

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-054-07

# 铁路站房公共卫生间通风模式优化研究

江世杰<sup>1</sup> 张雨婷<sup>2</sup> 余涛<sup>1</sup> 马荣江<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

**【摘要】** 铁路站房公共卫生间存在换气次数大、污染物浓度高、通风能耗高等问题。以某铁路站房公共卫生间为例,采用CFD数值模拟方法,分析了下部就近排风+上部排风、顶部下送风+下部就近排风、顶部中送风+下部就近排风三种通风方案下的污染物排除效果。研究表明,采用顶部中送风+下部就近排风时卫生间内污染物浓度最低,此时卫生间内0.9m、1.5m高度污染物均能有效排除,不满足率均小于0.5%;针对顶部中送风+下部就近排风方案进行优化分析,在保证污染物有效排除的前提下,得出换气次数最低可取 $10\text{h}^{-1}$ ,送风量与排风量比值应大于60%,送风速度应小于排风速度。

**【关键词】** 公共卫生间; 通风模式; 气流组织; 污染物

中图分类号 TU834.3+1 文献标志码 A

## Optimization Study on Ventilation Mode for Public Washroom in Railway Station Buildings

Jiang Shijie<sup>1</sup> Zhang Yuting<sup>2</sup> Yu Tao<sup>1</sup> Ma Rongjiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** The public washroom in railway station buildings has problems such as high air change rate, high pollutant concentrations and high ventilation energy consumption. Taking a public washroom in a railway station building as an example, the CFD numerical simulation method is used to analyze the pollutant removal effects of three ventilation schemes: lower nearby exhaust and upper exhaust, top downward supply and lower nearby exhaust, top middle supply and lower nearby exhaust. The results show that when using top middle air supply and bottom nearby exhaust, the concentration of pollutants in the bathroom is the lowest. Pollutants at heights of 0.9 m and 1.5 m in the bathroom can be effectively eliminated, and the dissatisfaction rate is less than 0.5%. Optimization analysis is conducted on the top middle air supply and bottom nearby exhaust scheme. Under the premise of ensuring effective pollutant removal, it is found that the minimum air change rate can be  $10\text{h}^{-1}$ , the ratio of air supply to exhaust should be greater than 60%, and the air supply speed should be less than the exhaust speed.

**【Keywords】** Public washroom; Ventilation mode; Air distribution; Pollutant

## 0 引言

公共卫生间内的主要污染物为硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )、甲硫醇( $\text{CH}_4\text{S}$ )、氨气( $\text{NH}_3$ )、吡啶( $\text{C}_8\text{H}_7\text{N}$ )等,  $\text{H}_2\text{S}$ 有剧毒,  $\text{NH}_3$ 具有很强的刺激性,对人体呼吸

道、眼球有着极大危害<sup>[1]</sup>,并且随着新冠疫情席卷全球,人们对于空气质量的重视程度逐渐上升<sup>[2]</sup>。公共卫生间作为人员流动较大的场所,合理设计通风方案显得尤为重要。

作者简介: 江世杰(1998-),男,在读硕士研究生, E-mail: jiang724619723@163.com

通讯作者: 余涛(1987-),男,博士,副教授,硕士生导师, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-18

目前, 卫生间通风形式可大致分为自然通风、机械排风、机械送风+机械排风三种。有学者<sup>[3]</sup>研究了在自然通风下, 门窗、隔板对卫生间污染物浓度排除的影响。也有学者<sup>[4-6]</sup>研究了机械排风方式对卫生间内污染物浓度的影响, 得出采用侧部排风与顶部排风结合的方式优于单独采用侧部排风。还有学者<sup>[7]</sup>对比了不同的机械送风+机械排风方式, 得出采用上送风下分散排风方式的效果最好。自然通风及机械排风主要通过门窗户补风, 受门、窗户开启面积的影响, 且机械排风通常设有顶部排风口, 空气在人员活动区某处会处于停滞状态<sup>[8]</sup>, 且人员的频繁进出会对空气形成扰动。对于上送下排的方式缺乏污染物排除影响因素的研究, 并且目前卫生间内通风存在换气次数较大的问题, 其换气次数普遍在  $15\text{h}^{-1}$  以上。

针对上述问题, 本文采用 CFD 数值模拟方法, 以某高铁客运站女卫生间为例, 对比分析了下部就近排风+上部排风、顶部侧送风+下部就近排风、顶部中送风+下部就近排风三种通风工况下的污染物排除效果, 提出卫生间排风优化方案, 并研究送排风量比例以及送排风速度对于污染物排除效果的影响。

## 1 数值计算模型

### 1.1 物理模型

以某高铁站房女卫生间为例, 该卫生间尺寸为  $10.9\text{m} \times 6\text{m} \times 5.5\text{m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 其中吊顶距地面高度约  $3\text{m}$ 。共计 18 个隔间, 单个隔间尺寸为  $1.8\text{m} \times 1.2\text{m} \times 2\text{m}$ , 其中隔间之间的隔板底部距离地面  $0.15\text{m}$ , 故隔间底部是相同连通的。卫生间大门敞开, 通过候车厅进行补风, 尺寸为  $2.4\text{m} \times 1.8\text{m}$ , 如图 1 所示。

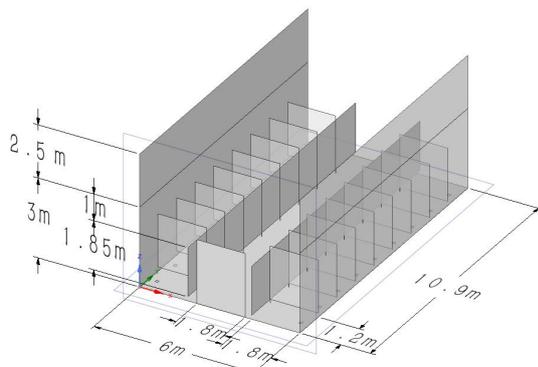


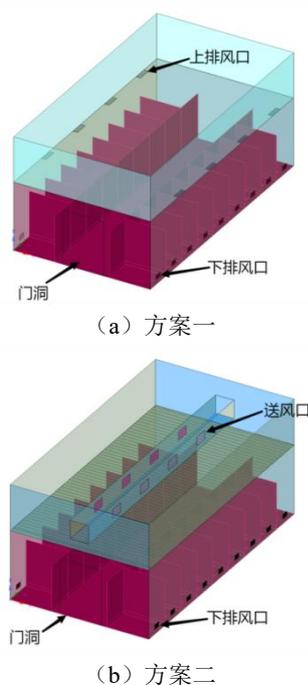
图 1 卫生间三维模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D model of washroom

### 1.2 通风方案

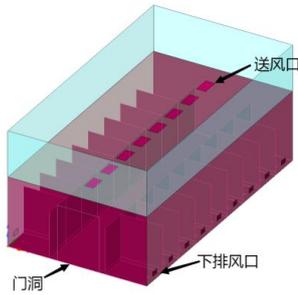
本文通过对比在相同风机风量下传统机械排风、不同上送下排方案对污染物分布的影响, 以研究采用何种方案卫生间内污染物浓度最低, 得出最优通风方案。针对最优方案进行影响因素分析, 在保证污染物有效排除的前提下, 获得在最优方案下最低换气次数、送风量与排风量比例、送风速度与排风速度差异对于污染物分布关系。

方案一采用机械排风+门补风的方式, 下排风口位于每个坑位后侧, 风口中心标高  $0.3\text{m}$ , 尺寸为  $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ , 上排风口位于每两个坑位之间顶部, 上排风口大小为  $0.6\text{m} \times 0.2\text{m}$ , 如图 2 (a) 所示, 其中下排风换气次数取  $15\text{h}^{-1}$ , 风量为  $5400\text{m}^3/\text{h}$ , 上排风换气次数取  $10\text{h}^{-1}$ , 风量为  $3600\text{m}^3/\text{h}$ 。方案二采用顶部侧送风+下部就近排风的方式, 卫生间上部采用密拼吊顶, 侧送风口尺寸  $0.6\text{m} \times 0.4\text{m}$ , 侧送风口将新风送入卫生间上部空间, 通过密拼吊顶板缝隙进入卫生间内, 下排风口设置同方案一, 如图 2 (b) 所示, 风机总风量与方案一保持一致, 上送风量  $3600\text{m}^3/\text{h}$ , 下排风量  $5400\text{m}^3/\text{h}$ 。方案三采用顶中部下送风+下部就近排风的方式, 送风口位于走廊正中, 尺寸为  $0.7\text{m} \times 0.4\text{m}$ , 与吊顶板平齐, 下排风口设置同方案一, 如图 2 (c) 所示, 风机总风量仍与上述方案保持一致, 上送风量  $3600\text{m}^3/\text{h}$ , 下排风量  $5400\text{m}^3/\text{h}$ 。



(a) 方案一

(b) 方案二



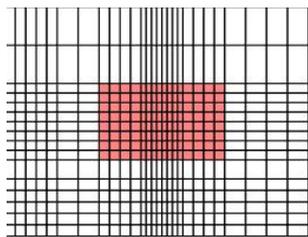
(c) 方案三

图2 各通风方案示意图

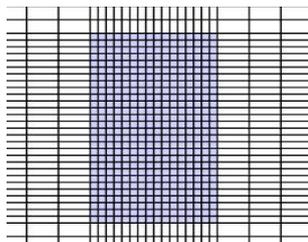
Fig.2 Schematic diagram of each ventilation scheme

### 1.3 网格划分及模型设置

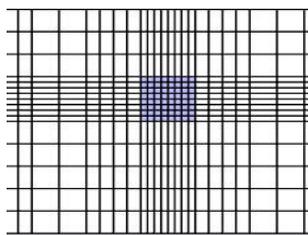
利用 ICEM 软件建立三种通风方案的数值计算模型，采用六面体结构网格，最大网格尺寸为 0.1m，对送风口、排风口、污染源进行局部加密，如图 3 所示，送排风口网格最大尺寸为 0.025m，污染源最大尺寸为 0.0125m，网格总数约 200 万左右。



(a) 排风口



(b) 送风口



(c) 污染源

图3 网格局部加密示意图

Fig.3 Schematic diagram of local grid refinement

利用 Fluent 软件对上述三种通风方案数值模型进行稳态计算求解，湍流模型选用标准  $k-\epsilon$  模型<sup>[9-12]</sup>，选用基于压力基础的隐式求解器，打开组分运输模型，采用 SIMPLE 算法，选用二阶迎风离散格式，假定卫生间空气为不可压缩理想气体，忽略卫生间内辐射换热的影响。

采用 Tung<sup>[13]</sup>等人的实验结果对本文的数值模拟方法进行验证。建立该实验的全尺寸模型，对其中某一工况（房间负压为-2.5Pa，换气次数为 12h<sup>-1</sup>）进行数值模拟，并对实验 9 个测点进行对比分析。

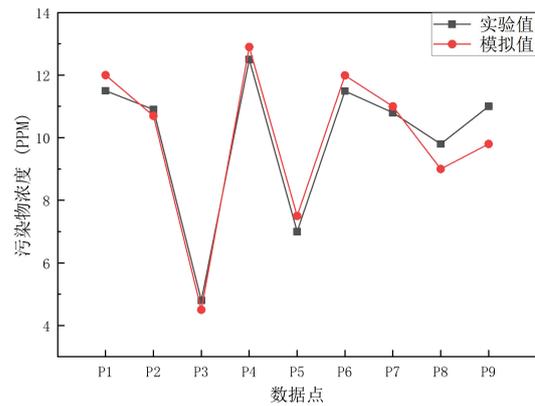


图4 模拟值与实验值对比

Fig.4 Comparison of simulated and experimental results

由图 4 可以看出，九个点污染物浓度的模拟值与实验值基本一致，其中 P9 点的误差最大为 10.9%，P2 点的误差最小为 1.8%，整体而言平均误差为 2.5%，为可接受范围内，说明本文能够采用标准  $k-\epsilon$  模型来研究卫生间内污染物分布情况。

### 1.4 边界条件

结合卫生间实际情况，假定便池同时散发 H<sub>2</sub>S 及 NH<sub>3</sub> 两种污染物，吉少杰<sup>[3]</sup>、李程<sup>[7]</sup>等人将污染源简化为室内送风口，本文亦将污染源视为室内送风口，同时送入 NH<sub>3</sub> 及 H<sub>2</sub>S。假定污染源送风口尺寸为 0.1m×0.1m，设置为质量流量入口，其中 NH<sub>3</sub> 扩散速度为 2×10<sup>-8</sup>kg/s，H<sub>2</sub>S 扩散速度为 1.4×10<sup>-9</sup>kg/s。送风口、排风口设置为速度入口，壁面设置为绝热边界条件，门设置为压力入口。

### 1.5 污染物浓度评价指标

《公共厕所卫生规范》(GB/T 17217-2021)<sup>[14]</sup>规定了卫生间内 NH<sub>3</sub> 及 H<sub>2</sub>S 限定值，其中 NH<sub>3</sub> 浓度小于等于 0.3mg/m<sup>3</sup>，H<sub>2</sub>S 浓度小于等于

0.01mg/m<sup>3</sup>。本文采用人体呼吸区( $z=0.9\text{m}$ 和 $z=1.5\text{m}$ 截面)NH<sub>3</sub>及H<sub>2</sub>S浓度来评价公共卫生间内污染物分布。为直观分析卫生间污染物浓度高于《公共厕所卫生规范》(GB/T 17217-2021)限定值所占区域面积大小,本文将浓度过高区域面积与卫生间地板面积之比定义为污染物浓度不满足率。

## 2 不同通风方案模拟结果分析

由于NH<sub>3</sub>与H<sub>2</sub>S扩散趋势相同,为减少篇幅,本文仅给出NH<sub>3</sub>质量分数,结果如图5—图7。从污染物角度分析,方案一由于内外压差过大的影

响,使得污染物由门渗透风吹散,卫生间内污染物浓度过高,不满足率过大,污染物无法有效排除。方案二部分新风贴壁直接被排风口排出,造成短路,但此时1.5m高处大部分区域NH<sub>3</sub>能够有效排除,NH<sub>3</sub>不满足率为1.4%,最大值浓度为0.71mg/m<sup>3</sup>;但0.9m高处NH<sub>3</sub>浓度仍过高,NH<sub>3</sub>不满足率为8.1%,最大值浓度为1.01mg/m<sup>3</sup>,远高于限定值。方案三1.5m高及0.9m高处NH<sub>3</sub>能够有效排除,此时1.5m和0.9m高处不满足率均为0%,最大值浓度为0.018mg/m<sup>3</sup>,仅略高于规范限定值。

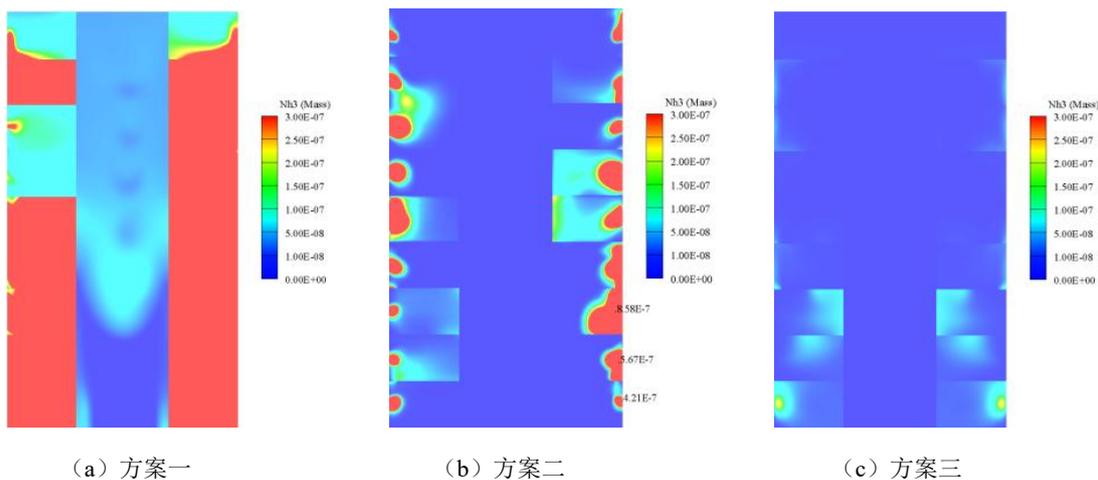


图 5 不同方案下 0.9m 高处 NH<sub>3</sub> 质量分数

Fig.5 NH<sub>3</sub> mass fraction at a height of 0.9 m under different schemes

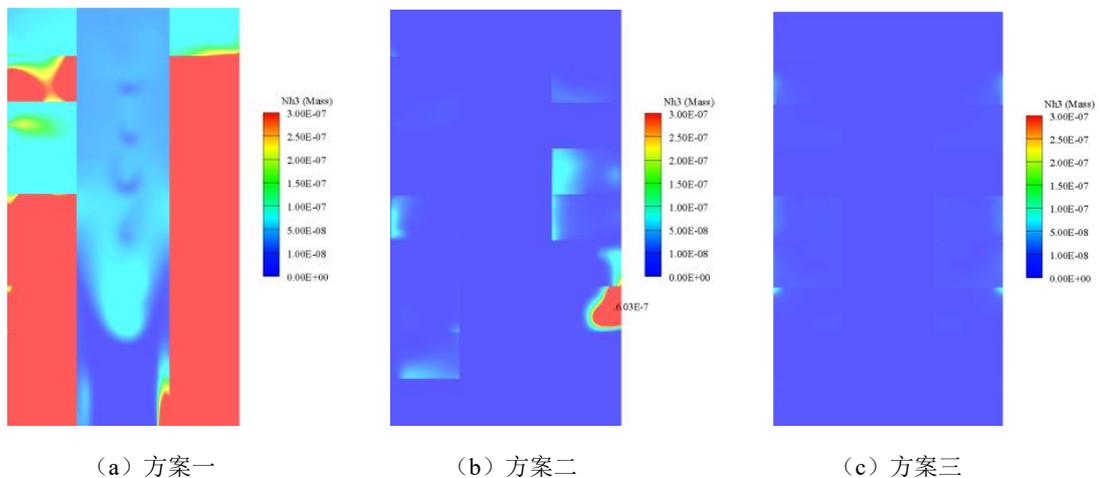


图 6 不同方案下 1.5m 高处 NH<sub>3</sub> 质量分数

Fig.6 NH<sub>3</sub> mass fraction at a height of 1.5 m under different schemes

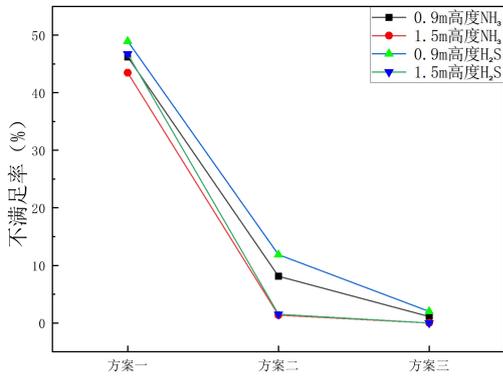


图7 不同方案下不满足率

Fig.7 Dissatisfaction rate under different schemes

不同方案下的空气龄结果如图8所示。从空气龄角度分析,方案一与方案三平均空气龄最小,约40s,方案二平均空气龄最大,约50s。三种方案风机总能耗相同,但方案一换气次数已达25h<sup>-1</sup>,卫生间内负压较大,方案二与方案三换气次数为15h<sup>-1</sup>,但方案二空气龄相对较高。

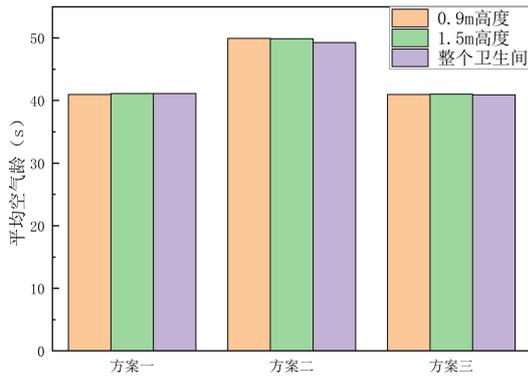


图8 不同方案下空气龄

Fig.8 Air age under different schemes

综上所述,结合卫生间内污染物排除情况以及空气龄角度分析,采用方案三时卫生间内可获得较好的排污效果,0.9m及1.5m高度处污染物均能有效排除,且平均空气龄较小。

### 3 方案三污染物排除影响因素分析

通过对比三种通风方案,得出采用方案三时卫生间内污染物不满足率最低,污染物能够有效排除。本文将进一步分析方案三污染物排除效果的影响因素,研究在不同换气次数、不同送排风量比例、不同送回风速度对污染排除效果影响,获得方案三的最优配置。

### 3.1 不同换气次数对污染物排除效果的影响

本节将研究在保证卫生间内污染物浓度能够有效排除的前提下的最低换气次数。对比排风次数为15h<sup>-1</sup>、12h<sup>-1</sup>、10h<sup>-1</sup>,送排风量比例为2:3时,卫生间内H<sub>2</sub>S及NH<sub>3</sub>分布情况,结果如图9和图10。

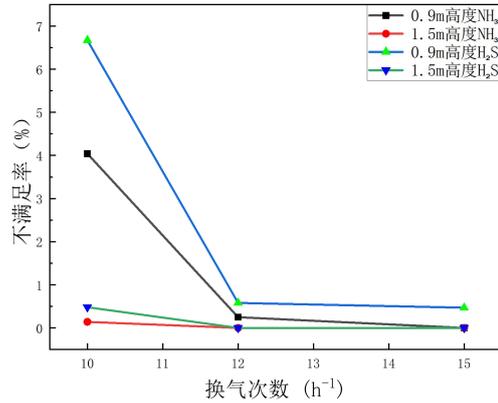


图9 不同换气次数下不满足率

Fig.9 Dissatisfaction rate under different air change rates

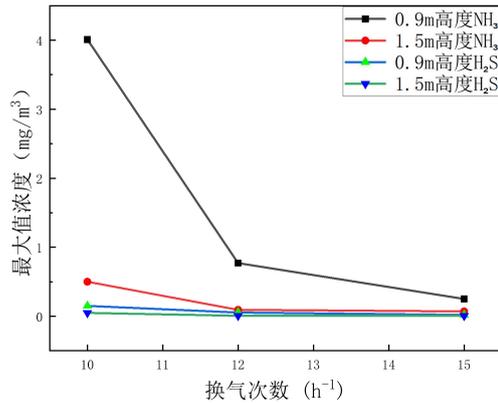


图10 不同换气次数下最大值浓度

Fig.10 Maximum concentration under different air change rates

在相同的送排风量比下,随着换气次数的增加,卫生间内NH<sub>3</sub>及H<sub>2</sub>S的最大值浓度及不满足率逐渐降低。当换气次数达到12h<sup>-1</sup>,0.9m高及1.5m高污染物不满足率均小于1.5%,0.9m高处部分区域污染物浓度略高于规范限定值,此时0.9m高度NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S最大值浓度分别为0.77mg/m<sup>3</sup>和0.053mg/m<sup>3</sup>,1.5m高处污染物浓度均小于规范限定值,此时NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S最大值浓度分别为0.093mg/m<sup>3</sup>和0.0065mg/m<sup>3</sup>。当换气次数为10h<sup>-1</sup>,NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S最大质量浓度较大,0.9m高处不满足率相对较高,其中NH<sub>3</sub>不满足率为4.0%,最大值浓度为4.01mg/m<sup>3</sup>,H<sub>2</sub>S不满足率为6.7%,最大值

浓度为  $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ 。1.5m 高处  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的不满足率分别为 0.14% 和 0.48%，最大值浓度分别为  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$  和  $0.048\text{mg}/\text{m}^3$ ，均略大于规范限定值。虽然换气次数为  $10\text{h}^{-1}$  时，0.9m 高度处污染物浓度较高，但是在 1.5m 高度处几乎可以排除，极少部分区域浓度高于规范限定值。因此，认为换气次数大于  $10\text{h}^{-1}$  时，卫生间可获得较好的通风效果。

### 3.2 不同送风量对污染物排除效果的影响

本节将对在排风次数  $12\text{h}^{-1}$  时，保持送风口大小不变，仅改变送风量大小，即在送风次数为  $6\text{h}^{-1}$ 、 $7\text{h}^{-1}$ 、 $8\text{h}^{-1}$ 、 $9\text{h}^{-1}$ 、 $10\text{h}^{-1}$  时，以得到在送风量比例变化下，卫生间内  $\text{NH}_3$  及  $\text{H}_2\text{S}$  浓度变化情况，结果如图 11 和图 12。

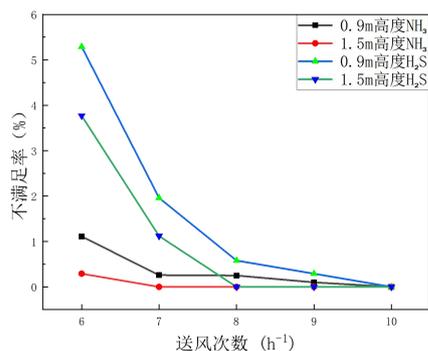


图 11 排风  $12\text{h}^{-1}$  时的不满足率

Fig.11 Dissatisfaction rate under exhaust air volume of 12 ACH

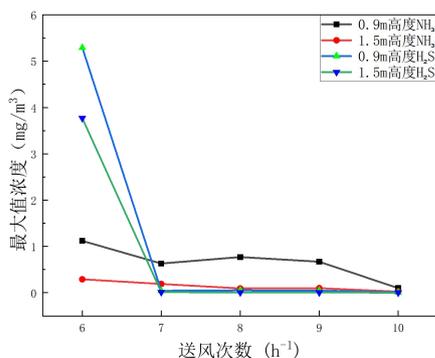


图 12 排风  $12\text{h}^{-1}$  时的最大浓度

Fig.12 Maximum concentration under exhaust air volume of 12 ACH

在换气次数为  $12\text{h}^{-1}$ ，随着送风次数增加，从门处的补风量降低，其不满足率及最大值浓度均逐渐降低，当送风次数从  $6\text{h}^{-1}$  变化到  $7\text{h}^{-1}$  时，污染物不满足率及最大值浓度变化明显，送风次数为  $6\text{h}^{-1}$  时，大部分区域污染物浓度过高，不满足率均过大，

且最大值浓度高于规范限定值，不满足率均过大。送风次数为  $7\text{h}^{-1}$  时，0.9m 高及 1.5m 高处污染物不满足率均小于 2%，此时 0.9m 高处  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  最大值浓度分别为  $0.62\text{mg}/\text{m}^3$  和  $0.043\text{mg}/\text{m}^3$ ，略高于规范限定值。1.5m 高处  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  最大值浓度分别为  $0.19\text{mg}/\text{m}^3$  和  $0.013\text{mg}/\text{m}^3$ ，基本符合规范要求。

因此，当送排风比例大于 0.6，卫生间内污染物浓度能够得到有效控制，且随送排风比例增大，卫生间内污染物不满足率及最大浓度值逐渐降低。送排风比例小于 0.6 时，卫生间内外压差过大，以至由门渗透风量将污染物吹散，污染物形成扩散。

### 3.3 送排风速度对污染物排除效果的影响

现保证送排风比例、排风速度不变，通过改变送风口大小，即改变送风速度，以研究不同送排风速度对卫生间内污染物浓度影响。以送风量：排风量为 2:3 作为基准，对比在换气次数  $12\text{h}^{-1}$ 、送风速度与排风速度比分别为 1.5:1、1:1、1:2、1:3、1:4、1:5 时室内污染物浓度变化，结果如图 13。

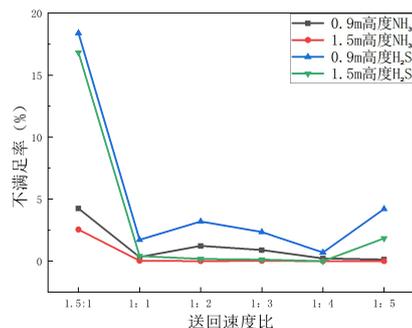


图 13 不同送排风速度比下的不满足率

Fig.13 Dissatisfaction rate under different ratios of air supply and exhaust speed

在送排风速度比为 1.5:1 时，0.9m 及 1.5m 高处污染物浓度均过高，其不满足率远高于限定值。在送风速度小于等于排风速度时，1.5m 和 0.9m 高大部分区域  $\text{NH}_3$  均满足规范要求，0.9m 高处  $\text{H}_2\text{S}$  不满足率相对较高，但在 1.5m 高处， $\text{H}_2\text{S}$  仍能有效排除。因此，送风速度在小于等于排风速度时排污效果较优。

## 4 结论

本文采用 CFD 数值计算方法对某铁路站房公共卫生间三种通风方案下污染物排除情况进行对比分析，并对污染物排除效果最佳方案的影响因素开展进一步研究，获得如下结论：

(1)采用顶部中送风+下部就近排风的通风方式,可获得较好的污染物排除效果,0.9m和1.5m高处污染物均能有效排除。

(2)采用顶部中送风+下部就近排风的通风方式,在保证污染物能够有效排除的前提下,随着换气次数的增大,污染物排除效果更好,不满足率逐渐降低,卫生间换气次数应大于 $10\text{h}^{-1}$ 。

(3)在排风量不变的前提下,随着送风量增大,污染物排除效果更好,不满足率及最大值浓度也随之降低,送风量与排风量比值应大于0.6。

(4)当送风速度大于排风速度时,污染物排除效果差,此时不满足率过高;当送风速度小于等于排风速度时,污染物浓度变化不大,送风速度应小于等于排风速度。

#### 参考文献:

- [1] 吴子敬,王雪峰.卫生间有害气体检测及排风方案设计[J].轻工科技,2014,30(12):80-81.
- [2] Alves C A, Vicente E D, Evtyugina M, et al. Cooking activities in a domestic kitchen: Chemical and toxicological profiling of emissions[J]. Science of the Total Environment, 2021,772:145412.
- [3] 吉少杰,茅靳丰.自然通风条件下卫生间污染物浓度研究[J].洁净与空调技术,2012,(4):22-24.
- [4] 曾雅娴.公共卫生间点源氨污染分布研究及通风控制[D].广州:广州大学,2021.
- [5] 赵民,郭亚磊.公共建筑卫生间排风模拟优化分析[J].暖通空调,2023,53(2):76-81.
- [6] 赵金罡,于靖华,田利伟,等.某铁路旅客站房卫生间排风系统优化设计研究[J].洁净与空调技术,2019,103(3):11-15.
- [7] 李程,王如竹,陆紫生,等.公共卫生间通风气流组织及室内环境研究[C].中国制冷学会2009年学术年会论文集,2009.
- [8] 任海霞.公共卫生间通风设计探讨[J].砖瓦,2020,(4):73,75.
- [9] Launder B E, Spalding D B. Lectures in Mathematical Model of Turbulence [J]. New York: Academic Press, 1972.
- [10] 李先庭,赵彬.室内空气流动数值模拟[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [11] 王晨辉.公共建筑卫生间污染物扩散及通风控制数值模拟[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [12] 汪洋,周颖,代立.高层建筑公共卫生间 $\text{NH}_3$ 浓度分布数值模拟及补风优化[J].暖通空调,2016,46(11):123-128.
- [13] Tung Y C, Hu S C, Tsai T I, et al. An experimental study on ventilation efficiency of isolation room[J]. Building and Environment, 2009, 44(2):271-279.
- [14] GB/T 17217-2021,公共厕所卫生规范[S].北京:中国质检出版社,2021.
- [27] Miladinova S, Lebon G. Effect of nonuniform heating and thermocapillarity in evaporating films falling down an inclined plate[J]. Acta mechanica, 2005,174(1-2):33-49.
- [28] Ribatski G, AM Jacobi. Falling film evaporation on horizontal tubes—A critical review. International Journal of Refrigeration, 2005,28(5):635-653.
- [29] W F, S S. Evaporation of pure liquids with increased viscosity in a falling film evaporator[J]. Heat Mass Transfer, 2009,4(5):1037-1046.
- [30] WH Lee. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling[R]. Technical Report LA-UR 79-975, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1979.
- [31] KIM Y, CHOI J, KIM S, et al. Effects of mass transfer time relaxation parameters on condensation in a thermosyphon [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015,29(12):5497.
- [32] 李维平,李隆键,崔文智,等.液冷系统中均热板气液相变的热质传输模拟[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(7):96-103.
- [33] 蒋淳,陈振乾.水平管外降膜蒸发流动和传热特性数值模拟[J].化工学报,2018,69(10):4224-4230.
- [34] 靳蒲航,赵创要,刘霖鑫,等.R410A在水平光滑单管外降膜蒸发实验研究[EB/OL].[2018-5-6].

(上接第46页)