

空气幕对抑制收费亭内污染物侵入作用的数值模拟

陈大伟¹,张登春^{1*},章照宏²,卿倩¹

(1. 湖南科技大学土木工程学院,湖南 湘潭 411201;

2. 湖南省高速公路建设开发总公司,湖南 长沙 410016)

摘要:针对高速公路收费亭内空气质量差、污染严重的问题,为改善收费亭内工作环境、保障作业人员的身体健康,采用空气幕隔断方式抑制污染物进入亭内。运用 Airpak 软件对空气幕不同送风速度和送风角度下的抑制效果进行数值模拟,计算结果表明:空气幕可以有效抑制污染物侵入收费亭内;竖直向下送风时,随着送风速度的增加,抑制效果有所增加,当送风速度达到 2.0 m/s 时,继续增大送风速度对抑制效果的提升不明显;送风角度为 0°、5°、10°时,空气幕能起到较好的抑制作用,当送风角度增大至 15°、30°时,抑制效果有所降低。

关键词: NO₂; 空气幕; 数值模拟; 送风速度; 送风角度; 收费亭

中图分类号: X511; R136.2 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2021)02-0029-06

Numerical Simulation on the Effect of Air Curtain Inhibiting Pollutant Invasion in Toll Booth

CHEN Da-wei¹, ZHANG Deng-chun^{1*}, ZHANG Zhao-hong², QING qian¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan,

Hunan 411201, China; 2. Hunan Provincial Expressway Construction and Development Corporation, Changsha, Hunan 410016, China)

Abstract: In view of the serious problems of poor air quality and pollution in highway toll booths, in order to improve the working environment and ensure the health of workers, air curtain separation was used to restrain pollutants from entering the toll booth. Using Airpak software, numerical simulation was carried out on the suppression effect of air curtain under different air supply velocities and air supply angles. The results showed that the air curtain played a role in improving the air quality in the toll booth. In the case of vertical downward air supply, the inhibiting effect increased with the increase of air supply velocity. When the air supply velocity reached 2.0 m/s, the increasing of air supply velocity had no obvious effect on inhibiting effect. When the air supply angle was 0°, 5° or 10°, the air curtain had a better inhibitory effect. When the air supply angle increased to 15° or 30°, the inhibiting effect decreased.

Key words: NO₂; Air curtain; Numerical simulation; Air supply velocity; Air supply angle; Toll booth

目前我国对于公路收费亭内的工作环境保障仅是通过分体空调机在温度方面改善工作人员的工作环境,并没有考虑对收费亭内空气品质的控制^[1]。因工作的特殊性,收费亭收费窗口需要保持常开,在收费广场机动车处于怠速、加速、减速等工况时,燃料不完全燃烧导致机动车尾气排放严重超标,严重影响工作人员的身体健^[2-3]。国内研究人员^[4-7]通过检测收费站内外空气中汽车尾气

成分,发现空气中有害气体成分超标严重。黄振依等^[4]探讨了路桥收费站室内空气污染对收费人员

收稿日期:2020-03-19;修订日期:2021-02-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41702176);淮北矿业集团有限责任公司科技基金资助项目(HK-2018-1);安徽省交通航务工程有限公司科技开发基金资助项目(JTHW-2017K1)

作者简介:陈大伟(1995—),男,安徽芜湖人,在读研究生,研究方向为建筑热环境控制。

*通信作者:张登春 E-mail: dczhang2000@126.com

健康的影响,表明工作人员呼吸疾病发病率增高的主要原因是收费亭内空气被汽车尾气所污染。Diab 等^[8]和 Sapkota 等^[9]通过对收费亭附近污染物浓度的比较分析,提出了改善收费亭内工作环境的建议。吕阳等^[10]探讨了公路收费站内外空气污染对工作人员健康的影响并提出了改善建议。李全等^[11]虽然提出了用强制通风保持收费亭内微正压来改善亭内环境的设想,但没有明确具体的解决措施。杨华等^[12]提出了采用个性化送新风至人员呼吸区以改善收费亭内工作环境的措施和方案。刘磊^[13]和任清耀等^[14]设计了基于个性化通风的公路收费亭室内空气品质控制装置,并通过实验和模拟验证了装置的可行性。

今提出在收费窗口上安装空气幕,利用隔断气流抑制收费亭外污染气体进入亭内,以改善收费亭内空气环境。以汽车尾气中 NO_2 为代表气体,通过数值模拟验证空气幕使用的可行性,研究空气幕在不同送风速度和送风角度下对污染物侵入收费亭内的抑制效果。

1 实验方法

1.1 物理模型

按照真实的高速公路收费亭结构尺寸建立物理模型,见图 1(a)。收费亭尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),以正 X 方向为正北方向,在收费亭西外墙上开有一收费窗口,其尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ (长 \times 宽),窗口中心线距地面 1.0 m ,收费亭内有一名工作人员、一台电脑、一张办公桌,办公桌高 0.6 m , O 为坐标原点。在收费亭窗口上方内侧安装尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.21 \text{ m}$ 的空气幕,送风口尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$,空气幕从亭外引入新风,在收费亭顶上装有一整套过滤设备,对室外空气进行过滤处理,经由管道送至空气幕,见图 1(b)。

1.2 控制方程

使用 Airpak 软件进行数值模拟,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。为简化问题,收费亭内的空气流动作如下假设:①收费亭内空气流动为稳态湍流;②收费亭内空气做低速不可压缩流动,且符合 Boussinesq 假设;③收费亭气密性良好,除收费窗口外不考虑漏风的影响;④未考虑室外风的影响。根据以上假设,收费亭内空气湍流流动与组分输运控制方程为^[15]:

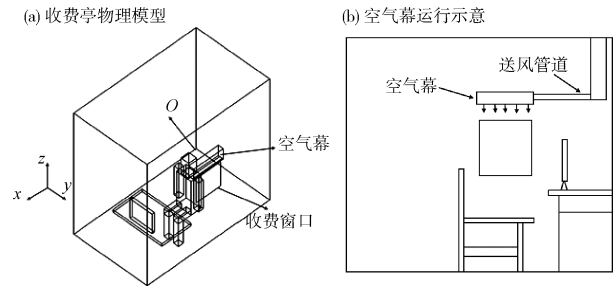


图1 收费亭物理模型与空气幕运行示意

Fig. 1 Diagram of toll booth physical model and air curtain operation

$$\text{div}(\rho \mathbf{U} \Phi - \Gamma_{\phi} \text{grad} \Phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中: Φ 为通用变量,代表 p 、 u 、 v 、 w 、 C 等求解变量; Γ_{ϕ} 为扩散系数; S_{ϕ} 为源项; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; \mathbf{U} 为速度矢量, m/s 。

1.3 数值方法及边界条件设置

采用控制容积法对控制方程进行离散,对流项和扩散项使用幂函数差分格式,应用 SIMPLE 算法求解离散控制方程。

(1) 空气幕送风口边界:定义为速度入口边界,所送新风不含 NO_2 气体。

(2) 出口边界:因收费亭窗口保持常开,与外界大气相通,设为压力出口。

(3) 污染物设置:收费亭内起始 NO_2 浓度为 0,根据文献[7]的测量数据,收费亭外 NO_2 小时平均质量浓度维持在 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,选取 NO_2 最高值,设置收费亭外窗口处 NO_2 质量浓度为 $244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2 结果与讨论

2.1 空气幕使用的可行性验证

为验证使用空气幕可以抑制污染物进入收费亭,将未使用空气幕气流自由扩散和使用空气幕(送风速度为 $1.0 \text{ m}/\text{s}$)两种情况下收费亭内 NO_2 质量浓度进行对比。图 2 为两种情况下 $X = 1.4 \text{ m}$ 、 $Z = 1.4 \text{ m}$ (人体呼吸区高度)处 NO_2 质量浓度沿 Y 方向分布。图 3 为未使用空气幕时 $Y = 0.3 \text{ m}$ 断面处 NO_2 质量浓度分布。以《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中规定的 24 h NO_2 质量浓度 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 为安全限值(基准浓度),将计算结果与其进行对比。

由图 2 可见,使用空气幕和不使用空气幕两种情况下,收费亭内 NO_2 质量浓度差距明显。

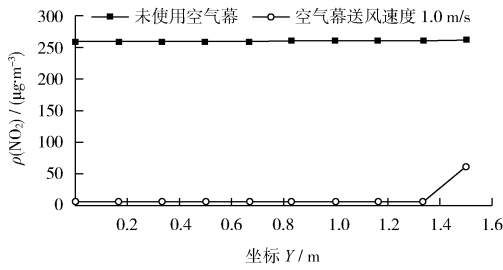


图 2 两种情况下 NO₂ 质量浓度沿 Y 方向分布

Fig. 2 Distribution of NO₂ mass concentration along Y direction under two different conditions

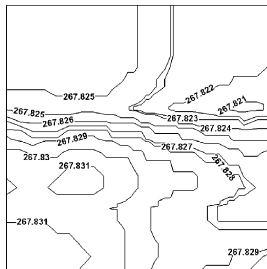


图 3 未使用空气幕时 Y=0.3 m 处 NO₂ 质量浓度分布 (ug/m³)

Fig. 3 Distribution of NO₂ mass concentration when Y=0.3 m and without air curtain (ug/m³)

由图 3 可见,未使用空气幕时收费亭内 NO₂ 平均质量浓度为 268 μg/m³,是安全限值的 3.35 倍,表明收费亭内污染状况十分严重;使用空气幕时收费亭内 NO₂ 平均质量浓度为 11 μg/m³,低于安全限值(80 μg/m³),同比降低了 257 μg/m³,降幅达到 95.9%。由此可见,使用空气幕后,收费亭内 NO₂ 浓度有了明显的降低,有效抑制了污染物进入收费亭内,起到改善收费亭内空气质量的作用。

2.2 送风速度对抑制污染物侵入收费亭内的影响

在研究送风速度对抑制污染物侵入收费亭内的影响时,保持送风角度为 0°(竖直向下送风)不变,改变送风速度分别为 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s。图 4 为不同送风速度下 X=1.4 m、Z=1.4 m(人体呼吸区高度)处 NO₂ 质量浓度沿 Y 方向分布。图 5(a)(b)(c)分别为送风速度 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s 时 Y=0.3 m 断面处 NO₂ 质量浓度分布(竖向为 Z 方向,横向为 X 方向)。图 6(a)(b)(c)分别为送风速度 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s 时收费窗口处压强分布。

由图 4 和图 5 可见,5 种送风速度均能使收费亭内 NO₂ 质量浓度低于标准值。Y 在 0 m~1.4 m 区域内,当送风速度为 0.5 m/s 时,NO₂ 平均质量浓度为 10 μg/m³;当送风速度增加为 1.0 m/s 时,NO₂ 平均质量浓度为 6.3 μg/m³,较前者降低了 3.7 μg/m³,降幅为 37%;当送风速度增大到 1.5 m/s 时,NO₂ 平均质量浓度为 5.5 μg/m³,较送风速度为 0.5 m/s 时降低了 4.5 μg/m³,降幅为 45%;当送风速度增加到 2.0 m/s、2.5 m/s 时,NO₂ 质量浓度降低幅度很小。在窗口 Y=1.5 m 处 NO₂

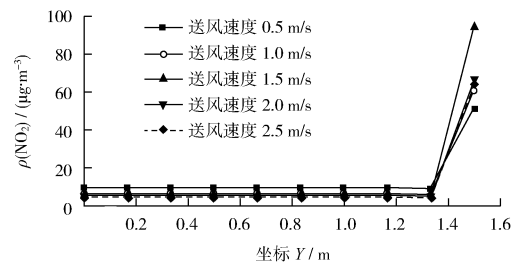


图 4 不同送风速度下 NO₂ 质量浓度沿 Y 方向分布

Fig. 4 Distribution of NO₂ mass concentration along Y direction under different air supply velocities

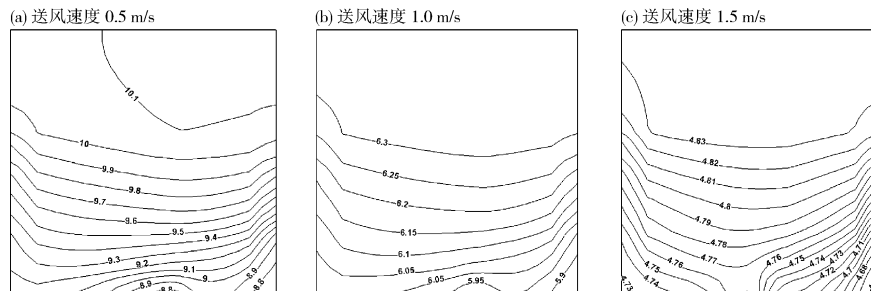


图 5 不同送风速度下 Y=0.3 m 处的 NO₂ 质量浓度分布 (ug/m³)

Fig. 5 Distribution of NO₂ mass concentration when Y=0.3 m under different air supply velocities (ug/m³)

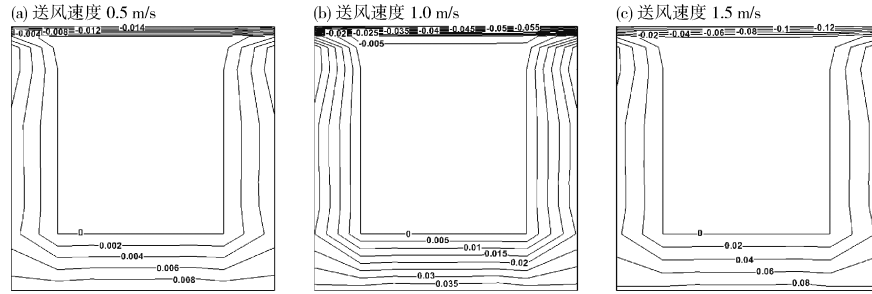


图6 不同送风速度下收费窗口处压强分布(Pa)

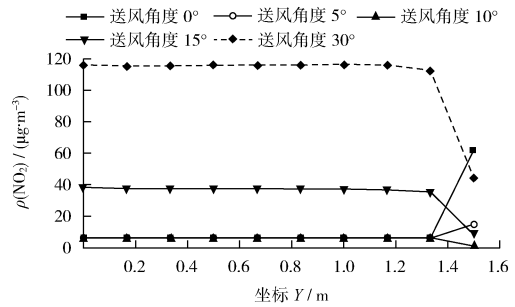
Fig. 6 Distribution of pressure at toll window under different air supply velocities(Pa)

质量浓度均出现最大值。可见,随着送风速度的增加,收费亭内整体 NO_2 质量浓度不断降低,当送风速度增加到 2.0 m/s 时,继续增大送风速度对于降低收费亭内 NO_2 质量浓度的效果提升不明显。

由图6可见,当送风速度为 0.5 m/s 时,收费窗口上方出现了负压区域,最大负压为 -0.014 Pa ,窗口中间大半区域压强为 0 ,除窗口上方外,其他边缘部位均出现正压区域,最大正压为 0.008 Pa ;当送风速度为 1.0 m/s 时,正压、负压和压强为 0 的区域变化不大,最大正压增大为 0.035 Pa ,最大负压增大为 -0.055 Pa ;当送风速度为 1.5 m/s 时,各区域变化仍不明显,此时最大正压为 0.08 Pa ,最大负压变为 -0.12 Pa 。表明增大送风速度虽然对改变窗口处的压强分布区域不明显,但改变了局部区域压强的大小。由于收费亭窗口处于常开状态,收费亭内外初始压差为 0 ,不设空气幕时,在收费亭内外 NO_2 浓度差的作用下, NO_2 会经由收费窗口扩散进入收费亭。当空气幕开启时,由于送风口距窗口仍有 $2 \text{ cm} \sim 3 \text{ cm}$ 的间隙,送风气流随着速度的衰减向两侧扩散,靠近窗口一侧的气流透过窗口向窗外扩散,斜向下对外界窗口中下区域形成空气挤压,受挤压的空气向上流动,往窗口上部扩散,在窗口上部区域形成负压区域,从而导致图4中在窗口 $Y=1.5 \text{ m}$ 位置处 NO_2 质量浓度有所增加。

2.3 送风角度对抑制污染物侵入收费亭内的影响

在研究空气幕送风角度对抑制污染物侵入收费亭内的影响时保持送风速度 1.0 m/s 不变,选取垂直向下为 0° 送风角度,对比送风角度为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 30° 时收费亭内污染物的抑制效果。图7为不同送风角度下 $X=1.4 \text{ m}$ 、 $Z=1.4 \text{ m}$ (人体呼吸区高度)处 NO_2 质量浓度沿 Y 方向分布。图8(a)(b)(c)分别为送风角度 10° 、 15° 、 30° 时 $Y=0.3 \text{ m}$ 断面处 NO_2 质量浓度分布。图9(a)(b)

图7 不同送风角度下 NO_2 质量浓度沿 Y 方向分布Fig. 7 Distribution of NO_2 mass concentration along Y direction under different air supply angles

(c)分别为送风角度 10° 、 15° 、 30° 时收费窗口处压强分布。

由图7和图8可见,改变送风角度对抑制效果有一定的影响。当送风角度为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时,收费亭内 NO_2 平均质量浓度变化不大,约为 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$,仅为安全限值的 7.5% ;当送风角度增大为 15° 时,收费亭内 NO_2 平均质量浓度增加到 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$;当送风角度增大为 30° 时,收费亭内 NO_2 平均质量浓度增加到 $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$,是安全限值的 1.44 倍。可见,当送风角度为 0° 、 5° 、 10° 时,空气幕能起到很好的抑制作用,当送风角度增大至 15° 、 30° 时,由于空气幕气流方向的变化,抑制效果有所降低。

由图9可见,改变送风角度,窗口处正压、负压和压强为 0 的区域发生改变。与送风角度为 0° 时相比,当送风角度为 10° 时,窗口上沿的负压区域有所减少,最大正压为 0.04 Pa ,最大负压为 -0.1 Pa ;当送风角度为 15° 时,窗口上沿区域及周边区域出现了正压区域,最大正压为 0.06 Pa ,窗口的下半部位出现了负压区域,最大负压为 -0.09 Pa ;当送风角度为 30° 时,窗口处负压区域有所增大,正压区域改变不明显,压强为 0 的区域

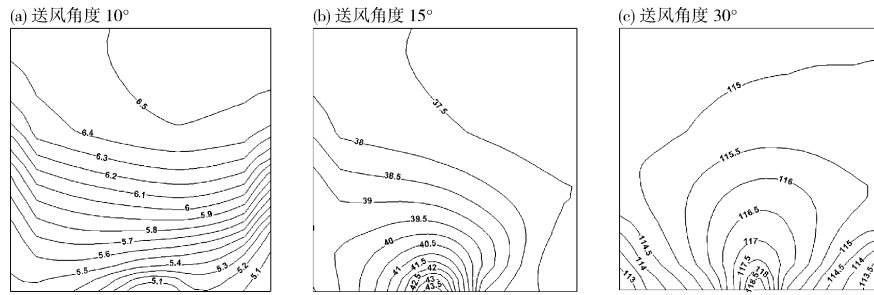


图 8 不同送风角度下 $Y=0.3\text{ m}$ 处的 NO_2 质量浓度分布 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fig. 8 Distribution of NO_2 mass concentration when $Y=0.3\text{ m}$ under different air supply angles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

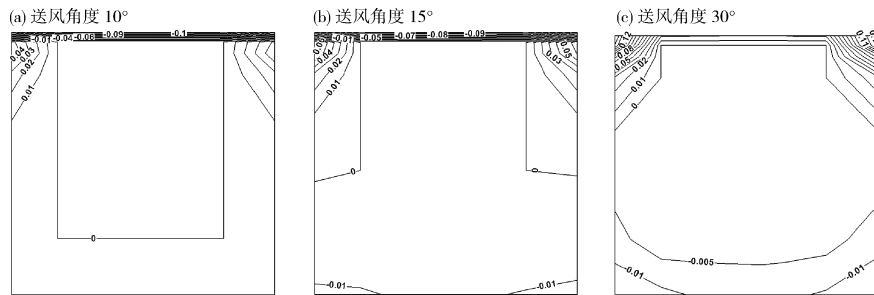


图 9 不同送风角度下收费窗口处的压强分布 (Pa)

Fig. 9 Distribution of pressure at toll window under different air supply angles (Pa)

有所减小,区域内最大正压为 0.14 Pa ,最大负压为 -0.01 Pa 。结果表明:当送风角度为 10° 时,窗口两侧边缘靠上区域处的正压值有所增大,导致外界空气进入量减少, $Y=1.5\text{ m}$ (窗口处)送风角度 10° 时的 NO_2 质量浓度较 0° 、 5° 时有所减少;在送风角度为 15° 、 30° 时,空气幕产生的气流由窗口上半区域处对外界空气进行挤压,受挤压的空气经由窗口下部区域流入收费亭内,窗口下部区域出现负压。送风角度越大,受挤压空气位置越靠上,外界空气扩散进入收费亭的区域就越大,故当送风角度为 15° 、 30° 时空气幕抑制效果有所下降。

2.4 收费亭外污染物浓度变化对空气幕使用效果的影响

实际收费站空气中污染物浓度是动态变化的,为研究在收费亭外污染物浓度增高的情况下,空气幕是否仍能够起到抑制污染物进入收费亭的作用,通过改变收费亭外空气中 NO_2 质量浓度,分析在亭外污染物浓度增大情况下空气幕的阻隔效果。从相关实测数据^[4,7,10]中选取亭外 NO_2 最大值 $2\ 990\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 进行验证计算。

在收费亭外空气中 NO_2 质量浓度增加的情况下,不使用空气幕时,由于收费亭外污染气体会通

过收费窗口扩散进入收费亭,使得亭内空气中的 NO_2 质量浓度不断升高;当亭外 NO_2 质量浓度为 $2\ 990\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,未使用空气幕时,收费亭内 NO_2 质量浓度为 $2\ 490\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,为安全限值的 31 倍;使用空气幕后,收费亭内 NO_2 质量浓度降至 $44\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,同比减少了 $2\ 446\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,降幅达到了 98%。因此,在收费亭外污染加重、污染物浓度增加的情况下,空气幕仍能起到抑制污染物侵入收费亭内的效果。

3 结论

(1) 空气幕可有效抑制污染物进入收费亭,相比不使用空气幕情况,空气幕送风速度为 1.0 m/s 时,收费亭内 NO_2 质量浓度降低了 $257\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(2) 在送风角度为 0° (竖直向下) 时,随着送风速度的增加,抑制效果有所增加,当送风速度达到 2.0 m/s 时,继续增大送风速度对抑制效果的提升不明显。

(3) 空气幕送风角度对抑制 NO_2 进入收费亭的效果有一定影响,保持送风速度 1.0 m/s 不变,送风角度为 0° 、 5° 、 10° 时,空气幕能起到较好的抑制作用,当送风角度继续增大至 15° 、 30° 时,抑制效果有所降低。

[参考文献]

- [1] 周慧敏. 公路收费亭内空气环境模拟及质量评价[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [2] MAO B H, CHEN H B. Sustainability analysis of Chinese transport policy[J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2001, 8(4): 323 - 336.
- [3] FAKAYODE S O, OLU-OWOLABI B I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osogbo, Nigeria; its relationship to traffic density and proximity to highways[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44: 150 - 157.
- [4] 黄振依, 潘金城, 吴银娇, 等. 路桥收费站室内空气污染对人体健康影响的调查[J]. *职业卫生与应急救援*, 2006, 24(1): 43 - 44.
- [5] 陈明贵, 王志勇, 潘绥, 等. 高速公路收费亭作业场所职业卫生现状调查[J]. *海峡预防医学杂志*, 2015, 21(6): 6 - 7, 10.
- [6] 薛亮. 高速公路收费站环境影响测试及分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [7] 陈克军, 赵德志, 张兰军. 高速公路环境中 NO₂ 的污染特征分析[J]. *公路交通技术*, 2005(5): 134 - 137.
- [8] DIAB R D, FOSTER S J, FRANÇOIS K, et al. Carbon monoxide levels at a toll plaza near Durban, South Africa[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2005, 3: 91 - 94.
- [9] SAPKOTA A, WILLIAMS D, BUCKLEY T J. Tollbooth workers and mobile source-related hazardous air pollutants; how protective is the indoor environment? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(9): 2936 - 2943.
- [10] 吕阳, 甄先子, 魏晨嘉, 等. 北方公路收费站空气污染特征及健康影响研究——以大连市为例[J]. *暖通空调*, 2017, 47(2): 93 - 96.
- [11] 李全, 崔晓东. 高速公路的发展与交通建筑的物理环境[J]. *经济师*, 1999(5): 46 - 47.
- [12] 杨华, 任清耀, 刘灵芝, 等. 收费亭内个性化通风对抑制污染物侵入作用的数值模拟[J]. *暖通空调*, 2009, 39(10): 41 - 47.
- [13] 刘磊. 采用 PV 技术改善收费亭室内空气品质的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [14] 任清耀, 杨华, 齐承英, 等. 基于个性化送风的公路收费亭内热环境的数值模拟[J]. *河北工业大学学报*, 2008, 37(4): 83 - 89.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

本栏目编辑 谢咏梅

(上接第28页)

[参考文献]

- [1] 黄顺祥. 大气污染与防治的过去、现在及未来[J]. *科学通报*, 2018, 63(10): 895 - 919.
- [2] 高广阔, 王佳书, 吴世昌, 等. 上海市雾霾污染物对人群健康影响的统计研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(6): 17 - 22.
- [3] 杨俊超, 陈志明, 支国瑞, 等. 百色市冬季 PM_{2.5} 传输路径及来源分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2020, 32(1): 23 - 27.
- [4] 莫招育, 杜娟, 刘慧琳, 等. 桂林市冬季大气 PM_{2.5} 中重金属污染物健康风险评估[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(4): 23 - 27.
- [5] 李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 等. 利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1024 - 1034.
- [6] MISHRA D, GOYAL P, UPADHYAY A. Artificial intelligence based approach to forecast PM_{2.5} during haze episodes: A case study of Delhi, India[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 239 - 248.
- [7] LIN K P, PAI P F, YANG S L. Forecasting concentrations of air pollutants by logarithm support vector regression with immune algorithms[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 217(12): 5318 - 5327.
- [8] KUKKONEN J, POHJOLA M, SOKHI R S, et al. Analysis and evaluation of selected local-scale PM₁₀ air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 2759 - 2773.
- [9] DANIEL A V, ISRAEL R R. A wavelet analysis of multiday extreme ozone and its precursors in Mexico city during 2015—2016[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 188: 112 - 119.
- [10] BAI Y, LI Y, WANG X X, et al. Air pollutants concentrations forecasting using back propagation neural network based on wavelet decomposition with meteorological conditions[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(3): 557 - 566.
- [11] 王平, 张红, 秦作栋, 等. 基于 wavelet-SVM 的 PM₁₀ 浓度时序数据预测[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3153 - 3161.
- [12] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014 年中国城市 PM_{2.5} 浓度的时空变化规律[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1720 - 1734.
- [13] 张革新. 重庆市主城区环境空气质量预报系统研究[D]. 重庆: 西南师范大学, 2005: 47 - 86.
- [14] 贾梦唯. 长三角城市大气复合污染变化及其统计预报模式建立[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017: 36 - 42.
- [15] 林承勇. 人工神经网络在预测 PM_{2.5} 浓度中的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 3 - 43.
- [16] 王勇, 刘备, 刘严萍. 基于小波变换的北京、上海等城市 PM_{2.5} 浓度时空演化特征分析[J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 39 - 42.
- [17] 严华生, 万云霞, 邓自旺, 等. 用正交小波分析近年来中国降水气候变化[J]. *大气科学*, 2004, 28(1): 151 - 157.
- [18] 许承娟, 魏健刚, 千勇. 基于小波的合肥市 NO₂ 浓度时间序列分析[J]. *环境科学导刊*, 2017, 36(6): 52 - 57.
- [19] 刘杰, 杨鹏, 吕文生, 等. 基于气象因素的 PM_{2.5} 质量浓度预测模型[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2015, 45(6): 76 - 83.
- [20] 李祥, 彭玲, 邵静, 等. 基于小波分解和 ARMA 模型的空气污染预报研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(8): 110 - 113, 134.