

室内空气污染数学模式的探讨

周国栋 杨铭鼎 陈秉衡

(上海医科大学公共卫生学院, 上海)

提要 我国由于烹调时燃煤所致的室内空气污染相当普遍。但进行室内空气污染物浓度监测却很困难。用室内空气污染数学模式推算室内污染物浓度方便可行。本文对 Dockery 和 Spengler 提出的模式加以改进, 提出一种较适用于我国实际情况的室内空气污染数学模式:

$\bar{C}_t = P\bar{C}_0 + \frac{\bar{S}}{q} e^{kt}$ 。建立了一种计算室内平均换气次数的简便方法和排污强度及衰减系数两种参数。

关键词: 室内空气污染; 衰减系数。

人一生中大部分时间在室内度过, 因此室内空气质量优劣已日益引起卫生学家的重视。与大气监测不同, 在室内进行长期定点监测几乎是不可能的。因为监测工作干扰了被监测家庭的正常生活, 而且监测仪器体积大, 携带不便, 自动化程度低, 噪声大, 造成很多不便。七十年代中期, 国外提出用数学模式来推算室内空气污染浓度。其中有些模式经过验证, 其推算浓度与实测浓度之间具有很好的相关性。

由于建筑结构, 通风条件、燃料类型等不同, 国外的模式及参数并不完全适用于我国。为此本文借鉴国外一种比较成熟的模式, 结合我国实际情况, 提出一种较适用于我国某类型住宅的室内空气污染数学模式, 并提出了模式中一些参数的计算方法。

一、室内空气污染数学模式

国外研究的室内空气污染模式主要分为两大类。一类是采用质量平衡理论模式; 另

一类是经验模式。理论模式适用面较广, 但需要较多的参数, 其中有些参数不易得到。经验模式是以实测值进行回归分析得到的, 但适用面较窄^[1]。

Dockery 和 Spengler^[2] 提出的质量平衡守恒模式为:

$$dQ = (1-F)qC_0 dt - qC_t dt - KQ dt + S dt \quad (1)$$

经简化后, 得出以下近似模式:

$$\bar{C}_t = \frac{Pa}{(a+K)} \bar{C}_0 + \frac{1}{V(a+K)} \bar{S} \quad (2)$$

式中 Q ——室内污染物质量 (μg)

F ——室外空气进入室内时污染物过滤率

P —— $(1-F)$ 室外空气进入室内时污染物渗透率

q ——进入或流出室内的空气量 (m^3/h)

V ——室内体积 (m^3)

t ——时间 (h)

K ——衰减率 ($1/h$)

a ——通风率, 亦称换气次数 (ACH), $a = q/V$, ($1/h$)

收稿日期: 1988年3月19日

本研究得到洪传洁教授、姚志顺教授的指教, 寿建刚同志的大力协助。部分实验工作还得到毛惠琴、蒋颂辉、周德源、陈仁平和蒋春兰等同志的帮助, 在此表示衷心感谢。

S ——室内污染源排放强度 ($\mu\text{g}/\text{h}$)

C_o ——室外大气浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_i ——室内空气浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

式中衰减率 K 需通过实验得出, 而 K 值和各种建筑材料, 地毯等有关, 不同的材料 K 值不同。

再假设 K 亦可忽略不计, 则式(2)为:

$$\bar{C}_i = P\bar{C}_o + \frac{1}{q}S \quad (3)$$

从式(3)中可明确地看到, 影响室内空气污染浓度的因素取决于三个部分。第一是室外空气中污染物的渗透, 即 $P\bar{C}_o$, 这部分可理解为室内无污染源时的本底值, 即回归模式中的截距。第二是 $\frac{1}{q}$, 室内换气量的倒数, 可把这部分看作回归模式中的斜率, 换气量大, 室内污染物浓度下降也明显。换气量小, 则反之。第三是 S , 室内污染源排放强度, 可看作回归模式中的自变量, 室内污染物排放越多, 浓度就越高。

除以上三个因素外, 污染物在室内的衰减率也是影响室内空气污染浓度的一个因素, 在模式中仍应加以考虑。

式(3)第一部分中的 P , 可通过大量的室内外同步监测(室内无任何污染源产生), 计算室内外比值获得, $\bar{C}_o$ 可从室外大气监测点获得。由于室外空气渗入室内是每时每刻都在进行, 同时进入室内的污染物也每时每刻都有衰减发生, 因此通过实测而得出的 P 值已包含有 K , 这里的 P 与 $(1-F)$ 在含意上已有区别。国外由于大量使用机械通风, F 主要是指机械通风上的过滤效率。我国民用住宅基本上都是自然通风, 几乎不存在过滤效率。这里可近似把衰减率看作 F , 当室内处于良好的自然通风条件下, 衰减率可能很小, P 接近于1。

第二部分的 q 和第三部分的 S 是通过推算得到的, 因此需考虑衰减率。 $\frac{S}{q}$ 为室内

产生的污染物浓度, 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这些污染物浓度随着时间的延续而变化, 由于物理和化学作用, 浓度逐渐衰减, 其衰减状况呈指数曲线:

$$\hat{y} = a_1 e^{kt} \quad (4)$$

式中: $\hat{y}$ ——某时间室内浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

a_1 ——截距

k ——衰减常数

t ——时间

当截距 a_1 不同时, 衰减常数 k 会有一些的变化, 但变化幅度很小, 因此可近似把 k 看作一个常数, k 值可通过实验获得。

设截距 a_1 为 $\frac{S}{q}$, 则考虑了室内产生的污染物浓度的衰减率后, 提出的室内空气污染数学模式为:

$$\bar{C}_i = P\bar{C}_o + \frac{S}{q}e^{kt} \quad (5)$$

式中: k ——衰减常数

t ——时间(h)

式(5)中衰减常数 k 实际上是模式后一部分中室内产生的污染物浓度的衰减斜率。

由于模式中平均排污强度 S 和通风量 q 都是以小时为单位, 因此时间 t 也可给予相对固定值。 $t=0$ 时, 衰减还没有开始, $t=1$ 时, 室内污染物浓度已衰减到1小时中的最低值, 因此可取中间值0.5小时(0.5h)。

二、模式中几个参数的确定

应用数学模式 $\bar{C}_i = P\bar{C}_o + \frac{S}{q}e^{kt}$ 推算

室内空气污染浓度, 首先要建立模式中各个参数。室内无污染源时, 钢窗结构的新村住宅, P 值约为0.5—0.8。不同的污染物 P 值稍有不同。室外大气平均浓度 $\bar{C}_o$ 可从大气监测点获得。时间 t 可确定为0.5小时。下面就模式中其它三个参数的确定, 加以阐述。

(一) 燃料燃烧过程排污强度 $\bar{S}$

在密闭性较好的染毒室内, 分别放置煤气、液化石油气和煤饼(亦称蜂窝煤)三种燃烧灶具, 同时设一对照(室内无燃料燃烧)。在静态条件下, 用 Anderson 大流量分级采样器采集颗粒物(IP)。另外, 在动态条件下^[3], 测定CO、NO₂和SO₂排

污强度。具体方法是: 在燃料燃烧过程中, 进行机械通风, 在进风口及排风口处设点采样, 两点的浓度差值与单位时间排风量的乘积为该时间污染物排放量。将整个燃烧过程中各段时间排放量相加, 得到总排放量。根据燃料用量得出四种污染物的排放强度(表1)。

三种燃料污染物排放强度

表 1

燃料类型	排 放 强 度 (g)			
	IP	SO ₂	NO ₂	CO
煤 饼(kg)	0.650 ± 0.024	8.70 ± 0.716	0.580 ± 0.117	124.585 ± 8.495
液化石油气(kg)	0.002 ± 0.0004	0.030 ± 0.003	0.712 ± 0.041	25.019 ± 3.147
煤 气(m ³)	0.018 ± 0.002	0.012 ± 0.001	0.074 ± 0.016	0.913 ± 0.008

注1: IP是四次实验结果; SO₂、NO₂是三次实验结果; CO是两次实验结果。

注2: 煤饼由85%阳泉无烟煤与15%黄粘土配比而成。液化石油气由上海液化气管理所提供, 气体密度2.36kg/m³, 主要成份是丁烯、丁烷类, 约占全部成份的97%。

根据我国居民习惯, 提供每月燃料消耗量并不困难, 因此 $\bar{S}$ 可通过下式计算得到:

$$\bar{S}(\text{mg/h}) = \frac{\text{单位燃料排污强度}(\mu\text{g/kg 或 } \mu\text{g/m}^3) \times \text{每月燃料消耗量}(\text{kg 或 m}^3)}{30(\text{d}) \times 24(\text{h})} \quad (6)$$

(二) 室内换气量 q

上海地区开窗与关窗时间调查结果

表 2

季 节	开窗时间 (%)	关窗时间 (%)
冬 季 (气温0~10°C)	6.58 ± 1.06	93.42 ± 1.06
春 秋 季 (气温10~20°C)	26.25 ± 3.49	73.75 ± 3.49
夏 季 (气温20~30°C)	62.92 ± 3.51	37.08 ± 3.51
全年平均	31.92 ± 4.27	68.08 ± 4.27

注: 开窗时间折算成全部窗户(包括阳台门), 如某住宅有三扇窗, 其中一扇每天开3小时, 另两扇不开, 则折算成三扇窗全开1小时。

在以机械通风为主的住宅得到这一参数并不困难。但是对于自然通风的住宅, 由于建筑结构、生活习惯、住宅层次等多种因素变化, 要得到平均换气次数是较困难的。较经典的测定气体交换次数的方法是用氟里昂-12示踪剂, 但此方法要用专门试剂和仪器, 并且仍不能解决开窗关窗时间比例对换气次数的影响。本文探讨用计算的方法得到某类型新村住宅年平均换气次数。

1. 开关窗时间调查

在自然通风住宅内, 开窗是主要的通风手段。关窗时室内外空气交换仅靠门、窗缝隙渗入和流出, 换气量明显减少。开窗时间受气候、住宅朝向、生活习惯等因素影响, 其中气温是最主要的因素。以调查表的形式, 请12名居住新村住宅的专业人员填写不同季节开、关窗时间比例, 结果见表2。

2. 开窗时室内换气量推算

开窗时通过窗孔的空气量 L_0 (m³/h)

为:

$$L_0 = V_w \cdot F \cdot 3600 \quad (7)$$

式中 V_w ——空气流过窗孔时的流速 (m/s)

F ——窗孔面积 (m^2)

建筑物窗孔两侧的压力差 ΔP 是引起自然通风的动力, ΔP 包括热压和风压。由于六层以下的建筑物可以不考虑热压作用^[4], 故 ΔP 只需考虑风压作用。用室外空气流速 V 推算 V_w , 受到空气动力系数 K 及窗孔流量系数 μ 的影响, 其关系为:

$$V_w = \mu \cdot V \cdot \sqrt{K} \quad (8)$$

式中 μ ——窗孔流量系数, μ 值大小与窗孔构造有关, 一般小于 1。

V ——室外空气流速 (m/s)

K ——空气动力系数^[5], 相当于将动压转换成静压的比例。

式中 K 值可从文献中查到, 上海夏季主导风向为东南风时, 朝南窗孔的 K 值约为 0.3, 上海夏季的室外平均风速约为 3m/s , V_w 也可用微量风速计测定获得。当 K 、 V_w 和 V 都在已知条件下, 测得上海市新村住宅窗孔流量系数 μ 值约为 0.1。

将式 (8) 代入式 (7), 得到开窗时室内换气量的推算公式:

$$L_o = \mu F V \sqrt{K} \cdot 3600 \quad (9)$$

3. 关窗时室内换气量的估算^[4,6]:

由于室内外存在温差和压差, 室外空气通过门窗缝隙渗入室内。通过门窗缝隙渗透的空气量与门窗结构、朝向、热压和室外风速、风向等因素有关。常用的推算方法有缝隙法、换气次数法等, 下面仅将换气次数法作一介绍。

采用换气次数法估算渗入室内空气量非常简便, ASHRAE (美国采暖制冷和空调工程师协会) 也曾提出用此法估算渗透空气量。具体方法是根据住房结构查表即可 (表 3)。

关窗时室内换气量 L_o (m^3/h) 为:

$$L_o = \text{换气次数 (次/h)} \times \text{房间体积 (m}^3\text{)} \quad (10)$$

根据式 (9) 和式 (10) 可计算室内换

气量 q 。为方便计算, 将开窗与关窗的时间百分率取近似值 0.3 和 0.7, 则:

$$q = L_o \cdot 0.3 + L_c \cdot 0.7 \quad (11)$$

根据门、窗暴露面数推算室内换气次数

表 3

房屋具有外窗、外门的暴露面数目	1 面	2 面	3 面
房间换气次数 (次/h)	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} - 1$	$1 - 1\frac{1}{2}$

注: 本表适用于冬季室外平均风速 $\leq 3\text{m/s}$ 的地区。

(三) 衰减常数 K

污染物衰减速率也是决定室内空气污染浓度变化的因素之一。其它条件不变时, 衰减速率越快, 室内空气污染浓度就越低。各种污染物的衰减速率不同, 主要与其理化性质有关。

在密闭性较好, 且建筑材料与居民住宅比较相似的染毒室进行基本不通风条件下四种污染物衰减速率测定。先将污染物发生到较高浓度, 然后在不同时间测定其浓度, 观察衰减情况, 共观察 60 至 90 min。将测定结果作指数曲线拟合, 得出回归方程式如下:

1. 可吸入颗粒物

$$\hat{y} = 0.2288e^{-0.00385t}$$

$$r = -0.9791 \quad P < 0.01 \quad R^2 = 0.9672$$

2. CO

$$\hat{y} = 5.1826e^{-0.01163t}$$

$$r = -0.9822 \quad P < 0.01 \quad R^2 = 0.9730$$

3. SO₂

$$\hat{y} = 3.0321e^{-0.00829t}$$

$$r = -0.9834 \quad P < 0.01 \quad R^2 = 0.9652$$

4. NO₂

$$\hat{y} = 1.1346e^{-0.01105t}$$

$$r = -0.9986 \quad P < 0.01 \quad R^2 = 0.9966$$

四种污染物的衰减常数 K 分别为:

可吸入颗粒物: -0.00385 ; CO:

-0.01163 ; SO₂: -0.00829 ;

NO₂: -0.01105 。

三、讨 论

研究室内空气污染对人体健康影响, 必

须获得室内空气中各种污染物浓度,这是确定剂量—反应关系的前提。由于各种因素,进行室内长期监测几乎不可能。1974年Shair等提出了室内空气污染的理论模式,推算室内空气污染的平均水平,以弥补监测数据的不足。10多年来,模式的发展很快,除质量平衡理论模式和经验模式外,还有一种为半理论半经验模式。经验模式精度较高,计算方便,但适用面较狭窄。理论模式适用面较宽,但计算复杂,且需较多的参数,其中有些参数不易得到。半理论半经验模式介于两者之间,兼有两者的优缺点,应用较为广泛。我国关于室内空气污染数学模式的研究,尚属起步阶段。我国住宅类型复杂,室内基本采用自然通风,燃料结构也与国外大不相同。针对我国现状,应从经验模式着手,积累经验,建立参数,逐步向半经验半理论乃至理论模式过渡。

室内空气污染数学模式具有多种用途^[1]:(1)可用于流行病学调查中估计人们对室内空气污染物的接触量;(2)可增进对室内空气污染过程的具体了解;(3)可以模拟进入参数改变后的效应。Dockery等^[2]曾在美国6个城市共68户家庭进行实测浓度与数学模式推算浓度的比较,证明其相关性良好,颗粒物和硫酸盐的相关系数分别为0.81和0.87。用数学模式推算室内空气污染浓度,得到的结果是平均浓度。根据所给参数的含义,可以是日平均浓度,月平均浓度,甚至是年平均浓度。但室内空气实际污染状况是动态变化的。通风条件的改变,尤其是污染源排污情况的改变,都可使室内污染浓度有较大的起伏,这种变化规律只能通过实测得到。有些污染物对人体健康的危害不但与其平均浓度有关,而且也与瞬间的峰值浓度有关,这种峰值浓度通

过现有的室内空气污染数学模式不易得到。因此,数学模式和实测两种方法可互为补充。积累大量的实测浓度,既可验证数学模式的准确性,又可为修正模式中某些参数提供必要的依据,使之更为完善。

四、小 结

本文对室内空气污染数学模式进行了探讨:

(一)对Dockery等提出的模式加以改进,提出了比较符合我国实际情况的室内空气污染数学模式。

(二)通过实验,提出了三种燃料燃烧过程IP、SO₂、NO₂和CO的排放强度。

(三)综合文献资料,提出一种计算室内平均换气次数的简便方法。

(四)通过实验,得到IP、SO₂、NO₂和CO在室内的衰减速率,提出了四种污染物的衰减常数。

参 考 文 献

- [1] 杨新建,环境科学丛刊,6(10),10—16,(1985)。
- [2] Dockery, D. W. et al., Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles, Atmospheric Environment, 15(3), 335—343(1981)。
- [3] 沈迪新等,环境科学,2(6),41—44(1981)。
- [4] 哈尔滨建筑工程学院编,供热工程,18,中国建筑工业出版社,北京,(1980)。
- [5] 湖南大学等编,工业通风,165,中国建筑工业出版社,北京,(1980)。
- [6] Wadden, R. A. et al., Indoor air pollution, 108, A wiley-Interscience publication, U.S.A(1983)。
- [7] WHO, Estimating human exposure to air pollutant, 69, offset publication, geneva, (1982)。

STUDY ON AN INDOOR AIR QUALITY MODEL

Zhou Guodong Yang Mingding Chen Bingheng

(School of Public Health, Shanghai Medical University, Shanghai)

Abstract

Indoor air pollution is a common phenomenon in our country because of coal combustion for cooking indoors. It is very difficult to monitor indoor air pollutant concentration by using monitoring equipment. Indoor pollutant concentrations can be estimated by using indoor air quality models. Improvement is made on the Dockery & Spengler model in this study. A new indoor air quality model which is most suitable in our country is presented,

$\bar{C}_t = PC_0 + \frac{\bar{S}}{q} e^{kt}$. Emission factors and rates of decay are introduced. A simple method is also presented for calculating air changes per hour in rooms.

Key words: Indoor Air Pollution, Rate of Decay.