

基于 Pearson 评价法的室内污染源辨识研究

于 水,贺廉洁,于知田,冯国会

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 从室内污染物的时空分布特性出发,提出基于 Pearson 评价法的室内污染源辨识策略,从而快速准确辨识室内污染源. 方法 以 Pearson 相关系数作为辨识指标以及得分率作为辨识结果的评价标准,先采用控制变量法对 Pearson 评价法的辨识有效性进行验证,作为后续研究开展的基础,再基于 Pearson 相关系数指标,对室内 16 个不同位置的污染源展开位置辨识. 结果 最终有 15 个污染源的位置辨识结果准确;辨识效果与辨识时段的选取有关;在 0~200 s 的统计区间内,整体辨识效果呈现先升高,后略微下降并趋于稳定的趋势;辨识效果最好的时段出现在 $\tau = 80 \sim 120$ s,此段时间内的平均辨识得分率高达 94.375%;在位置辨识准确的前提下,通过计算线性回归方程的斜率完成了对污染源散发强度的辨识,辨识误差保持在 ± 0.005 g/s 的可控范围内. 结论 Pearson 评价法可以实现对污染源的位置和散发强度的有效辨识.

关键词 污染源辨识;反问题;Pearson 相关系数;线性拟合;释放强度

中图分类号 TK529

文献标志码 A

Study on Pollution Source Identification Based on Pearson Evaluation Method

YU Shui, HE Lianjie, YU Zhitian, FENG Guohui

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Based on the temporal and spatial distribution characteristics of indoor pollutants, an indoor pollution source identification strategy based on Pearson evaluation method was proposed. The Pearson correlation coefficient is used as the identification index, and the scoring rate is used as the evaluation criterion of identification results. First, the validity of Pearson correlation coefficient method is verified by the control variable method, which is the basis for further research. Then, based on the Pearson correlation coefficient, the position identification of 16 different locations of the pollution sources was carried out, and finally, 15 pollution sources were accurately identified. It is also found that the identification effect is related to the selection of the time period. In the

收稿日期:2017-09-18

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51378318);中国博士后基金项目(2015M581362);辽宁省自然科学基金项目(20170540760)

作者简介:于水(1983—),女,副教授,博士,主要从事建筑室内环境空气质量保障技术研究.

statistical range of 0 – 200 s, the overall identification effect increased firstly, then decreased slightly and gradually stabilized. The best identification effect happened in the 40 s between $\tau = 80$ s and $\tau = 120$ s, and the average score of the identification rate between this time period is as high as 94.375. Finally, under the precondition of accurate location identification, based on the slope of the linear regression equation, the emission intensity of pollutant sources can be identified, and the identification error is kept within the controllable range of 0.005 g/s. The results show that the Pearson correlation coefficient method can effectively identify the location and emission intensity of pollution sources.

Key words: pollution source identification; inverse problem; Pearson correlation coefficient; linear fitting; release intensity

近年来,随着室外环境的恶化,人们越来越关注到建筑的密封性,从而可能助长人居环境内突发性污染事件爆发的可能性,导致严重污染状况。因此急需研究一种有效的方法或手段可以在有限的远程传感器数据输入端的情况下帮助辨识潜在的污染源。已知污染物质量浓度信息来求解污染源的问题属于反问题范畴。纵观国内外的相关研究,反问题理论已经广泛应用于地下水源^[1]、土壤源^[2]、声源^[3]、热源^[4]、大气环境^[5]等方面的研究分析中,而对建筑室内污染源的研究虽然起步较晚,但随着人们近年对室内空气质量(IAQ)的逐渐重视,也得到了迅速发展。室内污染源的研究方法大体分为三类:直接求解法、概率法和优化法。

直接求解法即后向算法,是将污染物传播的控制方程中的时间步长或者流场取反方向,再现污染物传播的历史,最后辨识出污染源。ZHANG T 等^[6-7]分别采用了准可逆和伪可逆方法解决气体污染物的反问题传播。之后,ZHANG T 等^[8]分别建立准可逆方法和伪可逆方法(通过建立一个逆拉格朗日模型)来反问题追踪大气颗粒污染物。研究表明,两种方法均能较好地辨识出污染源的释放位置。穆小红^[9]则改变了颗粒污染物主要作用力的方向,使颗粒物在机舱内逆向传输,之后通过对比反向历程轨迹与正向轨迹,从而确定污染源的位置。

概率法又可分为传统概率法、联合状态

概率法和统计归纳方法。传统概率法以贝叶斯推理为基础,其核心是使用条件概率来量化某个污染源存在的可能性。SOHN M 等^[10]与 SREEDHARAN P 等^[11]使用了相对简单的多区域模型,分别应用贝叶斯概率法来对一栋建筑物内的污染源进行研究。王如峰^[12]采用了遍历方法结合最小二乘法达成了一个完整的一维污染源辨识系统,其结果以概率的形式表示。庞丽萍等^[13]提出了联合使用卡尔曼滤波和最小二乘法的舱室突发污染源辨识与浓度预测方法,并提出了基于概率法的突发污染源定位方法研究。魏传峰等^[14]对三维空间内的持续污染源,也提出了基于概率法的突发污染源定位方法,并利用单传感器的观测数据实现三维空间内的突发持续污染源辨识。联合状态概率法对表示污染源信息的概率位置函数与概率传播时间函数进行推导,并且把探测到污染源释放的传感器当成某种“污染源”,通过反向求解来获得实际污染源在某个特定位置存在的可能性。在此基础上,LIU X 等^[15-16]又形成了一系列的理论和方法对不同环境下释放时间已知的单个瞬时污染源进行位置辨识。

优化法的实际求解方法与求解正问题类似。优化法假设所有可能存在的污染源信息为已知,然后通过求解污染物传播控制方程计算出所在传感器位置的浓度信息,最后通过数学优化的方法得到每个潜在污染源浓度信息与实际观测浓度的匹配度。优化法常常

与规整化方法联合使用以提高求解效率. ZHANG T 等^[17]首次采用优化法结合经典的 Tikhonov 正则化策略来定量辨识室内气态污染源的非稳态释过程,并获得了与实际释过程较高的匹配度,表明该模型在实际工程中具有通用性. VUKOVIC V 等^[18]曾基于多次 CONTAM 多区域模拟的结果建立的神经网络模型,对 9 个室内空间内的污染源进行探测. BASTANI A 等^[19]也采用了人工神经网络结合多区域污染物传播模型 CONTAM,并对有限个传感器读数条件下的污染源位置辨识进行研究.

综合国内外研究现状来看,目前关于室内污染源辨识的研究工作已有很多成果,但仍有很多基础和实际工程应用的问题有待进一步解决,已有研究尚存在如下问题:①当前国内外的源辨识场景较为单一;②当前的源辨识大多仅围绕一个单独的污染源进行,多个污染源的求解研究尚不深入,仅利用优化策略做到一维和二维空间的位置辨识,而且精度较差;③面对复杂多变的室内环境,直接法计算负荷较大,时间成本高且求解精度不能保证,因而概率法和优化法在实际应用中更可以发挥作用. 基于此,笔者利用优化法辨识策略,试图建立一个更加简洁明了的辨识指标,简化辨识过程,提高效率,推动源辨识工作向实际应用更进一步.

1 污染源辨识方法

1.1 辨识指标 – Pearson 相关系数

Pearson 评价法是一种准确度量两个变量之间的关系密切程度的统计学方法^[20-22]. 对于变量 x 和 y , 分别可通过实验或模拟得到两组数据,记为 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \cdots, n)$, 则相关系数的数学表达式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: \bar{x} 、 \bar{y} 分别是 n 个数据的均值. 相关系数 r 的取值范围为 $[-1, 1]$. $|r|$ 越接近于 1, 则表明 x 与 y 线性相关程度越高. 其中, 若 $r = -1$, 表明 x 和 y 之间为完全负线性相关的关系; 若 $r = +1$, 表明 x 和 y 之间为完全正线性相关的关系; 若 $r = 0$, 表明 x 和 y 之间不存在线性相关关系.

由于室内非稳态流场作用,不同位置的污染源所形成的污染物质量浓度空间动态分布也不同. 假设当其他条件不变,仅改变污染源的散发强度时,不同强度的污染源散发的污染物质量浓度动态分布是相对不变的. 即两个污染源的位置越接近,同一传感器所接收到的两组污染物质量浓度数据的相关性越高,且相关性不会随着污染源强度的改变而变化. 笔者将通过模拟数据对该假设的合理性进行验证.

1.2 辨识评价方法

为了合理评价辨识效果的好坏,结合辨识结果的名次和 CR 指标的数值大小提出的评价得分的分配方案如表 1 所示.

表 1 辨识效果评价得分方案
Table 1 Scoring scheme for identification effect evaluation

| 排名 | CR | 得分 |
|----|-----------------|-----|
| 1 | $\geq 0.999\ 5$ | 5.0 |
| | < 0.9995 | 4.5 |
| 2 | $\geq 0.999\ 5$ | 3.0 |
| | $< 0.999\ 5$ | 2.5 |
| 3 | $\geq 0.999\ 5$ | 1.0 |
| | $< 0.999\ 5$ | 0.5 |
| 其他 | — | 0 |

如果某工况下的总得分为 T ,潜在污染源的数量为 N ,那么此时的得分率用 η 表示, 定义为

$$\eta = \frac{T}{5N} \times 100\% \quad (2)$$

2 实例研究

2.1 模型建立

利用 CFD 验证辨识策略的有效性,首先

建立一个三维房间模型,房间的长(X)宽(Y)高(Z)分别为 $6\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$. 基于所建模型的尺寸,把房间划分为 16 个控制体,其中在 X 轴方向上分为四部分,在 Y 轴和 Z 轴方向上分为两部分. 房间模型如图 1 所示.

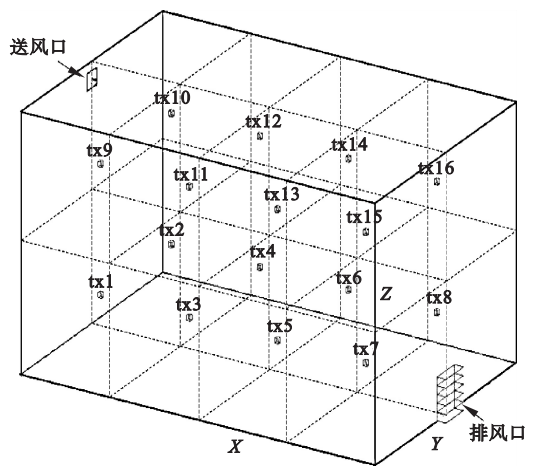


图1 房间模型结构

Fig. 1 Room model structure

- 为提高计算效率,对模型进行以下简化.
- (1)忽略室内外的热交换过程,包括地板和天花板在内的全部围护结构均设置为绝热表面;
 - (2)在模拟过程中,门窗始终处于关闭状态;
 - (3)室内无其他物体模型,无内热源.

房间采用异侧上送下回的机械通风形式,送风口尺寸为 $0.2\text{ m}(Y) \times 0.3\text{ m}(Z)$,风速为 0.5 m/s ,送风温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,送风污染物质量浓度为零,即污染物的来源仅为室内污染源. 出风口尺寸为 $0.5\text{ m}(Y) \times 0.5\text{ m}(Z)$. 假设每个区域内均有可能存在污染源,即房间内一共有 16 个潜在的污染源位置,各控制体的体心坐标见表 2.

生成非结构网格,并在送风口、排风口处对网格进行局部细化. 在求解过程中采用有限容积法的离散方法,并采用两方程(标准 $k-\varepsilon$)模型求解三维稳态下的不可压缩黏性流体的湍流流动,近壁面区域的网格计算采用壁面函数法. 同时采用 SIMPLE 算法进行

速度分量和压力方程的分离式求解计算.

表2 各个控制体的体心坐标

Table 2 Body center coordinates of each control body

| 体心 | 坐标(x,y,z) | 区域 |
|---------------|----------------|----|
| α_1 | (0.75,0.75,-1) | 1 |
| α_2 | (0.75,0.75,-3) | 2 |
| α_3 | (2.25,0.75,-1) | 3 |
| α_4 | (2.25,0.75,-3) | 4 |
| α_5 | (3.75,0.75,-1) | 5 |
| α_6 | (3.75,0.75,-3) | 6 |
| α_7 | (5.25,0.75,-1) | 7 |
| α_8 | (5.25,0.75,-3) | 8 |
| α_9 | (0.75,2.25,-1) | 9 |
| α_{10} | (0.75,2.25,-3) | 10 |
| α_{11} | (2.25,2.25,-1) | 11 |
| α_{12} | (2.25,2.25,-3) | 12 |
| α_{13} | (3.75,2.25,-1) | 13 |
| α_{14} | (3.75,2.25,-3) | 14 |
| α_{15} | (5.25,2.15,-1) | 15 |
| α_{16} | (5.25,2.15,-3) | 16 |

2.2 相关系数指标的合理性验证

首先需验证假设的合理性,从而为 Pearson 评价法的后续应用奠定理论基础. 通过控制变量法改变室内污染源散发过程中的某一工况,观察相关系数的变化情况,确定相关系数的影响因素.

2.2.1 距离的变化对相关系数的影响

假设房间内 A 点存在污染源 α_1 ,坐标为 (0.75,0.75,-1). 另有污染源 α_2 ,其可能存在的位置有四个,分别位于房间内 B 点 (0.65,0.65,-1)、 C 点 (2.25,0.75,-1)、 D 点 (3.75,0.75,-1) 和 E 点 (5.25,0.75,-1). 污染源 α_1 和 α_2 的散发强度统一设定为 $S=0.1\text{ g/s}$. 室内安放一个传感器 β ,位置坐标为 (0.2,2.7,-1). 通过 Airpak 模拟计算污染物在从各个控制体的体心位置开始散发后,一段时间内的非稳态质量浓度场. 数值计算的时间步长为 0.5 s ,总时长取 200 s . 模拟结束后,分别读取传感器 β 位置处 200 s 内的污染物质量浓度数据,间隔为 0.5 s . 其中,污染源 α_1 散发的污染物质量浓度数据记

作 $C_i^* (i=1,2,\cdots,401)$, 污染源 α_2 散发的污染物质量浓度数据记作 $C_i (i=1,2,\cdots,401)$.

对于污染源 α_1 和 α_2 , 各自的质量浓度数据记为 $(C_i^*, C_i) (i=1,2,\cdots,401)$, 二者相关系数记作 CR , 其数学表达式为

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^{401} (C_i^* - \bar{C}^*) (C_i - \bar{C})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{401} (C_i^* - \bar{C}^*)^2 \sum_{i=1}^{401} (C_i - \bar{C})^2}}. \quad (3)$$

当污染源 α_2 分别位于 $B、C、D、E$ 点时, 分别代入式(3)求解其与污染源 α_1 的 Pearson 相关系数 CR , 绘制散点图, 并进行线性拟合. α_1 与不同位置 α_2 的相关系数拟合曲线如图 2 所示.

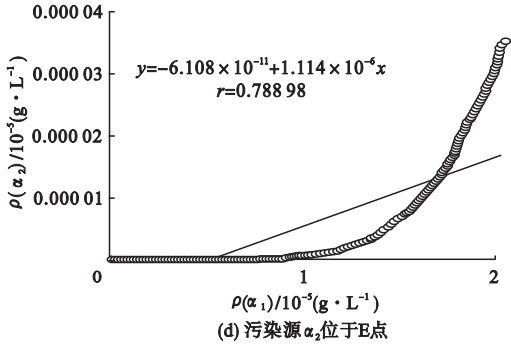
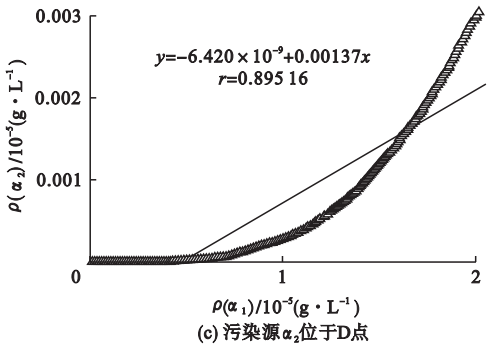
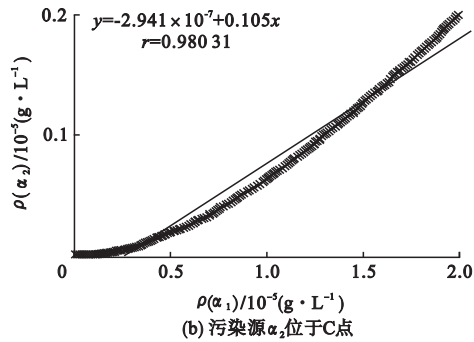
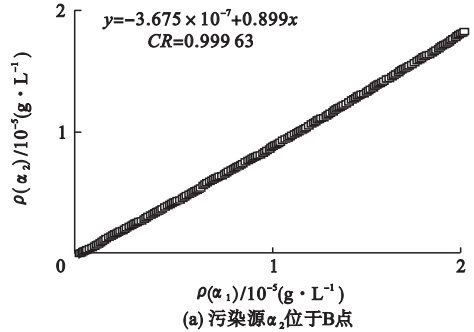


图 2 α_1 与不同位置 α_2 的拟合曲线

Fig. 2 The fitting curve between α_1 and α_2 in different positions

从图 2 的线性拟合结果可以看到, 当污染源 α_2 位于距离 A 点最近的 B 点时, 与污染源 α_1 的最具线性相关性, 相关系数 CR 达到了 0.999 63; 随着污染源 α_2 的位置逐渐远离 A 点, 与污染源 α_1 的线性相关性也逐渐降低, 当污染源 α_2 位于 E 点时, 距离 A 点最远的同时, 与污染源 α_1 的线性相关性也最低, 相关系数 CR 仅有 0.788 98. 可见, 在同一个流场内, 当两个污染源的位置越接近时, 其散发的污染物质量浓度数据的相关性越高.

2.2.2 污染源强度变化对相关系数的影响

假设房间内 B 点存在污染源 α_1 , 坐标为 $(0.65, 0.65, -1)$, 污染源的散发强度设定为 $S = 0.1 \text{ g/s}$. 另外在房间内 A 点存在污染源 α_2 , 坐标为 $(0.75, 0.75, -1)$, 污染源的散发强度分别为 $S_1^* = 0.01 \text{ g/s}$ 、 $S_2^* = 0.05 \text{ g/s}$ 、 $S_3^* = 0.1 \text{ g/s}$ 、 $S_4^* = 0.2 \text{ g/s}$. 传感器 β 的位置坐标为 $(0.2, 2.7, -1)$. 污染源散发过程的模拟结束后, 得到各自工况下的污染物质量浓度数据, 其中, 污染源 α_1 散发的污染物质量浓度数据记作 $C_i (i=1,2,\cdots,401)$, 污染源 α_2 散发的污染物质量浓度数据记作 $C_i^* (i=1,2,\cdots,401)$. 当污染源 α_2 的散发强度分别为 $S_1^*、S_2^*、S_3^*、S_4^*$ 点时, 分别代入式(3)求解其与污染源 α_1 的皮尔逊相关系数 CR , 并绘制散点图, 拟合得到其线性回归方程. α_1 与不同源强下 α_2 质量浓度的线性拟合结果如图 3 所示.

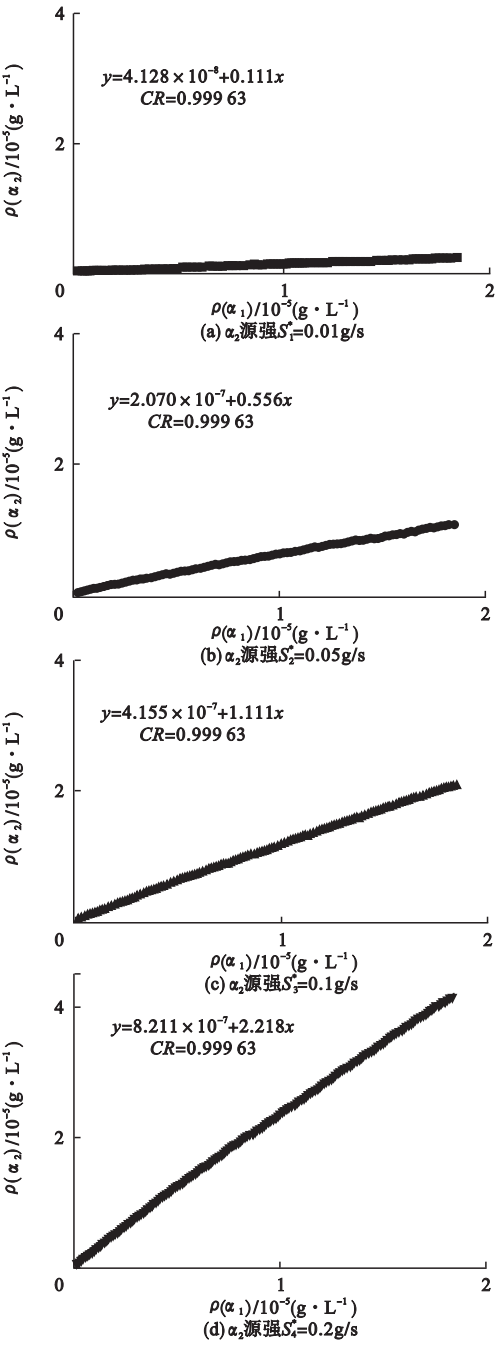


图3 α_1 与不同源强下 α_2 质量浓度的拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve between α_1 and α_2 of different release intensity

从图3可见,当污染源 α_2 的释放强度不同时, α_2 与 α_1 的相关系数 CR 均相同,即两个污染源的线性相关性并不随着其中某污染源的释放强度变化而变化.另外,观察四种工况下的线性回归方程可发现,方程的斜率体现了一定规律性,如表3所示.

表3 不同源强下线性回归方程的斜率

Table 3 Slope of linear regression equation under different release intensity

| α_1 源强 $S/$ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$) | α_2 源强 $S^*/$ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$) | 回归方程 斜率 k |
|--|--|----------------|
| 0.1 | 0.01 | 0.111 |
| 0.1 | 0.05 | 0.556 |
| 0.1 | 0.1 | 1.111 |
| 0.1 | 0.2 | 2.218 |

由表3可知,斜率 k 和污染源 α_2 的散发强度存在正比例关系,由此得到如下关系式:

$$k \approx \frac{S_i^*}{S}, i = 1, 2, 3, 4. \tag{4}$$

因此,对于两个线性相关性较高的污染源,已知某一污染源的源强以及回归方程的斜率,则另一个污染源的源强可由式(4)求得.实际应用中,在污染源位置辨识的结果准确的前提下,运用该式可以有效地完成对未知污染源的散发强度的辨识.

2.3 Pearson 评价法的应用

2.3.1 污染源位置辨识

在前处理阶段,已知房间模型被划分为16个区域,首先以每个区域的体心作为假设污染源,强度为 $S=0.1\text{g/s}$.传感器 β 的位置坐标同样为 $(0.2, 2.7, -1)$.通过CFD模拟计算污染物从0时刻到200 s时间内的非稳态释放过程,计算时间步长为0.5 s.全部模拟结束后,共获得16组体心 $(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{16})$ 的污染物质量浓度数据 C_i .

潜在污染源的位置在开始辨识前是未知的,因此需要对其可能出现的位置进行假设.假定每个区域均可能存在潜在污染源,则潜在污染源可能出现的位置有16个.为区别位于体心的假设污染源,潜在污染源的强度统一设定为 $S^*=0.1 \times S=0.01\text{g/s}$,该强度值在辨识开始前未知,需要通过强度辨识进行求解.模型的网格划分形式以及数值计算的设置和前处理阶段保持一致.模拟结束后,同样从传感器 β 读取污染物质量浓度数据,记

为 C_i^* . 其中,当潜在污染源为 α_1^* 时,所读取的污染物质量浓度数据 C_1^* 与前处理阶段的各体心质量浓度数据 $C_i(i=1,2,\cdots,16)$ 的皮尔逊相关系数求解通过 Matlab 实现,从而得到不同时段 τ 内的量化指标数值 $PR(\alpha_1^*, \alpha_i, \tau)$,并运用辨识评价方法对不同时段下的辨识结果进行评价. 以 $\tau=100\text{ s}$ 为例,其评价结果见表 4.

表 4 $\tau=100\text{ s}$ 时的源辨识结果评价

| Table 4 Evaluation of source identification results for $\tau=100\text{ s}$ | | | |
|---|----------------------|----|------|
| 潜在污染源 | 潜在源和临近体心的相关系数 | | 评价得分 |
| | $PR(\alpha_i, \tau)$ | 排名 | |
| α_1^* | 0.999 7 | 1 | 5.0 |
| α_2 | 0.999 6 | 1 | 5.0 |
| α_3^* | 0.998 4 | 1 | 4.5 |
| α_4^* | 0.999 7 | 1 | 5.0 |
| α_5^* | 0.999 4 | 1 | 4.5 |
| α_6^* | 0.999 5 | 1 | 4.5 |
| α_7^* | 0.999 1 | 2 | 3.0 |
| α_8^* | 0.998 9 | 1 | 4.5 |
| α_9^* | 0.999 9 | 1 | 5.0 |
| α_{10}^* | 0.999 9 | 1 | 5.0 |
| α_{11}^* | 0.999 9 | 1 | 5.0 |
| α_{12}^* | 0.999 5 | 1 | 5.0 |
| α_{13}^* | 0.999 9 | 1 | 5.0 |
| α_{14}^* | 0.999 8 | 1 | 5.0 |
| α_{15}^* | 0.999 9 | 1 | 5.0 |
| α_{16}^* | 0.999 9 | 1 | 5.0 |

由表 4 可知,在 $\tau=100\text{ s}$ 时段内所进行的 16 次位置辨识计算中,有 11 次得分为满分,表明对潜在污染源的位置判断准确的同时,相关系数 $PR\geq 0.999$. 5.4 次得分为 4.5 分,表明虽然位置判断准确,但潜在污染源和最接近体心的相关系数未达标准. 此外,还有 1 次的辨识得分为 3 分,表示最接近潜在污染源的体心只在判断结果中排名第二,但同

时相关系数 $PR\geq 0.999$. 最终,基于 Pearson 评价法的位置辨识的总得分为 76 分,得分率达到 95%. 这表明该方法在污染源位置辨识的应用中具有较高的准确性.

为进一步了解辨识效果随采样时长 τ 变化的情况,在 0 到 200 s 之间每隔 10 s 求解各个时段的 $PR(\alpha_i^*, \alpha_j, \tau)$ 指标,并对辨识结果进行评价,得到评价结果即得分率随时段的变化情况(见图 4).

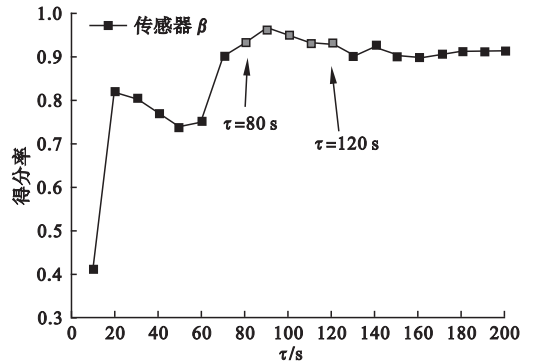


图 4 源辨识评价结果随采样时长的变化情况
Fig. 4 Variation of source identification results with sampling time

由图 4 可见,在 $\tau=10\text{ s}$ 时,得分率最低,仅有 41.25%;随后随着时段增加,得分率从整体上有了快速提升,至 $\tau=70\text{ s}$ 时达到了 90%;之后得分率提高较慢,并在 $\tau=90\text{ s}$ 时达到了最高值 96.25%,之后随着时段继续增加,得分率略微下降并趋于稳定. 其中,在 $\tau=80\text{ s}$ 至 $\tau=120\text{ s}$ 之间的 40 s 时间是辨识得分率最高的时段区间,其平均得分率高达 94.375%.

2.3.2 污染源释放强度辨识

确定污染源位置后,还需结合污染源的强度信息从而对污染源的扩散范围和危害程度进行合理评估. 根据式(4),当某一污染源 α_i 的散发强度 S_i 已知,回归方程斜率 k 和未知污染源 α_j^* 的散发强度 S^* 存在正比例关系. 因此,在某潜在污染源 α_j^* 的位置辨识结束后,对该潜在源和辨识出的假设源的质量浓度数据为参数进行线性拟合,拟合得到回

归方程斜率,并代入式(4)即得到潜在污染源的强度辨识值.全部潜在污染源的辨识结果整理后如表5所示.

表5 污染源强度辨识

| Table 5 Intensity identification of pollution source | | | |
|--|------|---|--|
| 潜在污染源 | k | 已知 α_i 源强/ ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) | 强度辨识值/ ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) |
| α_1^* | 11.9 | 0.1 | 0.008 |
| α_2^* | 11.0 | 0.1 | 0.009 |
| α_3^* | 7.9 | 0.1 | 0.013 |
| α_4^* | 8.7 | 0.1 | 0.012 |
| α_5^* | 11.5 | 0.1 | 0.009 |
| α_6^* | 11.2 | 0.1 | 0.009 |
| α_7^* | 48.9 | 0.1 | 0.002 |
| α_8^* | 27.8 | 0.1 | 0.004 |
| α_9^* | 15.7 | 0.1 | 0.006 |
| α_{10}^* | 12.7 | 0.1 | 0.008 |
| α_{11}^* | 7.2 | 0.1 | 0.014 |
| α_{12}^* | 7.0 | 0.1 | 0.014 |
| α_{13}^* | 6.9 | 0.1 | 0.014 |
| α_{14}^* | 6.8 | 0.1 | 0.015 |
| α_{15}^* | 6.9 | 0.1 | 0.014 |
| α_{16}^* | 6.7 | 0.1 | 0.015 |

已知潜在污染源的设定值是 0.01 g/s,对比 16 次污染源强度的辨识值可见,潜在污染源 α_7^* 的辨识效果最差,辨识值为 0.002 1 g/s,大小只有实际设定值的约 1/5.同时污染源 α_7^* 的位置辨识结果是错误的,表明位置辨识的结果将直接影响源强辨识,当位置辨识失败时,其源强的辨识值不具备有效性.对于其他的位置辨识正确的 15 个潜在污染源,除了 α_8^* 的源强辨识值仅为 0.003 6 g/s 之外,其余的辨识误差均控制在 ± 0.005 g/s 以内,在实际应用中具有一定的指导价值.结果证明,在位置辨识准确的前提下,基于线性回归方程斜率值的污染源散发强度辨识方法具备可行性.

3 结 论

(1)引入了皮尔逊相关系数作为室内突

发污染源的辨识指标,并通过控制变量法验证了相关系数指标的合理性.对房间内 16 个不同位置污染源展开了位置辨识,最终有 15 个污染源的位置辨识结果是正确的,辨识得分率在 $\tau = 100$ s 时达到了 95%.

(2)辨识效果的好坏与辨识时段的选取有关.在 0 ~ 200 s 的统计区间内,整体辨识效果呈现先升高,后略微下降并趋于稳定的趋势.当 $\tau = 70$ s 之前的辨识得分率较低,而辨识效果最好的时段出现在 $\tau = 80 \sim 120$ s 的 40 s 时间内,此段时间内的平均辨识得分率高达 94.375%.

(3)基于线性回归方程的斜率实现对污染源散发强度的有效辨识.在位置辨识准确的前提下,强度辨识具备较高的准确性,且辨识误差保持在 ± 0.005 g/s 的可控范围内,因为该方法具备可行性.

参考文献

[1] 沈一凡. 河流突发污染事故溯源关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
(SHEN Yifan. Research on the key techniques of locating the source of pollution emergency occurred in river channel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.)

[2] 张袁元,张凌峰,周祥,等. 基于加速度传感器阵列的单振源识别方法[J]. 济南大学学报(自然科学版),2016,30(4):315-320.
(ZHANG Yuanyuan, ZHANG Lingfeng, ZHOU Xiang, et al. Vibration source identification method based on a single acceleration sensor array [J]. Journal of university of Jinan (science & technology) 2016, 30(4): 315 - 320.

[3] LEVY A, GANNOT S, HABETS E A P. Multiple-hypothesis extended particle filter for acoustic source localization in reverberant environments [J]. IEEE transactions on audio, speech, and language processing, 2011, 19(6): 1540-1555.

[4] 方伟. 基于 GIS 的多热源环状管网泄漏检测及事故分析[D]. 太原:太原理工大学,2015.
(FANG Wei. Leakage detection and fault analysis of multi-sources looped pipe network based on GIS [D]. Taiyuan: Taiyuan University of technology, 2015.)

[5] ENTING I. Inverse problems in atmospheric constituent transport [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

- [6] ZHANG T, CHEN Q. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD modeling [J]. *Indoor air*, 2007, 17(6): 167 – 177.
- [7] ZHANG T, CHEN Q. Identification of contaminant sources in enclosed spaces by a single sensor [J]. *Indoor air*, 2007, 17(6): 439 – 449.
- [8] ZHANG T, LI H, WANG S. Inversely tracking indoor airborne particles to locate their release sources [J]. *Atmospheric environment*, 2012(55): 328 – 338.
- [9] 穆小红. 民机客舱内污染物传播规律的数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
(MU Xiaohong. Numerical simulation of pollutants transport in an aircraft cabin [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004.)
- [10] SOHN M, REYNOLDS P, SINGH N, et al. Rapidly locating and characterizing pollutant releases in buildings [J]. *Journal of air and waste management association*, 2002, 52: 1422 – 1432.
- [11] SREEDHARAN P, SOHN M, GADGIL A, et al. Systems approach to evaluating sensor characteristics for real-time monitoring of high-risk indoor contaminant releases [J]. *Atmospheric environment*, 2006, 40(19): 3490 – 3502.
- [12] 王如峰. 有限空间污染散发辨识技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2011.
(WANG Rufeng. Research on pollution dispersion identification technology of limited space [D]. Beijing: North China University of Technology, 2011.)
- [13] 庞丽萍, 曲洪权, 胡涛, 等. 密闭舱室突发污染浓度动态预测与源项辨识[J]. *中国舰船研究*, 2012, 7(3): 64 – 67.
(PANG Liping, QU Hongquan, HU Tao, et al. Prediction and identification of sudden pollution source [J]. *Chinese journal of ship research*, 2012, 7(3): 64 – 67.)
- [14] 魏传峰, 庞丽萍. 利用单传感器的三维密闭空间突发持续污染源辨识研究[J]. *宇航学报* [J]. 2013, 34(7): 1172 – 1176.
(WEI Chuanfeng, PANG Liping. Accidental continued contaminant identification study in three-dimensional enclosed space by a single sensor [J]. *Journal of astronautics*, 2013, 34(7): 1172 – 1176.)
- [15] LIU X, ZHAI Z. Location identification for indoor instantaneous point contaminant source by probability-based inverse computational fluid dynamics modeling [J]. *Indoor air*, 2008(18): 2 – 11.
- [16] LIU X, ZHAI Z. Prompt tracking of indoor airborne contaminant source location with probability-based inverse multi-zone modeling [J]. *Building and environment*, 2009, 44(6): 1135 – 1143.
- [17] ZHANG T, YIN S, WANG S. An inverse method based on CFD to quantify the temporal release rate of a continuously released pollutant source [J]. *Atmospheric Environment*, 2013(77): 62 – 77.
- [18] VUKOVIC V, TABARES-VELASCO P C, SREBRIC J. Real-time identification of indoor pollutant source positions based on neural network locator of contaminant sources and optimized sensor networks [J]. *Journal of air & waste management*, 2010, 60(9): 1034 – 48.
- [19] BASTANI A, HAGHIGHAT F, KOZINSKI J A. Contaminant source identification within a building: toward design of immune buildings [J]. *Building & environment*, 2012, 51(5): 320 – 329.
- [20] 车远宏, 贾雍, 汤卓, 等. 皮尔逊相关系数在风电功率组合预测中的应用[J]. *广西电力*, 2016, 39(3): 50 – 53.
(CHE Yuanhong, JIA Yong, TANG Zhuo, et al. Application of Pearson correlation coefficient in wind power combination prediction [J]. *Guangxi electric power*, 2016, 39(3): 50 – 53.)
- [21] 乔庆玲, 卢玫, 张翠珍, 等. 基于动态参数蚁群算法的寻源导热反问题研究[J]. *上海理工大学学报*, 2016, 38(2): 126 – 132.
(QIAO Qingling, LU Mei, Zhang Cuizhen, et al. Heat source seeking in inverse heat conduction problem by dynamic parameters ant colony algorithm [J]. *University of Shanghai for science and technology*, 2016, 38(2): 126 – 132.)
- [22] 张久凤, 姜春明, 王正, 等. 粒子群优化算法在源强反算问题中的应用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(10): 123 – 128.
(ZHANG Jiufeng, JIANG Chunming, WANG Zheng, et al. PSO algorithm for back – calculation of source intensity [J]. *China safety science journal*, 2010, 20(10): 123 – 128.)