

# 建筑室内人员污染源散发特性与有效散发模型

王 军, 张 旭

(同济大学 暖通空调研究所, 上海 200092)

**摘 要:**基于典型人员污染物指标的散发机制与特点并结合中国人员体型特征数据分析了年龄、性别、活动水平对人员污染源散发的影响关系,同时通过借助不稳定性系数给出了由人体气味污染不稳定性因素作用引起的 CO<sub>2</sub> 减少量的确定方法,并根据其与人体 CO<sub>2</sub> 产生量之间的叠加关系建立了人员污染源有效散发量的计算模型。研究结果表明,中国男性与女性的 CO<sub>2</sub> 散发水平存在差异,并且人体 CO<sub>2</sub> 散发水平随活动强度的变化率与年龄、性别有关;此外,人体气味污染不稳定性因素对 CO<sub>2</sub> 减少率的影响程度随通风换气次数、人员污染源作用时间的变化关系存在显著变化阶段和相对稳定阶段。

**关键词:**人员污染源;二氧化碳;不稳定性系数;模型

**中图分类号:**TU834 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0114-06

## Emitting Characteristic and Effective Emission Model of Occupant Pollution Source in Building Room

WANG Jun, ZHANG Xu

(HVAC & Gas Institute, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Combining with the data of Chinese body feature, the influence of age, gender and physical activity level on indoor occupant pollution source emission is analyzed based on emitting mechanism and characteristics of typical occupant pollutants. Method to determine the amount of carbon dioxide reduction caused by unstable factors of occupant body odor pollution is obtained with unsteady coefficient. Also, the effective emission model of occupant pollution source is presented according to superposition relationship between carbon dioxide production and reduction. It is shown that there exists difference between carbon dioxide emission level of male and that of female. Carbon dioxide emission level of human body is affected by age and gender. Moreover, the impact of occupant body odor pollution unstable factors on carbon dioxide reduction rate has significant change stage and relatively stable stage, which has connection with air change rate and occupant pollution source action time.

**Key words:** occupant pollution source; carbon dioxide; unsteady coefficient; model

建筑室内人员污染源的有效散发水平是决定新风量需求的重要因素,而新风量的大小又是平衡室内空气品质要求和建筑节能要求的关键指标之一<sup>[1-4]</sup>,因此掌握室内人员污染源的散发特性及其有效水平对合理确定新风量指标具有重要意义。

人员污染源有别于其他室内污染源,其影响因素包括人的种族、年龄、性别、活动水平等因素<sup>[5-7]</sup>,而目前有关人员污染源散发特性的已有研究主要是针对国外人员,基于中国人员体型特征数据的人员污染源散发特性与水平还有待进一步确定。另一方

收稿日期:2010-04-11

基金项目:建设部“十一·五”攻关项目(2006BAJ01A05)

作者简介:王军(1983-),男,博士,主要从事建筑新风量与污染物扩散机理研究,(E-mail) wangjun\_tongji@126.com。

面,已有研究虽给出了人员污染源绝对散发量的确定方法<sup>[8-9]</sup>,但室内氧化、脱水、表面吸收反应等人体气味污染不稳定性作用因素引起的散发量耗损会改变人员污染源的有效散发水平<sup>[10-13]</sup>,进而改变对新风量的需求,而目前确定有效散发量的方法还有待解决。论文将以中国人员体型特征数据为基础,通过分析室内人员污染源的散发特性及人体气味污染的不稳定性特征,建立不稳定性因素作用引起的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)减少量的确定方法以及人员污染源有效散发量的计算模型,为合理确定室内新风量需求提供理论指导。

## 1 人员污染源的散发特性

人员污染源的散发机制取决于人体代谢活动的内在过程,并且需要通过主要散发指标的散发特性来反映。人体气味(由低浓度有机气体的混合物构成,以下用人体 VOCs 指代)和人体 CO<sub>2</sub> 是人员污染源所散发的 2 类典型污染物指标,二者的主要来源、影响因素和决定因素如表 1 所示。

表 1 典型人员污染物指标比较

主要来源	影响因素	决定因素
人体 VOCs	呼吸过程	肺部吸入率 内生率 代谢排出率
	种族	
	性别	
	饮食构成	
	活动水平 个人卫生 健康状况	
人体 CO <sub>2</sub>	呼吸过程	体表面积 呼吸商 新陈代谢率
	种族	
	性别	
	饮食构成 活动水平	

从表 1 可以看到,在所比较的 3 个方面,作为代谢活动的重要产物和室内人员所散发的根源性污染物的人体 VOCs 指标与人体 CO<sub>2</sub> 指标之间具有较大的相似性;与此同时,若以“标准个体(健康状况良好、处于热舒适状态且保持良好个人卫生,即不考虑不同个体之间个人卫生、健康状况的差异)”为比较对象,则两类典型指标的散发水平之间存在比例关系;因此,从理论上讲 2 类典型指标均可以用于反映人员污染源的散发特性且可以相互指示。

但同时还应当看到,由于各种影响因素对人体 VOCs 的肺部吸入率、内生率和代谢排出率的影响关系极为复杂,这使得目前基于寻求普适方法来准确量化人体所散发的 VOCs 还存在诸多困难。

根据污染源指示指标的选择原则(量化的可靠性、对污染源的有效指示性、测试方便且成本低)可知,目前直接借助人体 VOCs 指标尚不能对人员污染源的散发特性做出有效反映。

另一方面,与人体 VOCs 相比,决定人体 CO<sub>2</sub> 散发量的主要因素是人体耗氧量,而人体耗氧量与人体活动量和人体表面积有关,其确定方法为<sup>[9]</sup>:

$$V_{O_2} = \frac{0.00276A_D M}{0.23RQ + 0.77} \quad (1)$$

则人体新陈代谢所产生的 CO<sub>2</sub> 为:

$$g_P = V_{O_2} \cdot RQ \quad (2)$$

式中:  $RQ$  为呼吸商,其大小主要取决于人员的饮食构成,同时也会受到活动水平以及健康状况的影响,通常条件下的呼吸商一般为 0.83;  $M$  为单位人体表面积新陈代谢率,  $\text{met}$  ( $1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$ );  $A_D$  为人体表面积,  $\text{m}^2$ 。

式(1)中的人体表面积会因人的年龄、性别和种族的不同而存在差异,通常可以通过测量法和公式计算法确定。人体表面积计算模型最早由 DuBois 根据人体表面积与身高、体重之间的关系提出,即<sup>[14]</sup>:

$$A_D = a_1 H^{b_1} W^{c_1} \quad (3)$$

式中:  $H$  为人体身高,  $\text{cm}$ ;  $W$  为人体体重,  $\text{kg}$ ;  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  为模型常数。

由于选择的测定对象和人员量的差异, DuBois (1916)、Boyd(1935)、Gehan(1970)、Haycock(1978) 和美国环保局(EPA)(1985)等研究人员和机构分别得到了式(3)中的模型常数,如表 2 所示<sup>[14]</sup>。

表 2 国外人体表面积计算模型常数

	$a_1$	$b_1$	$c_1$
DuBios	0.007 18	0.725 00	0.425 00
Boyd	0.017 87	0.500 00	0.483 80
Gehan	0.023 50	0.422 46	0.514 56
Haycock	0.024 27	0.396 40	0.537 80
美国 EPA	0.023 90	0.417 00	0.517 00

针对国外人体表面积计算模型能否适合中国人体表面积的确定这一问题, Stevenson(1927)和中国研究人员赵松山(1984)、胡咏梅(1999)分别以中国人员为样本建立了中国人员人体表面积的计算模型,其统一形式为<sup>[15]</sup>:

$$A_D = a_2 H + b_2 W + c_2 \quad (4)$$

式中:  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  为模型常数;这些常数在 Stevenson 模型、赵松山模型和胡咏梅模型中的取值如表 3 所

示。

表 3 中国人体表面积计算模型常数

	$a_1$	$b_1$	$c_1$
Stevenson	0.007 18	0.725 00	0.425 00
赵松山	0.024 27	0.396 40	0.537 80
胡咏梅	0.023 90	0.417 00	0.517 00

根据《2007 中国卫生统计年鉴》，中国男性和女性在各个年龄阶段的身高和体重分别如图 1 和图 2 所示。

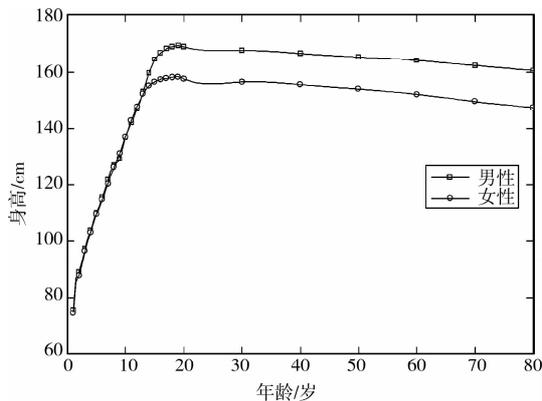


图 1 中国人口身高随年龄的变化

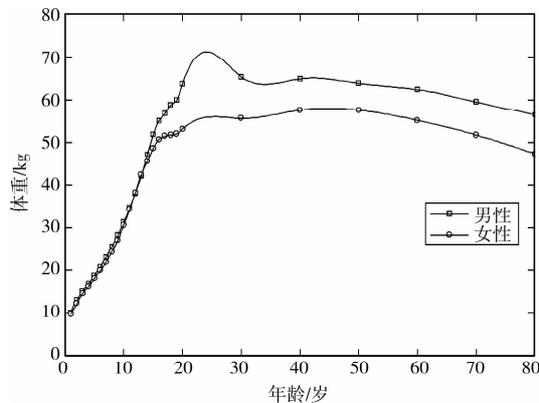


图 2 中国人口体重随年龄的变化

针对中国男性和女性在各个年龄阶段身高和体重的分布情况，由 DuBois 模型、Boyd 模型、Gehan 模型、Haycock 模型、美国 EPA 模型、Stevenson 模型、赵松山模型和胡咏梅模型可以分别得到中国男性和女性人体表面积随年龄的变化情况，如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可以看到，无论是男性还是女性，由 DuBois 模型、Boyd 模型、Gehan 模型、Haycock 模型和美国 EPA 模型所得到的不同年龄阶段的人体表面积基本接近；而由 Stevenson 模型得到的结果较其他模型得到的结果均偏小，男性的结果平均偏小 4.0%，女性的结果平均偏小 4.2%；与此同时，

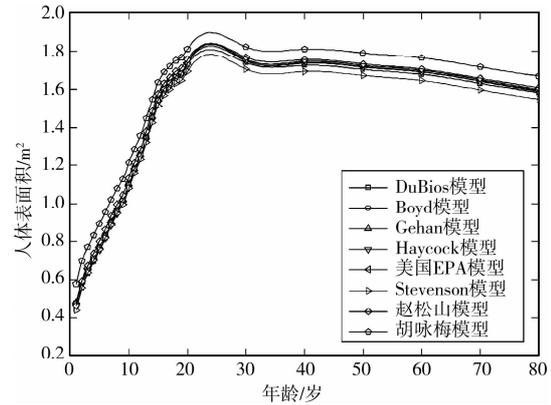


图 3 中国男性人体表面积随年龄的变化

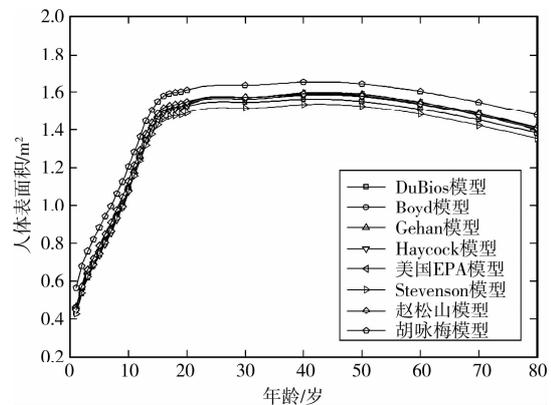


图 4 中国女性人体表面积随年龄的变化

由赵松山模型和胡咏梅模型得到的结果均高于其他模型得到的结果，且胡咏梅模型得到的结果最高，由其得到的男性结果平均高出 8.5%，女性结果平均高出 8.9%。值得指出的是，人员年龄越大，赵松山模型和胡咏梅模型得到的结果与其他模型得到的结果之间的差异也就越显著。此外，由各个模型得到的男性人体表面积要高于女性的结果，且平均高出 6.1%。

值得指出的是，对于同一性别的特定年龄，Stevenson 模型、赵松山模型和胡咏梅模型得到的结果与其他模型得到的结果之间的差异反映了基于不同国别的人员样本得到的模型用于计算中国当代人员人体表面积在适用性方面存在不同程度的差别；而赵松山模型、胡咏梅模型得到的结果与 Stevenson 模型得到的结果之间的差异反映了基于中国不同历史时期的人员样本得到的模型用于计算我国当代人员人体表面积在适用性方面也存在不同程度的差别；此外，特定年龄的男性与女性的人体表面积之间存在差异的根本原因在于体型特征存在差别。综合以上特点和原因可以看到，人的种族、体型特征对人体表面积的影响不可忽略。因此，论文将选择能够反映中国当代人员体型特征的胡咏梅模型作为人体

表面积的确切依据。

根据胡咏梅模型所得到的人体表面积并结合呼吸商,由式(1)和式(2)可以得到中国男性和女性在不同活动强度下的  $\text{CO}_2$  散发量,如图5和图6所示。

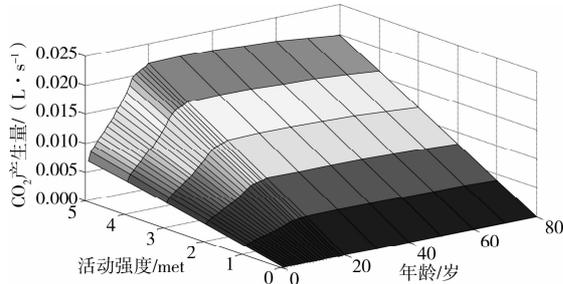


图5 中国男性  $\text{CO}_2$  散发量

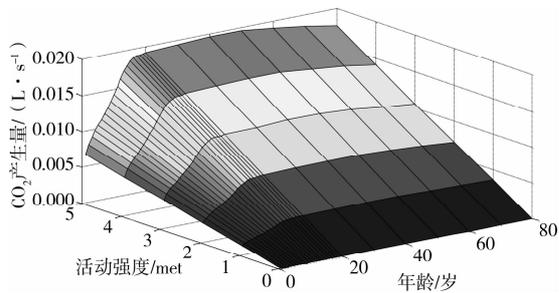


图6 中国女性  $\text{CO}_2$  散发量

由图5和图6可以看到,对于确定的年龄, $\text{CO}_2$  散发量将随活动强度的增大而上升,且成年人的上升率要高于未成年人的对应结果;其次,对于某一活动强度, $\text{CO}_2$  散发量将随年龄的增长先迅速增加再逐渐趋于稳定;此外,对于具体的年龄和活动强度水平,男性的  $\text{CO}_2$  散发量均高于女性的对应结果,且平均高出 6.1%。

通过以上对人体  $\text{CO}_2$  散发特性的分析可以看到,尽管  $\text{CO}_2$  指标自身在通常浓度水平下并不是一种根源性污染物,但由于人体散发  $\text{CO}_2$  强度的量化具有可靠性;并且,室内人员污染源的数量变化也可以通过  $\text{CO}_2$  散发量的改变而得到及时有效地反映;因此, $\text{CO}_2$  指标对人员污染源具有良好的指示性,其散发特点在很大程度上反映了室内人员污染源的散发特性。

## 2 二氧化碳指示性的修正

根据  $\text{CO}_2$  指标对人员污染源的指示性可知,虽然目前无法实现人体 VOCs 指标与  $\text{CO}_2$  指标之间的相互指示,但由于 2 类指标具有可比拟性,因此可以用  $\text{CO}_2$  指标来指示人体 VOCs(室内人体气味)散发水平。另一方面,Yaglou、Cain、Fanger、Bergmunch 和 Clausen 等学者通过实验研究发现,建筑

室内人体气味污染存在一定程度的不稳定性<sup>[11]</sup>。引起人体气味污染不稳定的可能因素包括:室内氧化作用、脱水作用和室内表面的吸收作用。值得指出的是,室内表面的吸收作用受到气体蒸气压、化学性质、吸收材料的吸收潜力以及吸收表面的物理状态等因素的影响,因此吸收作用的准确量化受到限制;但同时,在室内表面的吸收与解吸作用之间很快能够达到平衡,因此室内表面吸收作用的影响相对较小。

实际上,在人体气味不稳定性因素的作用下,室内人员污染源气味散发的有效水平将发生改变,从而进一步改变人员所感受的人体气味污染的强度水平以及对新风量的需求。作为人员污染源气味散发水平的指示指标  $\text{CO}_2$  应当反映不稳定性因素所引发的人体气味有效散发的改变。为此,借助不稳定性系数  $\xi$  来表征人体气味不稳定性因素的影响,并且定义  $\xi$  为室内  $\text{CO}_2$  浓度的实际值与基于稳定假设下的理论值之比<sup>[11]</sup>。为了确定不稳定性系数  $\xi$ ,首先给出基于稳定假设的室内  $\text{CO}_2$  理论浓度方程,即:

$$C_p = \left( C_0 - \frac{mC_{i_n_v} + G/V}{mn_v} \right) \exp(-mn_v t) + \frac{mC_{i_n_v} + G/V}{mn_v} \quad (5)$$

再给出考虑不稳定性因素影响的室内  $\text{CO}_2$  实际浓度方程,即<sup>[11]</sup>:

$$\tilde{C}_p = \left( C_{p_0} - \frac{mC_{p_i_n_v} + G/V}{m(n_v + n_r)} \right) \exp[-m(n_v + n_r)t] + \frac{mC_{p_i_n_v} + G/V}{m(n_v + n_r)} \quad (6)$$

式中: $C_{p_0}$  为初始时刻室内  $\text{CO}_2$  浓度,ppm; $C_{p_i}$  为入室新风的  $\text{CO}_2$  浓度,ppm; $m$  为混合系数; $n_v$  为通风换气次数, $\text{h}^{-1}$ ; $n_a$  为室内氧化作用、脱水作用和吸收作用等影响下的当量换气次数, $\text{h}^{-1}$ ; $G$  为室内  $\text{CO}_2$  的总散发量, $\text{L/s}$ ; $V$  为房间体积, $\text{m}^3$ ; $t$  为人员污染源作用时间, $\text{h}$ 。

因此,不稳定性系数  $\xi$  可以表示为:

$$\xi = \frac{\tilde{C}_p}{C_p} \quad (7)$$

当初始浓度为零( $C_0 = 0$ )且满足瞬时均匀混合( $m = 1$ )假设时,由式(5)、式(6)和式(7)可以得到:

$$\xi = \frac{n_v \{1 - \exp[-(n_v + n_r)t]\}}{(n_v + n_r)[1 - \exp(-n_v t)]} \quad (8)$$

从而,在室内氧化作用、脱水作用和吸收作用等不稳定性诱发因素作用下,室内  $\text{CO}_2$  在单位时间内的减少量可以表示为:

$$R = (1 - \xi)C_p V \quad (9)$$

另一方面,由式(7)可以得到人体气味的半周期(在氧化、吸收等作用下气味浓度变为初始浓度一半的时间)与当量换气次数  $n_v$  之间耦合关系,如图 7 所示。从图 7 可看到,半周期越长当量换气次数  $n_v$  越小;同时,理论预测结果均涵盖了 Yaglou、Cain 和 Clausen 的实验结果,但三者的实验结果差别较大。鉴于三者实验条件的可控性与实验工况的有效性差异,论文以 Clausen 的实验结果(在室内温度 20~22℃、湿度 35%~50%的条件下,半周期为 55 min 且  $n_v$  为 0.76 h<sup>-1</sup>)为分析依据。

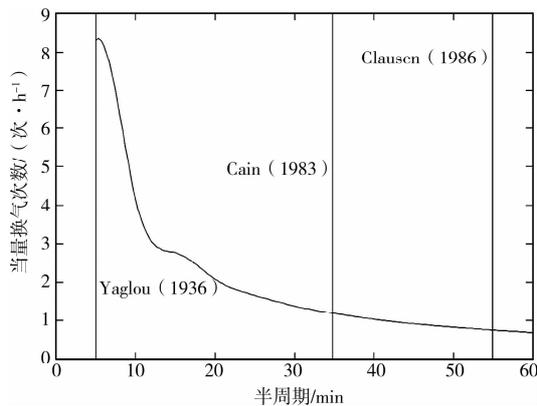


图 7 半周期与当量换气次数之间的耦合关系

基于 Clausen 的实验结果,由式(8)和式(9)可以分别得到不稳定性系数  $\xi$  和基于室内空间存在量的 CO<sub>2</sub> 减少率随人员污染源作用时间与通风换气次数的变化规律,如图 8 和图 9 所示。

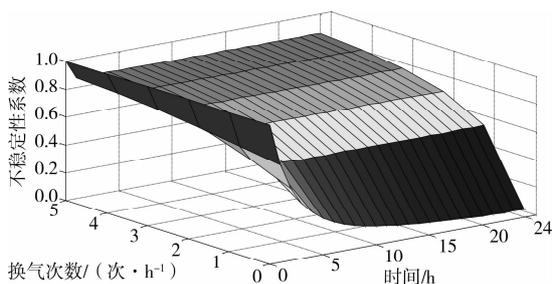


图 8 不稳定性系数的变化规律

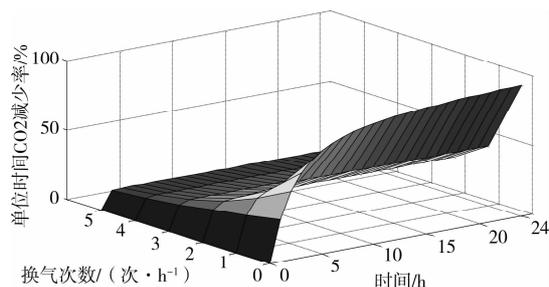


图 9 CO<sub>2</sub> 减少率的变化规律

从图 8 和图 9 可以看到,在通风换气次数一定的情况下,不稳定性系数  $\xi$  随人员污染源作用时间的增加先迅速减小再逐渐趋于恒定;出现这一趋势的原因在于随着室内 CO<sub>2</sub> 浓度水平的上升,室内氧化、脱水、吸收等非稳定性因素的作用推动势也在逐渐增大,当 CO<sub>2</sub> 浓度趋于稳定以后,非稳定性因素使 CO<sub>2</sub> 的减少程度也趋于恒定。另一方面,对任意时刻提高通风换气次数会降低  $\xi$  的减小程度,其原因在于通风换气次数的增大会缩短单位时间产生的 CO<sub>2</sub> 在室内的停留时间,即缩短了室内氧化、脱水、吸收对 CO<sub>2</sub> 组分的作用时间;并且,因换气次数的增大所带来的 CO<sub>2</sub> 浓度减小会降低室内氧化、脱水、吸收作用的推动势,从而使 CO<sub>2</sub> 减少率降低。

值得指出的是,虽然通风换气次数提高以后 CO<sub>2</sub> 减少率降低,但这并不意味着可以单纯降低通风换气次数。由于新风除了稀释污染物、控制气味外,还需满足人员代谢活动所需要的新鲜空气,同时对室内温湿度还具有调节作用。因此,通风换气次数的改变还需兼顾新风的其他功能,并通过“功能解耦”确定最终的通风换气次数。

### 3 有效散发量的确定

由于在单个人员 CO<sub>2</sub> 散发水平一定的情况,室内人员污染源产生 CO<sub>2</sub> 的量将取决于人员量(由室内人员密度和室内地板人员使用面积确定);而由不稳定性因素所引起的 CO<sub>2</sub> 减少量将取决于室内 CO<sub>2</sub> 理论浓度水平和 CO<sub>2</sub> 有效扩散体积;因此,综合以上 2 个方面可知,CO<sub>2</sub> 产生量与 CO<sub>2</sub> 减少量的叠加结果构成了新风所要处理的污染量,也即是室内人员污染源的有效散发量:

$$Q_P = [g_P D_P - (1 - \xi) C_P H_S] A_F \quad (10)$$

式中:  $D_P$  为室内人员密度,人/m<sup>2</sup>;  $A_F$  为室内地板人员使用面积,m<sup>2</sup>;  $H_S$  室内高度,m,对于特定人员密度将决定人员占有体积。

### 4 结语

根据人体气味(VOCs)指标和 CO<sub>2</sub> 指标各自的散发机制与特点,揭示了 CO<sub>2</sub> 指标对人员污染源的指示性,并结合中国人员体型特征数据分析了室内人员污染源的散发特性,针对人体气味污染的不稳定性特征,通过借助不稳定性系数给出了由人体气味污染不稳定性因素作用引起的 CO<sub>2</sub> 减少量的确定方法,同时根据其与人 CO<sub>2</sub> 产生量之间的叠加关系建立了人员污染源有效散发量的计算模型。

## 参考文献:

- [1] CLEMENTS-CROOME D J, AWBI H B. Ventilation rates in schools[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(3):362-367.
- [2] GINESTET S, MARCHIO D. Control tuning of a simplified VAV system: methodology and impact on energy consumption and IAQ [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(8):1205-1214
- [3] ANTHONY BENNETT. Strategies and technologies: Controlling indoor air quality [J]. *Filtration & Separation*, 2009, 46(4):14-17.
- [4] YU B F, HU Z B. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 3 (2):3-20.
- [5] ABDUS SALAM MD, TOSHIKUNNI NOGUCHI. Impact of human activities on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions: a statistical analysis[J]. *The Environmentalist*, 2005, 25(1):19-30.
- [6] CHARLES J, WESCHLER. Changes in indoor pollutants since the 1950s[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43 (1): 153-169.
- [7] AERIAS. Air quality science[R]. IAQ resource center, 2007.
- [8] NORHAYATI MAHYUDDIN, HAZIM AWBI. The spatial distribution of carbon dioxide in an environmental test chamber[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(9): 1993-2001.
- [9] ANDREW K PERSILY. Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide [J]. *ASHRAE Transaction*, 1997, 103(2):193-204.
- [10] ALLISON M CURRAN, SCOTT I RABIN. Comparison of the volatile organic compounds present in human odor using spme-GC/MS [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, 31(7):1607-1619.
- [11] CLAUSEN G H, FANGER P O. Stability of body odor in enclosed spaces[J]. *Environment International*, 1986, 12 (1-4):201-205.
- [12] CHIUNG YU PENG, CHENG HANG LAN, TZONG JER WU. Investigation of indoor chemical pollutants and perceived odor in an area with complaints of unpleasant odors[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10):2106-2113.
- [13] PHILOMENA M BLUYSSSEN. Towards an integrative approach of improving indoor air quality[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(9):1980-1989.
- [14] 王吉, 刘少卿, 陈晓民, 等. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(4): 152-156.  
WANG JI, LIU SHAO-QING, CHEN XIAO-MIN, et al. Estimates of the exposed dermal surface area of Chinese in view of human health risk assessment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(4):152-156.
- [15] 胡咏梅, 武晓洛, 胡志红, 等. 关于中国人体表面积公式的研究[J]. *生理学报*, 1999, 51(1):45-48.  
HU YONG-MEI, WU XIAO-LU, HU ZHI-HONG, et al. Study of formula for calculating body surface areas of the Chinese adults[J]. *Acta Physiologica Sinica*, 1999, 51 (1):45-48.

(编辑 王秀玲)