

空气传播的生化袭击与建筑环境安全(5):有效因子——以人为本的通风效果评价新指标*

解放军理工大学 清华大学 蔡 浩[☆]

同济大学 龙惟定

清华大学 李先庭

解放军理工大学 程宝义

摘要 为了合理评价突发事件中的通风效果,从以人为本的角度提出了有效因子概念。定义了污染源有效因子 EFCS 和送风有效因子 EFSA 两个系列指标,每个系列均包括 3 个指标。EFCS 和 EFSA 分别用于度量任意时段内污染源和送风对室内人员的影响。通过三维房间的算例,说明了指标的特点和应用。结果表明,系列指标能定量地反映任意时段内室内污染源和送风对人员的影响,可用于指导突发事件中应急通风和疏散策略的制定。

关键词 通风 评价指标 污染源有效因子 送风有效因子 计算流体力学

Airborne biochemical attacks and building environment security (5): efficiency factor—human-oriented indices for evaluating ventilation efficiency

By Cai Hao[★], Long Weiding, Li Xianting and Cheng Baoyi

Abstract For rationally evaluating the ventilation efficiency in emergencies, describes the efficiency factor with human-oriented view. Proposes the two sets of indices, efficiency factor of contaminant source (EFCS) and efficiency factor of supply air (EFSA), and each set includes three indices. EFCS and EFSA indices are meant for scaling the influence of contaminant source and supply air on indoor occupants respectively in any given period of time. In addition, numerically analyses a three-dimensional room object to demonstrate the characteristics and applications of the indices. The results show that the indices proposed could be used in implementing the scaling, and thus to be a guide for establishment of ventilation and evacuation strategy in emergencies.

Keywords ventilation, evaluating index, efficiency factor of contaminant source(EFCS), efficiency factor of supply air(EFSA), computational fluid dynamics(CFD)

★ PLA University of Science and Technology, Nanjing, China

①

0 引言

在疾病传播和恐怖袭击等突发事件中,应急通风是控

①☆ 蔡浩,男,1976 年 5 月生,博士,讲师

210007 南京市海福巷 1 号解放军理工大学工程兵工程学院
内部设备教研室

(025) 84864330

E-mail: caihaohvac@163.com

收稿日期:2005-11-15

修回日期:2006-12-15

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50578080)

制污染物扩散和保证室内人员安全的重要措施。为了评价突发事件中的应急通风效果,人们提出了一些新的评价指标,主要包括:送风可及性(accessibility of supply air, ASA)、污染物可及性(accessibility of contaminant source, ACS)^[1-2]和集总污染物可及性(integrated accessibility of contaminant source, IACS)指标^[3]。ASA 和 ACS 分别反映了送风和污染物在任意时段内对室内各点的影响程度。IACS 将 ACS 和人员密度(occupied density, OD)概念^[3]结合在一起,用于进一步反映室内污染源对人员的影响。上述指标有效地推动了室内环境评价研究的发展。

在 IACS 中,OD 概念主要用于体现室内人员分布带来的空间重要性差异。由于 OD 是一个与时间无关的量,它实际上是人员在室内空间的一种静态分布,并没有体现出人员空间分布状态随时间的变化。结合了 OD 概念的 IACS 指标并不能充分反映在人员空间分布随时间变化时,室内环境参数对人员的影响程度。针对以上问题,本文从“以人为本”的新视角来研究应急通风效果的评价问题,以人员在室内环境中所受到的影响作为评价的依据,提出有效因子 EF(efficiency factor)的新概念。为度量任意时段内的通风效果,本文从污染源和送风对室内人员的影响这两个方面,分别定义污染源有效因子(efficiency factor of contaminant source, EFCS)和送风有效因子(efficiency factor of supply air, EFSA)两个系列指标。

1 有效因子概念的提出

有效因子的物理意义是任意时段内室内环境参数对人员的累积影响程度。为定义有效因子指标,首先需要引入暴露单元 EC(exposure cell)的概念。

1.1 暴露单元及其分层模型

暴露单元是一个抽象的空间概念,表示在室内引起人员暴露的空间体积。对于恰好能够容纳 1 个人的暴露单元,称之为基本暴露单元(basic exposure cell)^[4]。

在暴露单元概念的基础上,根据污染物侵入人体的途径不同,将整个暴露单元(或者其中一部分)中的污染物在人体高度方向上划分为若干层。对于吸入暴露途径,仅需考虑人体呼吸区高度范围内的污染物对人体的影响,可采用 1 层模型;对于接触暴露途径,则需考虑在整个人体高度范围内污染物对人体的影响,此时可将暴露单元中的污染物沿人体高度方向划分为若干层,即采用多层模型^[4]。

t 时刻第 i 个暴露单元中的污染物当量浓度用 $\bar{C}_i(t)$ 来表示,其物理意义是在一个假想的完全均匀混合的暴露单元中污染物的浓度,该暴露单元中污染物对人的影响与实际的非均匀混合的暴露单元相同。对于 1 层模型, $\bar{C}_i(t)$ 采用呼吸区范围内的污染物平均体积分数来近似;对于多层模型, $\bar{C}_i(t)$ 采用各层污染物平均体积分数的加权平均值来近似。 t 时刻第 i 个暴露单元中的停留人数用整数变量 $n_i(t)$ 表示($n_i(t) \geq 0$)。对于基本暴露单元, $n_i(t)$ 的取值为 0

或 1。

1.2 污染源有效因子

污染源有效因子用符号 η 表示,分别定义三个指标 $\eta_1 \sim \eta_3$,从不同角度反映污染源在任意时段内对室内人员的累积影响程度。

假设在室内释放某种污染物,且送风中不包括这种污染物。随着污染物在空气中的扩散,污染物将逐渐进入各个暴露单元并对其中的人员产生影响。为了评价某个暴露单元中的污染物在任意时段内对室内人群的影响,定义影响程度的量化指标 η_i :

$$\eta_{i,i}(\tau) = \frac{\int_0^\tau \bar{C}_i(t) n_i(t) dt}{\bar{C}_R \int_0^\tau n_i(t) dt} \quad (1)$$

式中 $\eta_{i,i}(\tau)$ 为量纲一参数,反映时段 τ 内第 i 个暴露单元中的污染物对室内人群的累积影响程度;下标 i 表示暴露单元的编号; $\bar{C}_R$ 是稳态时出风口(回风口或排风口)的污染物平均浓度,它与房间通风量 Q 、污染源的散发强度 S_j 存在如下关系:

$$\bar{C}_R = \sum_{j=1}^N \frac{S_j}{Q} \quad (2)$$

对于式(1),当 $n_i(t) \equiv 0$ 时,取 $\eta_{i,i}(\tau) = 0$ 。

为了评价污染源在任意时段内对室内某个人人员的影响,定义影响程度的量化指标 η_j :

$$\eta_{i,j}(\tau) = \frac{\int_0^\tau \bar{C}(m_j(t), t) dt}{\bar{C}_R \tau} \quad (3)$$

式中 $\eta_{i,j}(\tau)$ 为量纲一参数,反映污染源在时段 τ 内对第 j 个人的累积影响程度;下标 j 表示室内人员的编号; $\bar{C}(m_j(t), t)$ 表示 t 时刻编号为 $m_j(t)$ 的暴露单元中的污染物平均浓度; $m_j(t)$ 表示 t 时刻第 j 个人所在暴露单元的编号; τ_j 表示第 j 个人在室内停留的总时间,当 $\tau \geq \tau_j$ 时,取 $\tau = \tau_j$ 。

为了评价所有暴露单元中的污染物在任意时段内对室内人群的影响,定义影响程度的量化指标 η_b :

$$\eta_b(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^M \int_0^\tau \bar{C}_i(t) n_i(t) dt}{\bar{C}_R \sum_{i=1}^M \int_0^\tau n_i(t) dt} \quad (4)$$

式中 $\eta_b(\tau)$ 为量纲一参数,反映所有暴露单元中的污染物在时段 τ 内对室内人群的累积影响程度,下标 i 表示暴露单元的编号, $i=1,2,\dots,M$ 。在室内始终无人的状态下,取 $\eta_b(\tau) = 0$ 。

1.3 送风有效因子

送风有效因子用符号 ϵ 表示,分别定义三个指标 $\epsilon_1 \sim$

ϵ_3 , 从不同角度反映送风在任意时段内对室内人员的累积影响程度。

假设通风系统送风中包含某种指示剂, 浓度为 C_{in} , 并且室内没有该指示剂的发生源, 那么室内空气会逐渐含有这种送风指示剂。定义下列指标:

$$\epsilon_{1,i}(\tau) = \frac{\int_0^\tau \bar{C}_i(t) n_i(t) dt}{C_{in} \int_0^\tau n_i(t) dt} \quad (5)$$

$$\epsilon_{2,j}(\tau) = \frac{\int_0^\tau \bar{C}(m_j(t), t) dt}{C_{in} \tau} \quad (6)$$

$$\epsilon_3(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^M \int_0^\tau \bar{C}_i(t) n_i(t) dt}{C_{in} \sum_{i=1}^M \int_0^\tau n_i(t) dt} \quad (7)$$

2 对两种有效因子定义的讨论

两种有效因子分别反映了污染源和送风在任意时段内对室内人员的影响程度, 它们均是正数。从定义式可以看出, η 和 ϵ 指标均有可能大于 1。在系列指标中, $\eta_{1,i}(\tau)$, $\eta_{2,j}(\tau)$, $\epsilon_{1,i}(\tau)$ 和 $\epsilon_{2,j}(\tau)$ 属于分布指标; $\eta_b(\tau)$ 和 $\epsilon_3(\tau)$ 属于集总指标。这些指标的数值越大, 说明污染源或送风对室内人员的累积影响程度越大。根据这些指标的物理意义, 当第 i 个暴露单元中始终没有人员停留时, $\eta_{1,i}(\tau)$ 和 $\epsilon_{1,i}(\tau)$ 指标的取值为 0; 当室内始终无人停留时, $\eta_b(\tau)$ 和 $\epsilon_3(\tau)$ 指标的取值为 0。

在有效因子指标的定义式中引入了暴露单元的概念, 这些指标的计算结果与暴露单元的空间划分方式和分层模型有关。通过分层模型, 不仅可以有效地区分吸入和接触这两种不同的暴露途径, 而且借助污染物当量浓度的概念, 可以对暴露单元中污染物侵入人体的微观过程作出合理的描述^[4]。从有效因子系列指标的定义式可以看出, 对于吸入和接触这两种不同的暴露途径, 有效因子系列指标的定义式在表达形式上是一致的。

3 应用算例

3.1 算例描述

本文以一个通风房间的实际算例说明有效因子指标的应用。该房间长 12 m(x), 宽 16 m(y), 高 3.5 m(z), 见图 1。在点 $(x, y, z) = (5.6 \text{ m}, 8.0 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 处设置了一个释放强度为 3 g/s 的污染源。图 2 展示了事件的发展过程, 在 t_0 时刻释放污染源, 在 t_1 时刻人员开始疏散, 通风系统由正常模式切换到应急模式。

本文据 3 种应急通风模式和 2 种人员疏散模式的组合, 设置了 6 个算例, 见表 1。对于应急通风模式, V1 表示开启排风口(E1), 关闭其余风口, 新风由人员出口进入室内; V2 表示保持平时通风模式不变, 开启所有送风口(O1

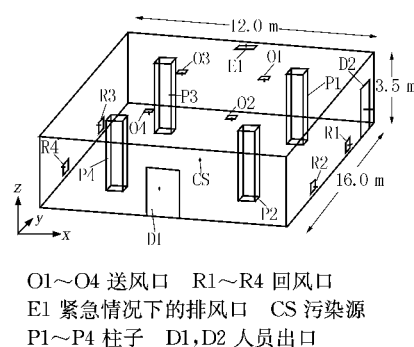


图 1 通风房间示意图

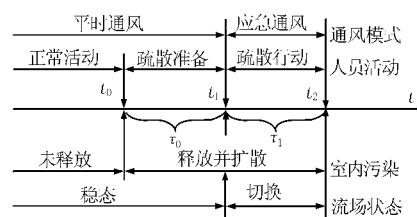


图 2 有效因子应用算例的事件发展过程

~O4) 和回风口(R1~R4), 关闭排风口(E1); V3 表示停止通风, 关闭所有风口。对于人员疏散模式, A 表示打开所有人员出口(D1, D2); B 表示仅打开人员出口 D1。算例 1_A 表示通风模式 V1 和疏散模式 A 的组合, 算例 1_* 表示采用通风模式 V1 的所有算例, 其他算例按类似方式命名。在 t_1 时刻室内随机分布了 120 人。

表 1 应用算例通风模式的设定

算例编号	通风模式	疏散模式	启用风口	风量/(m³/h)
1_*	V1	A/B	E1	7 200
2_*	V2	A/B	O1~O4 R1~R4	4 032
3_*	V3	A/B		

3.2 数值方法

为模拟室内空气湍流运动, 本文采用了室内零方程湍流模型^[5]。计算网格为六面体网格, 求解算法为 SIMPLE 算法。数值模拟工具为商用 CFD 软件 Airpak2.0, Airpak 具有自动化的非结构化、结构化网格生成能力, 采用 FLUENT 软件作为其核心的求解器^[6]。

本文采用 SGEM (spatial-grid evacuation model) 模型^[7-8], 模拟室内人员的疏散过程。SGEM 模型充分考虑了人员疏散的个体行为特点, 可以较准确地模拟人员疏散时间和疏散过程, 该模型已经在实际工程应用中得到了验证。

本文在人员呼吸区高度 ($z = 1.4 \sim 1.8 \text{ m}$) 划分暴露单元, 其尺寸为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (0.8 \text{ m}, 0.8 \text{ m}, 0.4 \text{ m})$ 。计算中取 $t_0 = 300 \text{ s}$, $t_1 = 330 \text{ s}$ 。采用 CFD 方法模拟了 $0 \sim t_2$ 时段内的气流和污染物分布; 采用 SGEM 软件模拟了 $t_1 \sim t_2$ 时段内的人员分布。在 $t_1 \sim t_2$ 时段内, 两种模拟方法所采

用的时间步长均为 0.25 s。

3.3 结果与讨论

经过模拟计算,对于算例*_A,全部人员逃出房间共用 126 个时间步长,即 $\tau_1=31.5$ s;对于算例*_B,全部人员逃出房间共用 144 个时间步长,即 $\tau_1=38$ s。通过计算,得到在 $t_1 \sim t_2$ 时段内各算例的 $\eta_3(\tau)$ 指标,见图 3。 $\eta_3(\tau)$ 值越小,则污染源对室内人员的总体影响越小,人员越安全。从图 3 可以看出,通风模式与疏散模式的最佳组合为算例 2_A,最不利组合为算例 2_B。

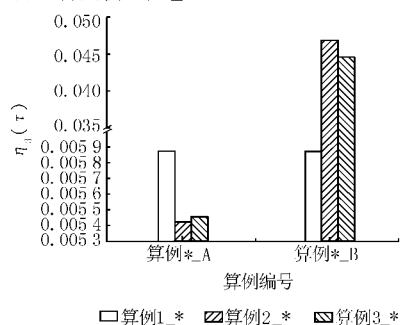


图 3 污染源有效因子 $\eta_3(\tau)$ 的比较

图 4 对 $t_1 \sim t_2$ 时段内算例 2_A 和算例 2_B 的 $\eta_{1,i}(\tau)$ 指标的分布进行了比较。在指定时段内,某个暴露单元的 $\eta_{1,i}(\tau)$ 值越大,则该暴露单元对室内人群的危害越大。通过图 4 可以识别出不同空间位置的安全性(或危险性),以此为依据可进一步对通风和人员疏散策略进行优化。图 4 进一步说明了算例 2_A 比算例 2_B 更安全。

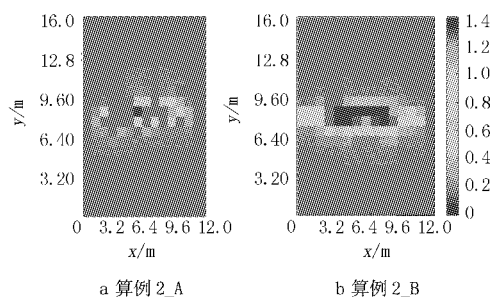


图 4 污染源有效因子 $\eta_{1,i}(\tau)$ 在 x-y 平面的分布

图 5 给出了 $t_1 \sim t_2$ 时段内的 $\eta_{2,i}(\tau)$ 指标,该指标反映了污染源对室内不同人员个体影响程度的差异,借助该指标可对通风和人员疏散策略做进一步的分析和优化。

4 结论

4.1 系列指标充分考虑了室内人员空间分布状况随时间变化的情况,能够定量反映任意时段内室内污染源和送风对人员的影响。

4.2 系列指标均是大于或等于 0 的量纲一参数,取值有可能大于 1。在任意时段内,这些指标的数值越大,说明污染源或送风对室内人员的累积影响程度越大。

4.3 在具体应用中,系列指标可用于指导应急通风和人员疏散策略的制定。

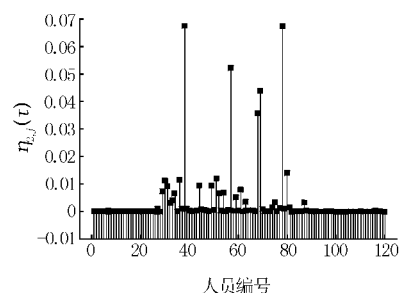


图 5 污染源有效因子 $\eta_{2,i}(\tau)$ 的分布(算例 2_A)

参考文献:

- [1] Li Xianting, Zhao Bin. Accessibility: a new concept to evaluate the ventilation performance in a finite period of time [J]. Indoor and Built Environment, 2004, 13(4): 287-293
- [2] Yang J, Li X, Zhao B. Prediction of transient contaminant dispersion and ventilation performance using the conception of accessibility[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(3): 293-299
- [3] Zhao B, Li X. Determining ventilation strategy to defend indoor environment against contamination by integrated accessibility of contaminant source(IACS) [J]. Building and Environment, 2004, 39(9):1035-1042
- [4] 蔡浩,龙惟定,程宝义. 空气传播的生化袭击与建筑环境安全(4):计算室内人员暴露剂量的暴露单元及其分层模型[J]. 暖通空调,2007,37(2):42-45
- [5] Chen Qingyan, Xu Weiran. A zero-equation turbulence model for indoor air flow simulation [J]. Energy and Buildings, 1998, 28(2):137-144
- [6] Fluent Inc. Airpak 2.0 user's guide[M]. Fluent Inc, 2001
- [7] Lo S M, Fang Z. A spatial-grid evacuation model for building [J]. J Fire Sci, 2000, 18(5): 376-394
- [8] Lo S M, Fang Z, Lin P, et al. An evacuation model: the SGEM package [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(3):169-190

· 会讯 ·

法国爱瑞雷格(AERECO)公司技术交流研讨会

2007 年 5 月 24 日法国爱瑞雷格(AERECO)公司召开技术交流研讨会,在京的各大设计院的总工及专业设计人员代表参加了会议。会上,法国爱瑞雷格公司全球市场总监 Savin 先生和中国区首席代表杨琨女士介绍了湿感智能新风系统,并就相关技术问题同在座专家进行了交流与讨论,得到大家的认可和好评。

Jean-Luc Savin 介绍说:“湿感通风技术可根据室内空气污染度和人员活动等情况自动调整通风量,相比传统的通风方式还可以节省 40% 的能耗。”身为法国 AERECO 公司全球市场销售总监的 Jean-Luc Savin 先生主动要求来中国推广技术,因为在他看来,在占有全球 50% 建筑量的中国,新风系统不但存在巨大的市场商机,还能为中国的建筑节能效力。

(李富波)