

室内空气污染预测方法的实证研究

曲洪娟¹, 秦华鹏^{1,2*}, 姚婷婷¹, 栾胜基^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院城市人居环境科学与技术实验室, 深圳 518055; 2. 深港产学研基地深圳环境模拟与污染控制重点实验室, 深圳 518057)

摘要: 在大型(30m³)、小型(1m³)环境箱实验获得数据的基础上构建释放模型, 并将模拟结果和现场监测得到的浓度水平进行对比, 对开发的室内空气污染预测方法进行了实证研究. 以一新装修房间为例, 分别利用大型和小型环境箱实验, 研究了复杂整装材料和简单层状材料的释放规律, 建立了相应材料的污染物释放模型; 依据单元内物质守恒理论和污染物充分混合的假设将释放模型组合, 建立了室内空气污染预测方法, 并预测了该房间甲醛和 TVOC (total volatile organic compounds) 浓度的变化过程. 在考虑了 0.03ACH (air change per hour) 的换气率之后, 模型预测与现场监测的污染物浓度变化趋势基本吻合, 甲醛和 TVOC 污染预测误差(正则化标准差)分别为 2.8% 和 1.6%. 模型分析表明, 各污染源对于甲醛污染的贡献, 家具 > 涂料 > 地板; 对于 TVOC 污染的贡献, 涂料 > 地板 > 家具. 结论表明, 该预测方法可以真实反映现场污染物浓度变化趋势, 可以用来分析各污染源对于整体污染的贡献、指导装修材料的选择和作为室内污染评估和控制的有效工具.

关键词: 室内空气污染; 环境模拟箱; 释放模型; 预测方法; 实证研究

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0290-06

Validation of a Prediction Method for Indoor Air Pollution

QU Hong-juan¹, QIN Hua-peng^{1,2}, YAO Ting-ting¹, LUAN Sheng-ji^{1,2}

(1. Laboratory of Urban Habitat Environmental Science and Technology, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, PKU-HKUST Shenzhen-Hong Kong Institution, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The validation study of the prediction method for indoor air pollution was carried out by comparing the results of emission models based on data obtained in a large and a small emission chamber, with actual measured concentrations. A new decorated room was studied as a case. Emissions of complicated objects and simple surface layer materials were studied respectively in the large and small chamber and emission models were developed. Those models were based on the assumptions regarding mass conservation of substances and the hypothesis that pollutants were well mixed. The emissions of formaldehyde and TVOC (total volatile organic compounds) in the studied room were predicted by the method. The predicted concentration trend of pollutants was in accordance with the measured trend when some air exchange (0.03ACH, air change per hour) was taken into account. The normalized standard errors of formaldehyde and TVOC pollution prediction were respectively 2.8% and 1.6%. Modeling analysis shows that the contribution to total formaldehyde pollution of the studied room was: furniture > paint > floor; the contribution to total TVOC pollution was: paint > floor > furniture. The results lead to the conclusion that this prediction method can well describe the pollution trend, can assess the contribution of different sources, can guide the choice of building materials and is an effective tool for indoor air pollution assessment and control.

Key words: indoor air pollution; environmental chamber; emission models; prediction method; validation study

随着现代人生活和工作形态的改变, 特别是计算机和互联网的普及, 大多数人会平均花费 80% ~ 90% 的时间在各种室内环境中生活、学习和工作^[1,2], 室内空气质量对人们的身心健康、工作效率至关重要. 但研究表明, 许多家居和办公场所的空气污染程度是室外空气污染的 2~5 倍, 有的甚至超过 100 倍. 室内空气污染已经列入对公众健康危害最大的 5 种环境因素之一, 美国环保局(EPA)也已经将室内环境污染列为除大气污染、工作间有毒化学品污染和水污染外的第四大环境危害^[3].

就我国目前而言, 引起室内空气污染最主要的原因是甲醛等挥发性有机污染物为代表的化学性

污染^[4]. 尽管现场监测结合国家相关环境质量标准, 其数值本身就可以对室内环境质量和暴露水平进行评价, 但现场监测有很大的不确定性. 一方面, 现场监测容易受到人为活动等因素的影响, 另一方面, 现场监测并不能说明其长期的室内浓度水平^[5], 也不能反映室内通风和温、湿度变化对室内污染物实际浓度的影响. 基于室内环境箱的模拟实验是国际上广泛采用的室内污染研究方法, 实验数据通常以污

收稿日期: 2007-03-12; 修订日期: 2007-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50308003)

作者简介: 曲洪娟(1981~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划与管理, E-mail: qhjpku@126.com

* 通讯联系人, E-mail: qinhuapeng@iee.pku.edu.cn

染物释放模型的方式来描述.欧美等发达国家从 20 世纪 80 年代就开始进行室内材料和产品中污染物释放规律的研究,针对不同类型材料的污染物释放特征,开发了相应的释放模型,如 Zeh 等^[6]的一阶衰减模型、Tichenor 等^[7]的 VB (vapor pressure and boundary)模型、Van 等^[8]的传输模型等.然而 Guo^[9]指出,大部分模型都只有一定程度的有效性,真正的预测模型很少.国内关于室内污染物释放规律及控制技术的研究^[10-14]主要采用小型环境模拟箱进行,目标试件多为基础材料,并不能有效模拟室内实际材料使用情况,更不能真实反映大型、复杂组合材料的污染物释放情况,而且普遍存在的问题是环境箱模拟研究没有能够与室内现场监测研究相结合.虽然国际上也有研究者采用大型环境箱实验^[15]或现场监测的数据^[16]来评价模型在真实条件下的有效性,但有针对性的实证研究仍然很缺乏.

本文结合以上实际问题,综合运用大、小尺度环境箱实验、释放模型等多种手段,以甲醛和 TVOC 作为主要污染物,对开发的室内空气污染预测方法进行了实证研究.

1 材料与方法

1.1 环境箱模拟系统

实验中采用的环境箱模拟系统如图 1 所示,由环境箱、清洁空气供应与气流调节系统、温度与湿度调节系统、气体采样和分析系统等设备组成.

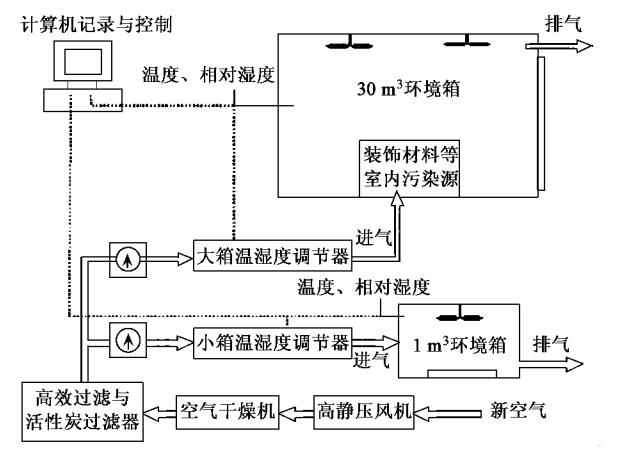


图 1 环境箱模拟系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the chamber system

环境箱的内壁由电抛光不锈钢制成,环境箱的门、所有接头和接缝都采用惰性的密封材料进行密封,可以避免环境箱本身释放或吸附污染物对测试结果的干扰.环境箱的温度、湿度和通风率可以控

制,因而可以提供测试所需的环境条件.温度调节系统由控制器、空调和加热器构成;湿度调节系统由控制器调节加入干湿空气的比例而变化湿度,湿空气是通过将清洁干燥空气通过加湿装置而得到的.

在开展环境箱模拟实验时,首先要调查实际室内环境中材料的使用情况(材料类型、品牌、用量、出厂或开封时间等)、环境条件(温度、湿度、通风与背景浓度等).对于小型室内用品、可取样或可拆卸的材料主要采用小型环境箱(1 m³)测试其污染物释放特性;而复杂整装材料或家具,主要采取用大型环境箱(30 m³)进行实验.环境箱温度、湿度按照实际室内环境条件设定;环境箱的通风量设置为与实际情况一致.

本实验所使用的小环境箱参照《室内装饰装修材料:人造板及其制品中甲醛释放限量》(GB 18580-2001)中指定的气候箱法设计,性能稳定.陈晓丹等^[17]对大环境箱实验条件、密封与混合以及本底污染物浓度等主要性能进行了测试,证明大箱能为室内空气污染研究提供条件稳定、背景干扰小的室内仿真环境.

1.2 释放模型

释放模型主要有经验模型和传输模型 2 种,模型参数都可以通过拟合环境箱试验的数据得到.由于大环境箱体积与房间实际体积接近,大环境箱模拟得到的模型参数可直接应用于实际环境;而小环境箱体积与房间实际体积差异较大,小环境箱模拟结果在一定条件下才能推广到实际环境.本实验通过对相同材质的人造板在大、小尺度环境箱内甲醛释放过程进行模拟,研究环境箱尺寸对材料污染物释放模型参数估值的影响:首先将 1 块板材(封边,双面暴露)放入大型环境箱,运行 3 d,测试箱内甲醛浓度变化;将板材取出后马上从该块板上截取部分板材,封边后放入小型环境箱,也运行 3 d,小型环境箱的温度、湿度、换气率等环境条件与大箱一致;由于时间相隔较短,可以近似认为测试样本的释放特征参数保持不变;分别利用大箱和小箱数据对该块板材的释放模型进行参数估值.研究表明(表 1),如果释放模型选用经验的指数衰减模型,大小环境箱数据拟合得到的模型参数差异较大,这说明小箱数据模拟得到的模型不能适用于大箱或实际环境;如果选用基于物质传输的机理模型,两套数据拟合得到的模型参数差异较小,说明传输模型具有较好的普适性,可以将小箱数据模拟得到的模型应用于大箱或实际环境.因此,对于简单层状材料,可选择

表 1 大、小环境箱对比实验¹⁾

Table 1 Comparison experiments in different chambers			
项目	指标	小环境箱	大环境箱
环境箱测试条件及试件	温度/℃	23.0	23.0
	相对湿度/%	45.0	45.0
	换气率/h ⁻¹	1	1
	体积/m ³	1	30
	材料面积/m ²	1	23.8
	载荷率/m ⁻¹	1	0.794
	材料厚度/m	0.015	0.015
指数衰减模型参数	$E_0/\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	0.176	0.181
	k/h^{-1}	0.0186	0.0048
物质传输模型参数	$c_{n0}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	2.10E+07	2.10E+07
	$h/\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$	5.54 E-03	5.54 E-03
	$D_m/\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$	8.10 E-12	1.10 E-11
	k_p	5.00E+03	5.00E+03

1) E_0 为 VOC 初始释放参数, k 为 VOC 释放衰减常数, c_{n0} 为表层材料内部 VOC 初始浓度, h 为表层材料平均气相物质传输系数, D_m 表层材料中 VOC 的扩散系数, k_p 为表层材料与空气间的热力学物质平衡分配系数

物质传输模型来描述污染物释放规律, 并通过小环境箱试验进行参数估值; 而对于复杂整装材料, 则采用经验模型, 并用大环境箱试验进行参数估值.

1.3 预测方法描述

本研究开发的预测方法包括环境箱模拟实验、材料污染物释放参数估值、模型预测 3 个部分. 根据环境箱实验数据, 对污染物释放模型中的参数进行估值. 对于简单层状材料(如内墙涂料、木地板等), 可以采用物质传输模型描述其污染释放过程, 需要对 D_m 、 k_p 、 h 等参数进行估值; 对于复杂整装材料(如家具、电子用品等)则采用指数衰减模型, 需要对 R_0 、 k 等参数进行估值. 根据物质守恒理论和污染物充分混合的假设, 将各种室内材料的污染物释放模型集成于物质守恒方程中, 可以构建室内空气污染预测模型^[15,18~21]. 该模型包括的主要控制方程如下.

$$V\frac{dc_a}{dt} = Q(c_{in} - c_a) + \sum_{i=1}^{N1} R_i + \sum_{j=1}^{N2} S_j E_j \quad (1)$$

$$E_j = h_j \left(\frac{c_{mj,b}}{k_{pj}} - c_a \right) \quad (2)$$

$$h_j \left(\frac{c_{mj,b}}{k_{pj}} - c_a \right) = - D_{mj} \frac{\partial c_{mj}}{\partial y_j} \Big|_{y_j=b} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_{mj}}{\partial t} = D_{mj} \frac{\partial^2 c_{mj}}{\partial y_j^2} \quad (4)$$

$$R_i = R_{0i} \exp(-k_i t) \quad (5)$$

式中, V 为主流空间的有效容积(m^3); c_a 为边界层外主流空气中的 VOCs 浓度(mg/m^3); Q 为主流空

间的换气流量(m^3/h); c_{in} 为进气中的 VOCs 浓度(mg/m^3); $N1$ 为复杂整装材料的数目; $N2$ 为简单层状材料的数目; S_j 为第 j 种表层材料释放面积(m^2); E_j 为第 j 种表层材料 VOCs 释放参数 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]; h_j 为第 j 种表层材料平均气相物质传输系数(m/h); c_{mj} 为第 j 种材料中 VOC 浓度(mg/m^3); $c_{mj,b}$ 为第 j 种表层材料厚度为 b 处的 VOC 浓度(mg/m^3); k_{pj} 为第 j 种表层材料与空气间的热力学物质平衡分配系数; D_{mj} 第 j 种表层材料中 VOC 的扩散系数(m^2/h); y_j 为第 j 种表层材料中发生 VOC 的扩散的位置坐标; R_i 为第 i 种整装材料 VOCs 释放率(单位时间的释放量, mg/h); R_{0i} 第 i 种整装材料 VOCs 初始释放率(mg/h); k_i 第 i 种整装材料 VOCs 释放衰减常数(h^{-1}).

联立方程(1)~(5), 同时考虑相应的边界条件和初始条件, 采用有限差分法, 可以建立材料中有机污染物释放的通用数学模型, 在实际建模中还考虑了材料的空间载荷率和材料内部 VOCs 初始浓度分布.

2 实证研究

针对深圳市的家居装修状况(采用问卷调查等方式搜集资料), 选取了 1 户简装修家庭的儿童房进行模拟研究. 该家庭初装修完成时间为 3 个月, 监测房间体积为 30 m^3 , 主要装修材料如表 2 所示.

表 2 装修材料使用状况

Table 2 Building materials using in the newly decorated room			
主要材料	品牌(材料)	装修工艺(材料)	载荷率/ m^{-1}
实木地板	鸿基龙凤檀(二翅豆)	铺钉	0.42
内墙涂料	多乐士	涂刷	1.6
家具	高密度板	订做	/

主要监测项目为甲醛、TVOC 和 VOCs(本研究暂只对甲醛和 TVOC 结果进行讨论). 采集的甲醛样品采用酚试剂(MBTH)分光光度法(GB/T 18204.26-2000)、岛津紫外分光光度计 1700 进行分析. TVOC 监测采用 PhoCheck5000Ex (ION, England) 便携式 VOCs 检测仪. VOCs 采用 Tenax TA 吸附管采集样品, 热解析/气相色谱-质谱法(EPA TO-17)进行分析. 温度和湿度等环境条件使用便携式 Q-Trak 8551(TSI Inc., USA)探测器进行实时监测并存储数据.

通过现场污染物监测结果和环境条件考察, 初步判断室内空气污染源来自实木地板、内墙涂料和家具, 因此, 本研究将这 3 种材料作为环境箱模拟研究试件. 实木地板、家具、内墙涂料由该家庭提供, 其

中测试木板样品光面暴露,铝箔胶封底、封边,内墙涂料按照现场施工工艺涂刷后风干数日.各种材料使用量完全按照现场的实际承载率准备.根据现场监测结果,平均环境温度为 18℃,平均相对湿度为 45%,因此环境箱温度和相对湿度分别控制在 18℃和 45%,为模拟现场密闭条件,环境箱空气交换率设为 0 ACH.

3 结果与讨论

3.1 测试样品的释放规律与数学模拟

3.1.1 小环境箱测试

如图 2(a)和 2(b)所示,地板释放的甲醛浓度在 36 h 时达到 0.028 mg/m³,48 h 时和 56 h 时浓度值较

高,在实验误差范围之内,甲醛初始释放速率很快,12 h 以后释放趋势变缓.TVOC 在 46 h 时达到 523 μg/m³,释放量一直呈稳定上升趋势,初始释放速率并没有明显高于后期释放.实验结果表明,地板的甲醛和 TVOC 释放量都比较高.由释放模型参数对比可见,甲醛释放模型的 D_m 、 k_p 值显著高于 TVOC 释放模型,因此可以推测污染物在材料内部的扩散系数和界面分配系数会影响污染物初始释放速率.

如图 2(c)和 2(d)所示,涂料释放的甲醛浓度在 10 h 时达到0.015 7 mg/m³,TVOC 在 48 h 时达到 583 μg/m³.由实验结果可知,干涂料的甲醛释放量较低,而 TVOC 释放量较高.用传输模型拟合实验数据所得各参数见表 3.

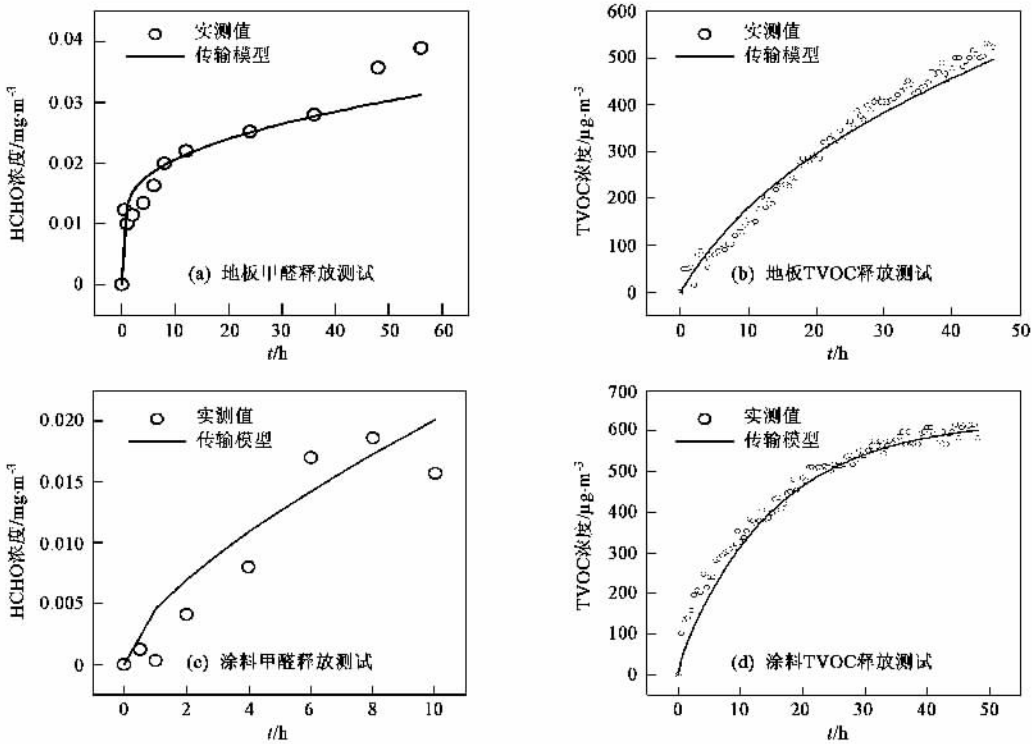


图2 小环境箱测试

Fig.2 Emissions in the small chamber

表3 传输模型参数

Table 3 Transfer model parameters

项目	材料厚度 b/m	扩散系数 $D_m/m^2 \cdot s^{-1}$	初始浓度 $c_{m0}/mg \cdot m^{-3}$	空气传输系数 $h/m \cdot s^{-1}$	界面分配系数 k_p
地板甲醛测试	0.015	3.30E-12	7.30E + 03	5.54E - 03	4.70E + 04
地板 TVOC 测试	0.015	1.00E-13	7.50E + 04	5.54E - 03	2.00E + 02
涂料甲醛测试	0.002	5.00E-13	5.00E + 02	5.54E - 03	1 E + 03
涂料 TVOC 测试	0.002	1.20E-11	8.40E + 02	5.54E - 03	1 E + 03

3.1.2 大环境箱家具测试

如图 3 所示,家具释放的甲醛浓度在 56 h 时达

到0.089 2 mg/m³,TVOC 在 30 h 时达到 152 μg/m³.由于家具属于整体释放,采用指数衰减模型拟合,模型

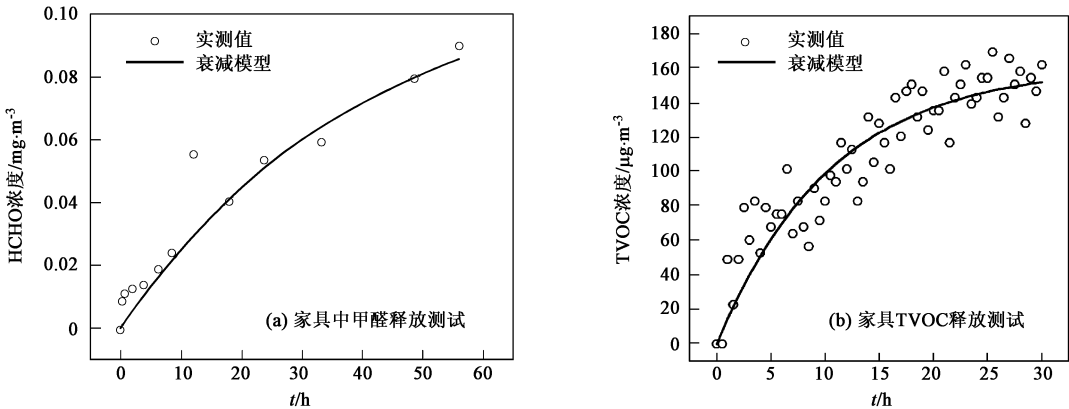


图 3 大环境箱测试
Fig.3 Emissions in the large chamber

参数及拟合优度 R^2 见表 4.家具的甲醛释放量很高,且释放速率稳定(曲线平缓下降),TVOC 释放量很低,释放速率逐渐减小.

表 4 家具释放衰减模型参数			
Table 4 Decay model parameters of fumiture emissions			
项目	$R_0/\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$	k/h^{-1}	R^2
甲醛测试	0.088	0.026	0.976
TVOC 测试	0.459	0.095	0.839

3.2 预测模型与现场实测对比

运用预测模型可以预测几种材料在实际用量、

实际承载率下的组合释放.单独材料的预测曲线可以表明每种材料对于整体污染的贡献,图 4 表明,对于甲醛污染的贡献,家具>涂料>地板,对于 TVOC 污染的贡献,涂料>地板>家具.如图 4(a)所示,在 30 h 时,地板单独释放(“地板”曲线)的甲醛浓度是 $0.0264\text{ mg}/\text{m}^3$, 涂料单独释放(“涂料”曲线)的甲醛浓度是 $0.0458\text{ mg}/\text{m}^3$, 家具单独释放(“家具”曲线)的甲醛浓度是 $0.0607\text{ mg}/\text{m}^3$.如图 4(b)所示,在 20 h 时,地板单独释放的 TVOC 浓度是 $296.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 涂料单独释放的 TVOC 浓度是 $478.4\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 家具单独释放的 TVOC 浓度是 $137.3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.

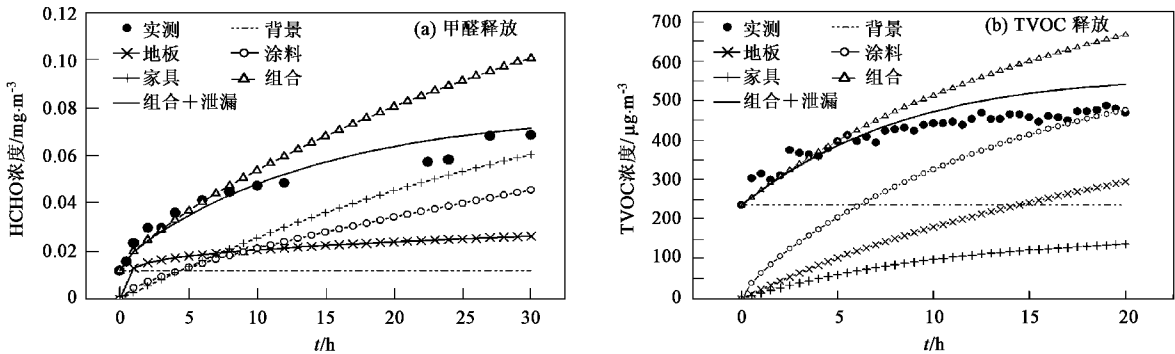


图 4 预测模型与现场实测对比
Fig.4 Comparison of predicted values and measured values

需要指出的是 3 种材料对整体污染贡献的描述并不是简单的量的描述,而是对贡献程度的描述,3 种材料的组合释放并不是简单的加合,而是考虑了各种材料相互作用影响和现场污染物背景浓度(“背景”曲线)影响的组合释放.如图 4(a)所示,现场甲醛背景浓度为 $0.012\text{ mg}/\text{m}^3$,现场 TVOC 背景浓度为

$237\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.各种材料组合释放(“组合”曲线)的甲醛浓度在 30 h 时达到 $0.1010\text{ mg}/\text{m}^3$,组合释放的 TVOC 浓度在 20h 时达到 $667.7\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.

结果显示,甲醛和 TVOC 的预测值均比实测值(“实测”曲线)偏高,装修家庭现场在 30 h 时甲醛浓度为 $0.0689\text{ mg}/\text{m}^3$,在 20 h 时 TVOC 浓度为 470.4

$\mu\text{g}/\text{m}^3$.这是因为组合释放是环境模拟箱完全模拟密闭环境得到的实验值,而实际现场污染物释放还受到很多因素的影响,比如温度、湿度、通风等环境条件的改变、墙面等对污染物的吸附作用以及采样等人为因素的影响,尤其是房间泄漏的影响是不能忽视的.参考以往对于房间通风和泄漏方面的研究,笔者在模型中考虑 0.03 ACH 的换气率后,预测值(“组合+泄漏”曲线)就会趋近实测值,甲醛浓度在 30 h 时达到 $0.0718\text{ mg}/\text{m}^3$,TVOC 浓度在 20 h 时达到 $542.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.考虑了房间泄漏的预测值与实测值之间的误差,以公式(1)所示的正则化标准差 $E^{[22]}$ 表示,甲醛污染预测的误差为 2.8%,TVOC 污染预测的误差为 1.6%.

$$E = \frac{\sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{mi})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{ci}} \tag{1}$$

式中, q_{ci} 表示第 i 个预测值, q_{mi} 表示相对应的第 i 个测量值, n 表示测量值个数.正则化标准差在 10% 以内是可以接受的^[23].

4 结论

考虑了表面材料释放和大型物件整体释放的组合模型,能够很好地对多种材料的组合释放进行模拟预测,模型参数具有很强的物理意义,并在实际调试中得到了验证.对装修居室污染物释放的模拟研究表明,各污染源对于居室甲醛污染的贡献,家具 > 涂料 > 地板;对于 TVOC 污染的贡献,涂料 > 地板 > 家具.考虑了现场背景浓度和一定的房间泄漏后,污染预测值与现场实测值发展趋势基本吻合.因此,该预测方法可以真实反映现场污染物浓度变化趋势,可以用来分析各污染源的贡献,可以用来指导装修材料的选择,并可以作为室内污染评估和控制的有效工具.

致谢:感谢于广河老师在环境箱实验中给予的细心指导以及李晖女士在实证研究中的热心支持.

参考文献:

[1] 徐东群,崔九思.室内空气污染卫生监督管理研究进展[A].见:第二届全国卫生检测工作研讨会会议论文集[C].2000, 1: 23-24.

[2] Klepeis N E, Nelson W C, Ott W R, *et al.* The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants [J]. *Journal of Exposure Analysis and*

Environmental Epidemiology, 2001, **11**: 231-252.

[3] 袁中山,张金昌,吴迪镛,等.室内环境污染研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2001, **2**(1): 9-16.

[4] 潘小川.室内环境的健康风险评估[J]. *建筑热能通风空调*, 2006, **25**(5): 7-10.

[5] 林培喜,程丽华,周锡堂.新装修居室空气中甲醛浓度[J]. *环境与健康杂志*, 2005, **22**(2): 132-133.

[6] Zeh H, Kohlhammer K, Krell M. VOC-emission from latex paints and plasters during application [J]. *Surface Coatings International*, 1994, **4**: 142-151.

[7] Tichenor B A, Guo Z, Sparks L E. Fundamental mass transfer model for indoor air emissions from surface coatings [J]. *Indoor Air*, 1993, **3**(4): 263-268.

[8] Van Veen M P, Fortezza F, Bloemen H, *et al.* Indoor air exposure to volatile compounds emitted by paints: experiment and model [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1999, **9**(6): 569-574.

[9] Guo Z S. Review of indoor emission source models. Part1. Overview [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **120**(3): 533-549.

[10] 张盛华.室内空气监测中的存在问题及对策[J]. *环境技术*, 2005, **1**: 13-14.

[11] 曾海东,张寅平,王庆苑,等.用密闭小室测定建材 VOC 散发特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44**(6): 778-781.

[12] 白雁斌,刘兴荣.模拟仓内温度对甲醛扩散的影响[J]. *中国公共卫生*, 2003, **19**(5): 577-578.

[13] 白志鹏,王宗爽,贾纯荣,等.应用环境舱研究室内混凝土墙体中氨的释放规律[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(2): 117-121.

[14] 白志鹏,余欢,燕丽,等.室内涂料挥发性污染物的危害和排放规律研究[J]. *国外建材科技*, 2004, **25**(4): 8-10.

[15] D6670-01, Standard Practice for Full-Scale Chamber Determination of Volatile Organic Emissions from Indoor Materials/Products[S].

[16] Guo H, Murray F, Lee S C. The development of low volatile organic compound emission house-a case study [J]. *Building and Environment*, 2003, **38**(12): 1413-1422.

[17] 陈晓丹,秦华鹏,于广河,等.全尺度室内环境模拟箱研制及性能评测[J]. *环境监测管理与技术*, 2007, **19**(3): 12-15.

[18] D5116-97, Standard Guide for Small-Scale Environmental Chamber Determinations of Organic Emissions From Indoor Materials/Products [S].

[19] Spengler J D, Samet J M, McCarthy J F, *et al.* Indoor air quality handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

[20] Little J C, Hodgson A T, Gadgil A J. Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(2): 227-234.

[21] Huang H, Haghighat F. Modeling of volatile organic compounds of emission from dry building materials [J]. *Building and Environment*, 2002, **37**(12): 1349-1360.

[22] Squires G L. Practical physics [M]. London: McGraw Hill, 1968.

[23] Qin H P, Ni J R, Borthwick A G L. Harmonized Optimal Postreclamation Coastline for Deep Bay, China. [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, **128**(6): 552-561.