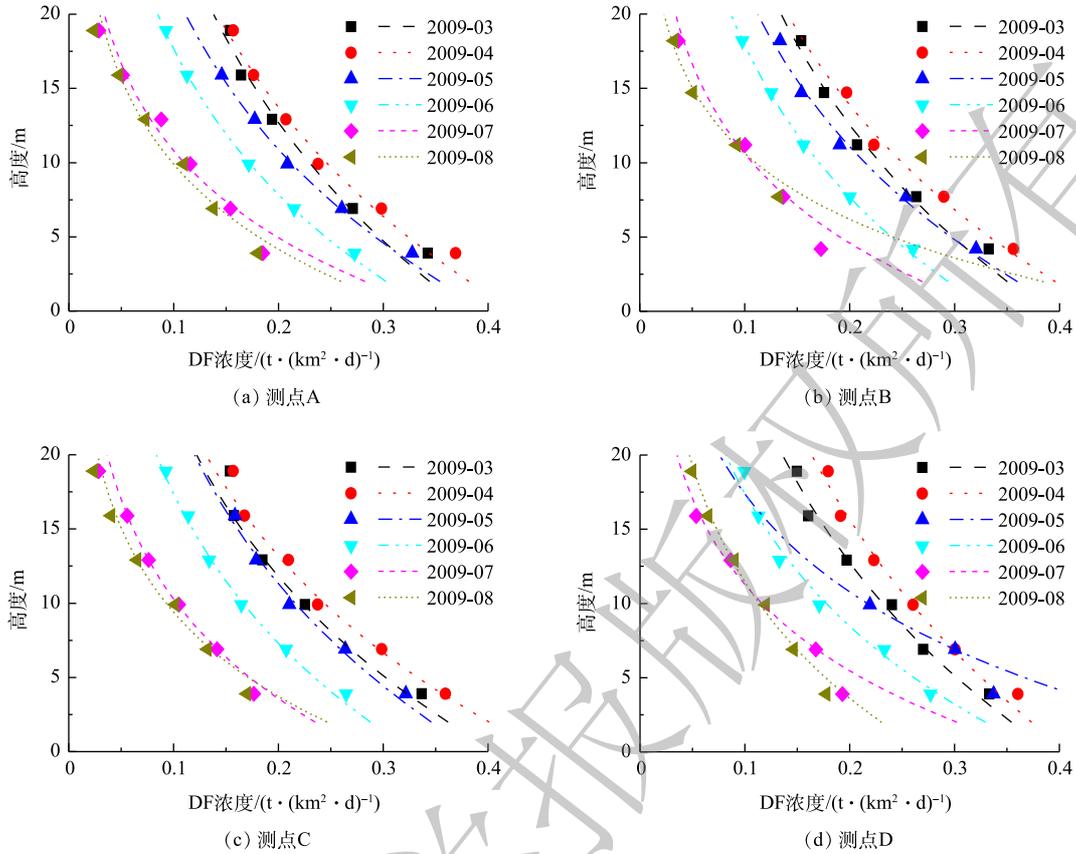


图 4 不同测点垂直方向扬尘浓度扩散曲线-数据 6

Fig. 4 Vertical dust concentration diffusion curve of different measuring points - Data 6

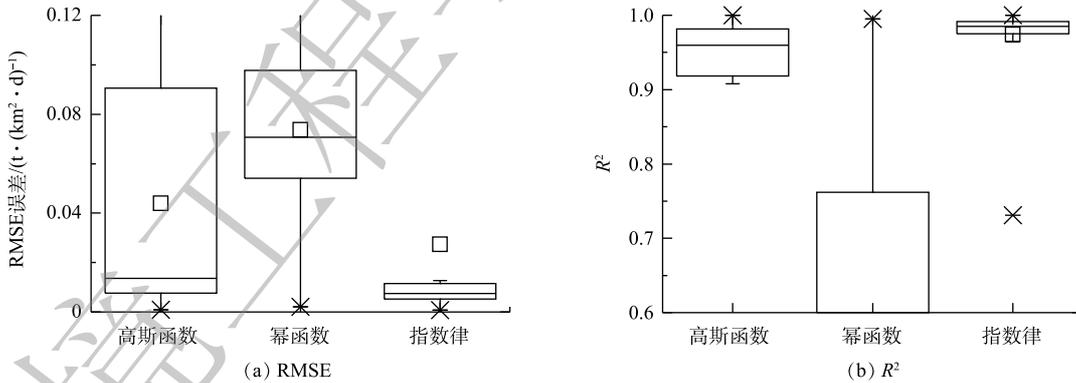


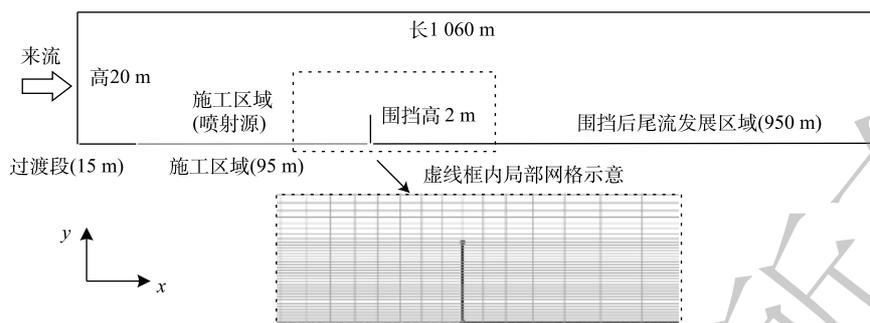
图 5 垂直方向扬尘浓度扩散模型误差箱线图

Fig. 5 Box charts for model errors of vertical dust concentration diffusion

11月国家游泳中心建筑工地的扬尘监测数据^[8]进行数值模拟分析,模拟扬尘颗粒空间扩散的整个过程。该工地数据可靠性较高,相关实验参数清晰具体,便于进行数值模拟。

2.3.1 数值模拟计算域及参数设置

用 Fluent 软件对该工地的数据进行数值建模,截取该工地中间面得到简化的二维模型^[29-30](结果见图 6)。工地顺风向长度约为 95 m,围挡高 2 m。为避免数值边界的影响,在施工区域迎风口设定 15 m 的过渡区域,在围挡后设定 10 倍施工区域长度 (950 m) 的尾流发展区;设定计算域高度为 10 倍围挡高度。因此,计算域尺寸 $x \times y$ 为 $1\ 060\ \text{m} \times 20\ \text{m}$,其中 x 为顺风向, y 为竖向,沿 x 、 y 方



注:过渡段长度15 m是为了避免施工区域对数值入口影响而设定;施工区域长度95 m是根据工地实际情况确定;围挡后尾流发展区域长度950 m是施工区域长度的10倍。

图6 二维模型计算域与局部网格示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the simulation domain and local grid of the two-dimensional model

向分别划分 205、88 个网格, 计算域网格数总计 1.8×10^4 。

从气象数据网 (<http://data.sheshiyuanyi.com/WeatherData/>) 得到北京市海淀区气象站 (气象站点编号 54511) 2004 年 11 月的日平均风速, 得到月平均风速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风力等级为 2 级 ($1.6 \sim 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。该气象站测点距离地面 31.3 m, 根据建筑结构荷载规范 (GB 50009-2012)^[31], 该工地所处地貌为 B 类标准地貌, 入口边界条件定义见式 (10)~(13)^[32-33]。

$$U(y) = U_r(y/y_r)^\alpha \quad (10)$$

$$I_u(y) = I_{10}(y/10)^{-\alpha} \quad (11)$$

$$k(y) = 1.0(U(y)I_u(y))^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon(y) = C_\mu^{0.75} k(y)^{1.5} / I_u(y) \quad (13)$$

式中: $y_r=31.3 \text{ m}$, $U_r=2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha=0.15$, $I_{10}=0.14$, $C_\mu=0.09$ 。

出口边界设定为压力出口, 顶部边界为对称边界, 入口为速度入口, 地面除施工区域外均设定为无滑移的固壁, 围挡为固壁; 施工区域设定为扬尘粒子的面喷射源, 边界条件为速度入口。扬尘颗粒粒径分布采用 Rosin-Rammler 分布曲线^[34], 计算模型及扬尘颗粒相关参数见表 2^[7]。为保证结果的稳定性, 模拟共进行 8 000 步, 选择后 1 000 步的扬尘浓度模拟结果取其平均值。

表 2 施工扬尘数值模拟参数设定

Table 2 Parameter settings of the numerical simulation of the construction dust

| 参数 | 取值或选项 | 参数 | 取值或选项 |
|---|------------------------------------|--|---------------------------|
| 定常/非定常 | Steady | 随机轨道模型 | Discret Random Walk Model |
| 求解器 | Pressure-Based | 气固耦合频率/步 ⁻¹ | 1 |
| 重力/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) | -9.8 | 喷射源类型 | surface |
| 湍流模型 | Standard k - ε model | 颗粒质量流速/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1.5×10^{-5} |
| 算法 | SIMPLE | 颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1 550 |
| 动量方程 | Second Order Upwind | 粒径分布 | Rosin-Rammler |
| 气-固耦合模型 | Discrete Phase | 最大粒径/m | 2.72×10^{-4} |
| 空气密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1.225 | 最小粒径/m | 1.81×10^{-7} |
| 空气运动黏度/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) | $1.460 7 \times 10^{-5}$ | 中位粒径/m | 3.52×10^{-5} |
| 模拟步数 | 8 000 | 粒径分布参数 | 2.51 |
| 统计步数 | 1 000 | 粒径数目 | 10 |

2.3.2 数值模拟结果的验证

为验证数值模拟结果的准确性，将扬尘浓度 CFD 模拟结果与实测结果进行了对比(结果见图 7)。由图 7 可知，CFD 模拟能较好预测扬尘浓度的空间分布，与实测结果吻合较好，具有一定的可靠性。然而，由于实测数据布置测点水平间距过大，无法精确得到 0~15 m 范围内的扬尘浓度，但 CFD 模拟能准确预测其变化趋势。另外，由于围挡的阻挡效应，围挡后面 0~2 m 内扬尘颗粒大量集中，扬尘浓度较高；2~6 m 内，因扬尘颗粒重力作用及相互之间的湍流影响，扬尘浓度急剧下降；6~10 m 内，风迁移作用使扬尘浓度升高；距离大于 10 m 后，扬尘颗粒受重力作用主导，浓度逐渐衰减至稳定。围挡高度为 2 m，扬尘浓度在 5 倍围挡高度之后不再受围挡影响。

图 8 为数值模拟下扬尘颗粒的空间分布图。扬尘颗粒基本集中在 3 m 高度范围内，特别是围挡后的区域聚集的扬尘颗粒物最多。根据前面的分析结果及平均风速云图，围挡的影响范围约为 5 倍围挡高度之内，在大于该范围的区域，扬尘颗粒的分布主要受重力作用影响。

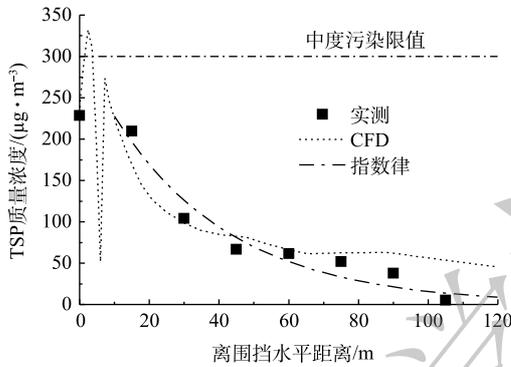


图 7 扬尘浓度水平方向扩散对比验证

Fig. 7 Comparison of horizontal dust concentration diffusion

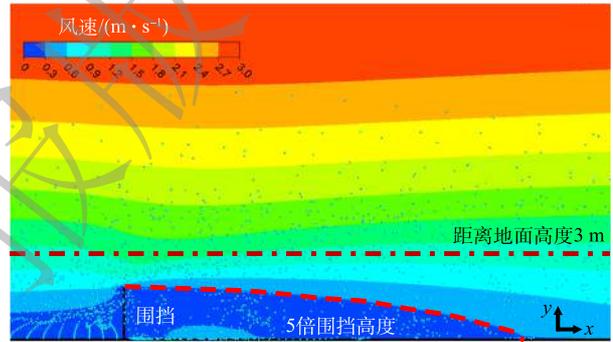


图 8 扬尘颗粒空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of dust particles

2.3.3 扬尘空间扩散模型验证

为验证指数律模型(4)在描述扬尘空间扩散上的准确性与适用性，将 CFD 模拟的扬尘浓度分布结果拟合得到模型(4)。由 2.1 节可知，扬尘浓度在离工地水平距离 100 m 左右基本趋于稳定，为避免围挡影响并考虑人类的呼吸高度范围，取 CFD 模拟结果在围挡后水平范围为 [10 m, 100 m]、高度范围为 [1 m, 5 m] 进行拟合，对比结果如图 9 所示。CFD 模拟得到的扬尘浓度空间分布与指数律形式基本一致，拟合得到的指数律模型见式(14)。

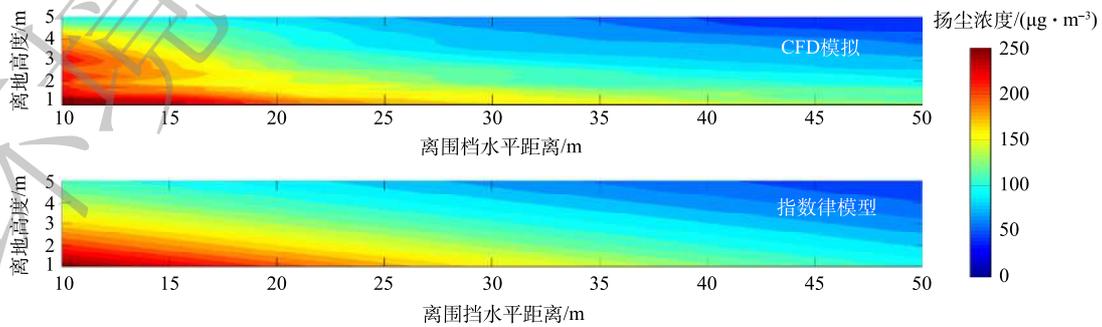


图 9 扬尘浓度空间分布对比

Fig. 9 Comparison of spatial distribution of dust concentration

$$f(x,y) = 397.20\exp\{-(0.023x + 0.204y)\} \quad (14)$$

该模型的拟合误差 RMSE 仅为 $11.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, R^2 为 0.933。因此,研究所提出的指数律模型 (4) 可用于描述扬尘空间扩散规律,适用范围为离围挡水平距离为 $5H\sim 100 \text{ m}$ (H 为围挡高度)、高度距离为呼吸高度 $1\sim 5 \text{ m}$ 构成的区域,其中的指数律模型参数 a 、 b 和 c 取值与施工阶段、施工强度、风速、空气温度、空气湿度等相关,详细关系有待进一步研究。

3 扬尘污染分级管理与控制措施

目前,工地内的扬尘污染防治通常采用统一方式,未考虑成本,且抑尘效果不一。以施工扬尘空间扩散特性研究为基础,根据扬尘污染严重程度将工地周围区域进行功能区划分,并确定扬尘污染分级预警方法,制定具有针对性的施工扬尘污染专项管理计划,可实现控制成本的同时,有效降低施工扬尘浓度,减少扬尘污染扩散。

为明确施工扬尘污染程度分级标准,根据水平方向上扬尘浓度在呼吸高度范围内的大小,将工地周围区域划分功能区,并分别设置监测点,以多个监测点的扬尘浓度为评估指标,确定施工扬尘污染等级。根据《环境空气质量标准》(GB 3095-1996)^[35] 将环境空气质量功能区分为 3 类:第 1、2 和 3 类分别为自然保护区、居住区和特定工业区,对应 TSP 质量浓度限值分别为 120 、 300 和 $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2012 年的新标准^[36] 将第 3 类环境空气质量功能区取消,保持其他 2 类功能区不变。由于建筑施工区域通常位于居住区,同时考虑扬尘污染强度精细划分,将扬尘质量浓度进行分为 3 类:1) 重度污染——TSP 质量浓度超过 $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2) 中度污染——TSP 质量浓度在 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间; 3) 轻度污染——TSP 质量浓度小于 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

由 2.1 可知,施工扬尘最远影响水平距离为 100 m 左右,超出此范围的区域可认为完全不受施工扬尘影响。根据 2.3.3 中的结果,施工区域围挡的水平影响距离约为围挡高度的 5 倍数,在此范围内可认为受到施工扬尘的影响最严重,为重度污染区;另外,根据规定围挡高度不得低于 1.8 m ^[37],即重度污染区至少为围挡水平距离 9 m 范围内。根据以上条件,基于表 1 第 1 栏数据 1~4 进行污染区域分级结果,整理得到图 10。

由图 10 可知,对于表 1 第 2 栏数据 1~4 的 21 组数据,重度污染影响最远水平距离为 $9\sim 46 \text{ m}$,中度污染影响最远为 $9\sim 60 \text{ m}$ 。若取 80% 分位数^[38] 作为相应影响区域的评判标准,则重度污染最远距离为 26 m ,中度污染最远距离为 42 m ,即离围挡水平距离为 $0\sim 26 \text{ m}$ 、 $26\sim 42 \text{ m}$ 和 $42\sim 100 \text{ m}$ 分别对应重度、中度和轻度污染区域。因此,在这 3 个区域布置相应测点,根据其扬尘浓度综合评估空气污染严重程度等级,并采取对应降尘控制措施,具体实施步骤见图 11。该方法依据扬尘污染严重程度进行分级管控,可缩减抑尘成本,提高控尘效果。此外,扬尘防治工作还应组织开展防止空气污染对人体健康影响的知识宣传,指导健康防护及空气污染控制措施,帮助公众提高防尘意识和手段,最大程度降低施工扬尘造成的危害。

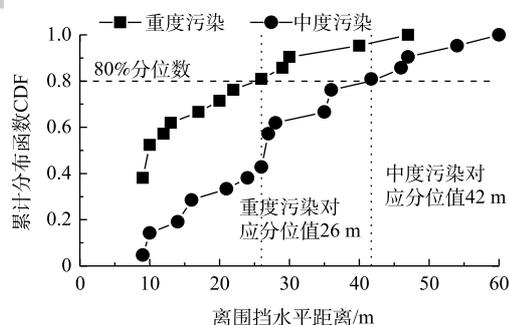


图 10 扬尘污染区域分级

Fig. 10 Classification of dust pollution area

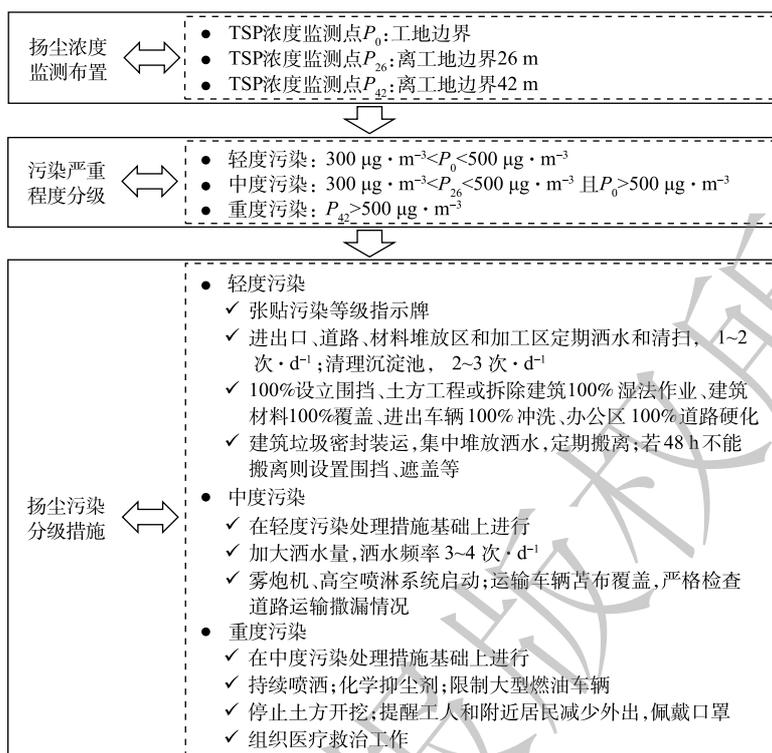


图 11 施工扬尘污染分级方法与控制措施

Fig. 11 Classification and control measures on pollution of construction dust

4 结论

1) 指数律模型同时适用于描述水平和垂直方向施工扬尘扩散规律, 幂函数模型仅适用于水平方向, 高斯函数模型均不适用; 施工扬尘浓度在距离工地 100 m 时基本趋于稳定。

2) 围挡对扬尘浓度的水平影响距离约为 5 倍围挡高度; CFD 模拟结果验证了提出的施工扬尘指数律空间扩散模型的准确性, 发现目标工地扬尘 TSP 质量浓度= $397.2\exp\{-0.023x-0.204y\}$; 模型参数与施工阶段、施工强度、风速、空气温度和空气湿度等因素有关, 变化较大。

3) 根据施工扬尘影响程度, 将施工区域周围划分为重度污染区 (<26 m)、中度污染区 (26~42 m) 和轻度污染区 (42~100 m); 提出了综合评估扬尘污染严重程度的方法, 并详细阐述了相应的扬尘分级管理控制措施, 以最大程度提高环境空气质量, 改善居民居住和出行环境。

参考文献

- [1] MENG J, LIU J F, FAN S M, et al. Potential health benefits of controlling dust emissions in Beijing[J]. Environmental Pollution, 2016, 213(1): 850-859.
- [2] QIU X H, DUAN L, GAO J, et al. Chemical composition and source apportionment of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in different functional areas of Lanzhou, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 40(2): 75-83.
- [3] 温玲丽. 城市建筑施工扬尘空间运移模式的数值模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [4] PELT R S V, ZOBECK T M. Chemical constituents of fugitive dust[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2007, 130(1/2/3): 3-16.
- [5] SUN J, SHEN Z X, ZHANG L M, et al. Chemical source profiles of urban fugitive dust $\text{PM}_{2.5}$ samples from 21 cities across China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649(1): 1045-1053.

- [6] AMORIM J H, RODRIGUES V, TAVARES R, et al. CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461-462(7): 541-551.
- [7] 单晓宇, 任高峰. 施工场地扬尘排放运移特征研究[J]. *工业安全与环保*, 2019, 45(10): 56-61.
- [8] 田刚, 李钢, 闫宝林, 等. 施工扬尘空间扩散规律研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(1): 259-262.
- [9] 田刚, 黄玉虎, 李钢. 四维通量法施工扬尘排放模型的建立与应用[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 1003-1007.
- [10] 赵普生, 冯银厂, 张裕芬, 等. 建筑施工扬尘排放因子定量模型研究及应用[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 567-573.
- [11] 刘嘉明, 狄育慧, 梅源, 等. 西安市夜间土方工程施工扬尘排放特征分析[J]. *制冷与空调*, 2019, 33(3): 332-336.
- [12] 王荣. 成都市某工地施工扬尘排放特征研究[J]. *绿色科技*, 2017, 20(2): 41-42.
- [13] 肖晗, 杨晓春, 吴其重, 等. 西安市建筑施工扬尘排放的模型估算[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 222-228.
- [14] 黄天健. 建筑工程施工阶段扬尘监测及健康损害评价[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [15] 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 等. 南昌市扬尘PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 138-145.
- [16] LIU W, TANG P T, LI K, et al. Demolition dust formation, diffusion mechanism and monitoring quantitative research on demolition of existing buildings[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(6): 14543-14559.
- [17] 郑云海, 田森林, 李林, 等. 基于表面活性剂的施工扬尘抑尘剂及其性能[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2391-2396.
- [18] 彭长明. 美加: 东部假日小区建设项目施工扬尘分析与控制[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [19] 许栋, 张博曦, 及春宁, 等. 防风网扬尘庇护区湍流流场模拟数值边界条件[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(10): 115-122.
- [20] 张子文, 杨帆, 吴文豪, 等. 输煤皮带巷运煤量对扬尘运移扩散影响的数值模拟[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5): 2967-2976.
- [21] 田刚, 李建民, 李钢, 等. 建筑工地大气降尘与总悬浮颗粒物相关性研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(9): 1941-1943.
- [22] 胡伟成, 杨庆山, 张建. 多国规范山地风速地形修正系数对比研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(10): 203-211.
- [23] 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(1): 474-483.
- [24] 刘洪涛, 杜敏. 方管内微细颗粒沉积特性CFD预测[J]. *居舍*, 2018, 21(28): 47-48.
- [25] 范武波, 陈军辉, 唐斌雁, 等. 成都市施工扬尘排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 3767-3775.
- [26] 赵勇. 市政工程施工地周边颗粒污染物扩散特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2625-2628.
- [27] 郭默. 基于BP神经网络的施工扬尘量化建模研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [28] 李婕, 毛鹏, 魏嘉玮, 等. 建筑施工扬尘的健康经济损失评估[J]. *土木工程与管理学报*, 2018, 35(6): 212-218.
- [29] 樊世星. 高瓦斯易自燃采空区瓦斯与遗煤自燃共生灾害研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
- [30] 肖峻峰, 许峰, 樊世星, 等. 大断面综掘巷道长压短抽条件下粉尘运移模拟[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(2): 127-132.
- [31] 建筑结构荷载规范: GB 50009-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [32] RAMPONI R, BLOCKEN B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters[J]. *Building and Environment*, 2012, 53(1): 34-48.
- [33] RICHARDS P J, NORRIS S E. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited[J]. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4): 257-266.
- [34] 陈慧敏, 冯星泰, 王凤杰, 等. 不同因素作用下坦克行驶扬尘浓度分布规律数值模拟[J]. *兵工学报*, 2018, 39(10): 1901-1909.
- [35] 国家环境保护总局. 环境空气质量标准: GB 3095-1996[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [36] 国家环境保护总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

- [37] 邓济通, 黄远东, 张强. 围栏高度对施工扬尘迁移扩散影响的数值模拟研究[J]. 环境工程, 2014, 32(4): 83-86.
- [38] 陈永伟, 张策, 王夏华. 一种估计和检验排序模型中结构变化的方法及应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(8): 120-137.

(责任编辑: 靳炜)

Spatial diffusion characteristics and hierarchical control measures of construction dust

LIU Wei*, YUAN Ziting, HU Weicheng, WANG Yongxiang

School of Civil Engineering, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China

*Corresponding author, E-mail: liuweijx13@163.com

Abstract Based on the monitoring data of construction dust in several cities, the applicability of power law, Gaussian law and exponential law models in describing spatial diffusion of construction dust is compared. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are performed to study the spatial distribution and diffusion characteristics of construction dust at a construction site in Beijing, and the feasibility of the proposed exponential law model is also analyzed. The CFD model is validated by measured data. Three zones are divided around the construction sites according to the concentration of construction dust. A classification method for dust pollution is proposed based on the monitored dust data in the three zones, and the corresponding measures are presented for its management and control. The results show that the proposed exponential law model is suitable for describing the spatial diffusion of construction dust and the power law model merely fits the horizontal diffusion. The Gaussian law model is not applicable for both. The CFD results indicate that the horizontal influence distance of the enclosure on dust concentration is about 5 times the enclosure height. The surrounding of the construction site can be divided into heavily polluted zone (<26 m), moderately polluted zone (26~42 m) and lightly polluted zone (42~100 m). Corresponding measurements are suggested to be set in the three zones, and comprehensive assessment of dust pollution can be classified. The classification results can provide reasonable measures for dust management and control. This study provides scientific advices for alleviating dust pollution and improving environmental quality.

Keywords construction dust; spatial diffusion characteristics; exponential law model; hierarchical management and control; computational fluid dynamics