

# 城市新装修家庭 TVOC 的污染现状以及影响因素分析

刘建磊<sup>①</sup>, 白鸽<sup>①</sup>, 陈洁<sup>②</sup>, 朱利中<sup>①④</sup>, 郭伟强<sup>③④</sup>, 沈学优<sup>①④\*</sup>

① 浙江大学环境科学系, 杭州 310058;

② 浙江省德清县环境保护监测站, 湖州 313200;

③ 浙江大学化学系, 杭州 310058;

④ 浙江省有机污染与过程控制重点实验室, 杭州 310058

\* 联系人, E-mail: shenxueyou@zju.edu.cn

2010-12-01 收稿, 2011-02-16 接受

国家自然科学基金(20890111, 20977075)、国家高技术研究发展计划(2010AA064902)和浙江省重点科技创新团队(2009R50047)资助项目

**摘要** 以杭州市居民家庭为例, 采集调查了 2007~2009 年装修 1 年以内的 2302 个室内空气样本(卧室、客厅和书房), 分析其 TVOC 的浓度水平和变化规律. 结果显示, 新装修家庭 TVOC 总体平均浓度水平为  $0.65 \pm 0.69 \text{ mg/m}^3$ , 超标率达 35.8%, 近 3 年 TVOC 浓度水平呈先大幅降低后略微提升的趋势( $P < 0.05$ ), 所监测的各类房间中 TVOC 的超标率为客厅 > 书房 > 卧室. 源特征是影响 TVOC 浓度的主要因素, 而环境扩散参数是影响 TVOC 浓度的重要因素. 本文发现了 4 个环境条件与 TVOC 浓度水平呈显著相关性( $P < 0.05$ ), 其中装修时间、门窗自然封闭时间明显高于温度和湿度对 TVOC 浓度的影响. 以各因素统计齐全的 288 个样本为基础, 建立了装修时间、门窗自然封闭时间、温度、湿度以及源特征 5 个变量与室内 TVOC 浓度水平的拟合关系式( $R^2 = 0.83$ ); 由拟合式可知, 不同月份装修完毕的各类房间 TVOC 浓度达标所需的时间存在一定差别. 在其他因素固定的情况下, 门窗自然封闭时间( $t_1$ )对 TVOC 浓度水平的影响可以量化为  $\left(\frac{t_1 + 1}{2}\right)^{0.212} - 1 \times 100\%$ .

## 关键词

室内空气  
TVOC  
空气质量  
影响因素分析

随着生活水平的提高, 人们越来越重视室内装修, 由各种装饰装修材料带来的室内空气污染问题也越来越多, 引起城市居民和学者们的广泛关注. 来源于各种油漆、涂料、人造板材、胶类、地毯等<sup>[1]</sup>的总挥发性有机物(TVOC)是室内空气污染监测的重点指标之一, 对神经系统、呼吸系统和皮肤有较强毒性, 可引起致病建筑物综合征(SBS)<sup>[2,3]</sup>, 其中苯更有强致癌作用(USEPA, 1998). 世界卫生组织(WHO)、美国科学院/国家研究理事会(NAS/NRC)等机构一直强调 TVOC 是一类重要的室内空气污染物, 控制 TVOC 是提高室内环境质量的重要手段之一.

目前室内 TVOC 污染的研究多集中在描述其在室内的浓度水平<sup>[4,5]</sup>和揭示室内装饰装修材料中 VOCs 的释放规律<sup>[6-8]</sup>. 浓度水平的描述能了解某一

地域的建筑在过去某段时间 TVOC 的污染状况, 为制定防治措施提供参考, 但对不同地区和未来一段时间的指导意义有限, 因此需要对这类数据做进一步的统计分析以发现其内在规律. 很多学者利用暴露小室研究了部分因素对 VOCs 释放率的影响, 在理论上推导出了多种综合效应模式, 基本揭示了 VOCs 释放的规律. 但这些模式大多用的是微观变量且计算较复杂, 要将其应用于实际环境还有部分问题亟需解决. 部分经验模式可以较好地描述室内材料中 VOCs 的释放率, 但其中各经验参数的物理意义不很清楚, 难以把源参数和环境参数对释放率的影响分开进行描述. 因此, 探究重要的源参数和环境参数与室内 TVOC 浓度的独立及综合作用关系并将其量化有重要的理论和实践意义.

本文以杭州市近3年的2000多个室内TVOC样本为基础,总结了与城市居民关系密切的3类房间中TVOC的浓度水平、变化规律,丰富了室内空气污染监测的数据库.通过对关键源参数和环境参数的拟合,定量描述了各参数对TVOC浓度水平的影响,进一步揭示了室内TVOC污染的特征,为制定更合理的室内空气质量标准提供理论和数据支持,同时也可以为居民针对不同的环境条件判断装修后的合理入住时间提供参考.

## 1 材料与方 法

(i) 仪器和试剂. 气相色谱仪(FULI 9790, 浙江福立分析仪器有限公司, 温岭, 中国); 色谱柱(SE-30 50 m×0.32 mm 毛细管柱, 南京伽诺仪器仪表有限公司, 南京, 中国); 热解析仪(FULI 9700, 浙江福立分析仪器有限公司, 温岭, 中国); 电子时控大气采样器(DDY-1.5, 建湖县兴宇分析仪器厂, 江苏, 中国); 电子温湿度仪(HTC-1, 郑州博洋仪器仪表有限公司, 郑州, 中国); 数字大气压力器(BY-2003P, 苏州泰世电子有限公司, 苏州, 中国); 内装 0.20 mg Tenax-TA 吸附剂(60~80 目)的无缝不锈钢管.

(ii) 样品采集. 杭州市是我国长三角第二大经济城市, 总面积  $1.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 常住人口达 810 万人(2009 年末), 近 3 年每年新建住房竣工面积  $763.95 \sim 948.24 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 其家庭装修在全国城市居民家庭中有一定的代表性. 本实验采集了 2007-01~2009-12 (表 1) 杭州市装修 1 年以内的 902 个楼盘 1598 个家庭 2302 个房间的 TVOC 空气样本, 其中卧室 1981 个,

表 1 TVOC 样本采集量的时间分布表

	2007 年	2008 年	2009 年	总计
1 月	49	48	69	166
2 月	42	12	30	84
3 月	29	26	44	99
4 月	55	46	77	178
5 月	18	95	66	179
6 月	24	103	73	200
7 月	42	109	103	254
8 月	114	130	67	311
9 月	72	88	29	189
10 月	36	86	91	213
11 月	28	115	73	216
12 月	43	108	62	213
总计	552	966	784	2302

客厅 187 个, 书房 134 个(都属于 I 类民用建筑).

采样前, 各室内场所均保持日常状态, 采样时门窗封闭. 采样器距离地面 1.5 m, TVOC 采样时间 10 min, 气体流量 0.4 L/min. 采样完毕, 用封口膜密封采样管两端, 立即带回实验室处理. 采样时同步记录温度( $T$ )、湿度(RH)、大气压力( $P$ )、门窗自然封闭时间( $t_1$ )和装修时间( $t_2$ )等数据(表 2). 其中门窗自然封闭时间是从关闭居室的所有门窗开始到采样开始的时间长度, 以小时(h)为单位, 精确到 0.5 h; 装修时间是家庭装修结束之日到检测当天的时间长度, 以月为单位, 精确到 0.5 个月.

(iii) 实验方法. 采样前将采样管在 350 °C 下通  $\text{N}_2$  活化 1 h, 之后用塑料帽和封口膜封口. 采样后, TVOC 采样管在 250 °C 下热解析 10 min, 进行气相色谱分析. 色谱条件和分析方法参考 GB 50325-2001<sup>[9]</sup>.

用 Excel 2007, SPSS 16.0 和 Eviews 6 等软件对数据进行处理和分析. 影响因素分析是用 Spass 软件的双变量相关性分析功能, 分别计算 TVOC 浓度水平和其他各个变量之间的相关系数及其显著水平( $P$ ). 若  $P < 0.05$  则说明此变量与 TVOC 浓度水平显著相关,  $P < 0.01$  则说明此变量与 TVOC 浓度水平的相关性极显著.

## 2 结果

### 2.1 城市居民家庭 TVOC 的浓度水平

本文所检测的所有房间 TVOC 平均浓度为  $0.65 \pm 0.69 \text{ mg/m}^3$ , 超标率达 37.3%(I 类民用建筑 TVOC 的浓度限值为  $0.50 \text{ mg/m}^3$ ), 最高浓度( $7.2 \text{ mg/m}^3$ )超过了国家标准 14 倍以上<sup>[9]</sup>. TVOC 的平均浓度水平 2008 年较 2007 年显著降低( $P < 0.05$ ), 超标率的降幅在 50% 以上, 但 2009 年又有明显上升的趋势( $P < 0.05$ ) (表 3).

所监测的各类房间中 TVOC 的平均浓度水平都较高(表 4), 均超过了国家标准限值, 超标率为 36%~

表 2 各种影响因素统计表

影响因素	最小值	最大值	平均值	方差	样本数(个)
温度(°C)	1.5	40.0	22.5	8.4	2302
湿度(%)	32.0	93.0	67.5	9.7	2302
门窗自然封闭时间(h)	0.0	240.0	7.2	16.7	2302
装修时间(月)	0.3	12.0	4.4	3.6	288

表 3 近 3 年 TVOC 的浓度水平和超标率

	样本数(个)	最小值(mg/m <sup>3</sup> )	最大值(mg/m <sup>3</sup> )	平均值(mg/m <sup>3</sup> )	方差(mg/m <sup>3</sup> )	超标数(个)	超标率(%)
2007 年	552	0.04	5.80	0.92	0.74	364	65.9
2008 年	966	0.05	6.80	0.51	0.56	254	26.3
2009 年	784	0.08	7.20	0.64	0.77	241	30.7
3 年汇总	2302	0.04	7.20	0.65	0.69	859	37.3

表 4 3 类房间中 TVOC 的浓度水平和超标率

	样本数(个)	最小值(mg/m <sup>3</sup> )	最大值(mg/m <sup>3</sup> )	平均值(mg/m <sup>3</sup> )	方差(mg/m <sup>3</sup> )	超标数(个)	超标率(%)	总超标率(%)
卧室	1981	0.04	6.8	0.64	0.68	713	36.0	
客厅	187	0.06	7.2	0.77	0.85	89	47.6	37.3
书房	134	0.09	5.5	0.71	0.77	57	42.5	

47.6%，其中客厅>书房>卧室。总体来说，卧室的污染程度相对客厅和书房较轻，但差异不显著，整体污染水平较高。

### 2.2 TVOC 浓度水平与各环境因素的相关性分析

影响室内 TVOC 浓度水平的因素较多，一般分为源特征因素(包括建材家俱等 TVOC 释放源的用量、环保等级等)和环境因素(温度、湿度、大气压、室外浓度及通风状况等)两个方面。由样本房间的家俱等信息统计发现，对于新装修家庭 TVOC 的来源来说，装修材料和家俱等室内源比香烟、蚊香、油烟等的室内源和其他室外源的贡献更大，是决定新装修家庭室内 TVOC 浓度高低的主要源特征因素。而环境因素对室内 TVOC 浓度水平的影响也很重要。本实验选择了温度、湿度、装修时间、门窗自然封闭时间以及源特征 5 个可以量化且关注度较高的因素，定量探讨他们与实际环境中 TVOC 浓度水平的相关性。

分析各因素与 TVOC 浓度水平的线性及对数相关关系发现(表 5)，TVOC 浓度水平与装修时间( $t_2$ )有

极显著的负相关关系( $P<0.01$ )，与门窗自然封闭时间( $t_1$ )有极显著的正相关关系( $P<0.01$ )，与温度( $T$ )、湿度(RH)有一定的非线性正相关关系( $P<0.05$ )。其中  $t_1$ 、 $t_2$  与 TVOC 浓度的相关性明显高于  $T$  和 RH。由此，得到了各因素与 TVOC 浓度的最优相关形式，作为建立拟合关系式的基础。

### 2.3 TVOC 浓度水平与各因素之间的定量关系

由于上述因素对 TVOC 浓度都有显著影响，在建模时为尽量准确和全面的反映 TVOC 浓度变化的规律，选用了各因素统计完整的 288 个样本进行拟合。参考上述相关性分析的结果，用 Eviews 软件将调整后的各种变量与 TVOC 浓度拟合，得到最优的表达式形式为

$$\begin{aligned} \ln(C_{\text{TVOC}}) = & C_{(1)} \times \frac{273.15}{T + 273.15} + C_{(2)} \times \frac{1}{\text{RH}} + C_{(3)} \\ & \times \ln(t_1 + 1) + C_{(4)} \times t_2^2 + C_{(5)}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $C_{(1)}$ 、 $C_{(2)}$ 、 $C_{(3)}$ 和  $C_{(4)}$ 为各参数的系数值， $C_{(5)}$ 为常数项。

由表 6 可知，拟合结果  $R^2$  为 0.210364，说明用于建模的 4 个环境因素的变量对 TVOC 的浓度变化的贡献在 20%左右，以上因素还不足以说明 TVOC 浓度变化的主要原因。这主要是因为释放 TVOC 的源特征(包括各种装修材料中 TVOC 的本底含量大小和分布情况等)没有被考虑在内，而它却是除上述因素外影响 TVOC 浓度的主要原因，对 TVOC 浓度的影响接近 80%(假设源因素和文中 4 个环境因素能基本解释 TVOC 浓度变化的全部原因)。由于室内装修后

表 5 TVOC 浓度水平与  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $T$  和 RH 的相关性分析

	$T$	RH	$t_1$	$t_2$
相关系数	-0.022	0.036	0.152 <sup>b)</sup>	-0.250 <sup>b)</sup>
显著水平	0.293	0.087	0.000	0.000
	$\ln(T)$	$\ln(\text{RH})$	$\ln(t_1)$	$\ln(t_2)$
相关系数	0.048 <sup>a)</sup>	0.062 <sup>b)</sup>	0.259 <sup>b)</sup>	-0.220 <sup>b)</sup>
显著水平	0.020	0.003	0.000	0.000

a) 显著性水平为 0.05; b) 显著性水平为 0.01

表6 拟合结果1

变量	系数	系数值	标准误差	t 值	P
T	$C_{(1)}$	-570.1527	425.7125	-1.33929	0.182
RH	$C_{(2)}$	-53.0121	20.8418	-2.54355	0.012
$t_1$	$C_{(3)}$	0.1855	0.0385	4.82336	0.000
$t_2$	$C_{(4)}$	-0.0057	0.0009	-6.39858	0.000
—	$C_{(5)}$	2.0593	1.4170	1.45325	0.147
$R^2$	0.210364		F 值	18.84824	
调整后 $R^2$	0.199203		Durbin-Watson 值	0.720357	
P 值(F 检验)	0.000				
因变量: $\text{Ln}(C_{\text{TVOC}})$	样本数: 288				

的 TVOC 来源复杂, 已有经验模式中源特征难于准确量化. 但室内装修一旦完成, 其源特征就已固定, 为定量分析不同源特征的房间 TVOC 浓度受 4 个环境因素影响的规律, 本文将源特征简化分为有代表性的 A, B, C 三级(A 级为本底浓度和释放速率较小的源, B 级为本底浓度和释放速率中等的源, C 级为本底浓度和释放速率较大的源). 由式(1)可见, 排除 4 个环境因素的影响,  $C_{(5)}$ 体现的主要是源特征对 TVOC 浓度的影响程度, 将 TVOC 释放源按  $C_{(5)}$ 的变化范围均匀的分为 A, B, C 三级, 赋予各级的无量纲数量值为 -1, 0, 1, 以  $d$  表示. 由此, 经验拟合式的源因素可以通过一次现场检测结合式(1)进行分级量化.

加入源强因素后重新拟合, 建模的表达式为

$$\text{Ln}(C_{\text{TVOC}}) = C_{(1)} \times \frac{273.15}{T + 273.15} + C_{(2)} \times \frac{1}{\text{RH}} + C_{(3)} \times \text{Ln}(t_1 + 1) + C_{(4)} \times t_2^2 + C_{(5)} \times d + C_{(6)}, \quad (2)$$

式中  $d$  为源特征变量代表 A, B, C 三级源的数量值,  $C_{(1)}$ ,  $C_{(2)}$ ,  $C_{(3)}$ ,  $C_{(4)}$ 和  $C_{(5)}$ 为各参数的系数值,  $C_{(6)}$ 为常数项.

由表 7 中的相关系数  $R^2 = 0.830657$  可知, 将源特征因素简化分级考虑后, 5 个变量可以解释 83%以上的室内 TVOC 浓度变化的原因, 还有 17%的不确定性主要是来自简化源特征因素后产生的误差以及少量未考虑到的其他特殊因素. 拟合结果基本可以说明 TVOC 浓度大小的主要原因. 经整理后最终表达式为

$$\text{Ln}(C_{\text{TVOC}}) = 0.212 \times \text{Ln}(t_1 + 1) - 5.42 \times 10^{-3} \times t_2^2 - 1.52 \times \frac{273.15}{T + 273.15} - 44.1 \times \frac{1}{\text{RH}} + 0.952 \times d + 1.40. \quad (3)$$

### 3 讨论

#### 3.1 国内外新装修家庭 TVOC 污染水平

通过比较国内 4 个大型城市家庭装修后 TVOC

表7 拟合结果2

变量	系数	系数值	标准误差	t 值	P
T	$C_{(1)}$	-1.518902	0.723242	-2.10013	0.037
RH	$C_{(2)}$	-44.058150	9.672832	-4.55484	0.000
$t_1$	$C_{(3)}$	0.212336	0.017862	11.88767	0.000
$t_2$	$C_{(4)}$	-0.005419	0.000416	-13.04294	0.000
$d$	$C_{(5)}$	0.952206	0.029627	32.13953	0.000
—	$C_{(6)}$	1.395317	0.657703	2.12150	0.035
$R^2$	0.830657		F 值	276.65210	
调整后 $R^2$	0.827655		Durbin-Watson 值	1.629525	
P 值(F 检验)	0.000				
因变量: $\text{Ln}(C_{\text{TVOC}})$	样本数: 288				

污染水平发现(表8), 超标最严重的是北京, 其次是哈尔滨, 成都和杭州最低. 这些差异是由各城市居民的装修习惯、当地市场的家俱和装修材料环保质量以及当地环境条件等不同所致. 由于国家间 TVOC 浓度限值标准的不同(表8), 德国虽然超标率也较高, 但浓度比国内城市仍低很多, 杭州是德国和英国的2倍多, 而北京更达到了6倍以上. 很多学者认为<sup>[3,10]</sup>, TVOC 浓度大于 0.20 mg/m<sup>3</sup> 就会对人体产生刺激反应, 但目前各国的标准限值普遍高于此值. 只有对 TVOC 污染进行更深入的毒理学研究, 才能确定更合理的 TVOC 浓度限值, 以降低 TVOC 污染给城市居民带来的健康风险.

### 3.2 室内装修后 TVOC 浓度达标所需时间

对于室内装修污染, 人们最关心的是房间内是否有污染, 浓度多高? 若超标多久能安全入住等问题. 通常这些问题可以通过检测的方法加以解决, 但需要较多的人力、物力、财力和时间. 本文所建的 TVOC 浓度预测模型可以基本定量室内 TVOC 的污染程度, 并分析室内装修后的合理入住时间. 部分学者通过少量检测数据的定性分析显示, TVOC 污染一

般可能持续几个月. 但由于 TVOC 污染的来源多、影响因素复杂, 其结论并不具普遍适应性. 本文综合考虑了5个重要影响因素与 TVOC 浓度的复合关系, 并分析了不同装修月份、源特征各异的房间在装修后可以达标的的时间, 如表9所示. 其中门窗自然封闭时间以国标建议值为准(1 h), 温度和湿度以杭州年鉴统计的历年每个月的平均值为当月的代表值(表10)<sup>[15]</sup>.

由表9可见, A级装修水平的房间装修两周后基本可以达标, B级装修的要6~8个月, 而C级装修的房间则要15~16个月. B级装修的房间达标所需的时间随装修完成季节的不同变化较大, 其中冬季完成装修到达标所需的时间明显较长, 春秋次之, 而夏季最短. 主要是因为夏季高温天气会促进 TVOC 的释放, 刚装修完 TVOC 的释放源浓度较高时这种加速作用可能更明显; 相反, 冬季完成装修的房间 TVOC 浓度的衰减会较慢. 由于源因素的影响更大, C级装修的房间 TVOC 浓度达标所需时间随装修完成月份的波动较小, 源的衰减主要由装修时间决定. 由于温度和湿度较装修时间对 TVOC 浓度的影响相对较弱, 因此每个月份完成装修的样本直到达标的月份 TVOC 的浓度值都未出现反复现象.

表8 国内外家庭的 TVOC 浓度水平比较

城市/国家	平均值(mg/m <sup>3</sup> )	超标率	样本数(个)	国家标准(mg/m <sup>3</sup> )	文献来源
杭州	0.65	37.3%	2302	0.5	本文
哈尔滨	—	44.0%	25	0.5	[11]
北京	1.81	76.8%	82	0.5	[12]
成都	0.55	38.0%	80	0.5	[13]
英国	0.30	—	876	0.3	[14]
德国	0.29	47.0%	79	0.3	[1]

表9 装修后不同条件下 TVOC 浓度水平达标所需的时间(单位: 月)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
A级	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5
B级	8	8	8	7	7	7	6	6	6	7	8	8
C级	15	15	16	16	16	16	16	15	15	15	15	15

表10 历年杭州市月平均温度、湿度统计

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
温度(°C)	3.8	5.1	9.3	15.4	20.2	24.3	28.6	28.0	23.3	17.7	12.1	6.3	16.2
湿度(%)	77.0	80.0	80.0	80.0	81.0	83.0	80.0	81.0	84.0	80.0	79.0	78.0	80.0

### 3.3 门窗封闭时间对 TVOC 浓度水平影响程度的量化分析

由于居民家庭的门窗封闭时间会影响室内外的空气交换速率,可能对室内污染物的浓度有较大影响.但这种影响的程度到底有多大,至今未见有量化的分析结果.为量化封闭时间对 TVOC 浓度的影响,本实验将装修时间、源特征、温度和湿度取定值,则门窗自然封闭时间大于 1 h 相对于 1 h 标准封闭时间的 TVOC 浓度值增加 $((t_1 + 1)/2)^{0.212} - 1$ ×100%.若温度和湿度取 3 年样本的平均值( $T = 16.2^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} = 80\%$ ),装修半个月后, A 级装修水平的房间封闭 36 h 仍不会超标.但在极端温度和湿度条件下( $T = 40^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} = 93\%$ ),封闭 24 h 仍可能超标.而其他 2 个装修水平的房间在不同装修时间和封闭时间条件下的浓度水平则变化较大,如表 11 所示.封闭 12 h 后浓度较 1 h 的增幅接近 50%;封闭 1 h 的 B 级装修房间装修完毕 9 个月后 TVOC 的浓度值已在国标限值之下,但封闭时间延长仍会出现超标现象.而目前 GB 50325-2006 中未强制规定检测前门窗封闭的时间,因此,本文的研究结果可为制定更合理的室内空气质量标准提供参考.

由此可见,装修后室内 TVOC 的浓度因时因地而异,应根据具体情况具体分析,以达到了解和规避室内健康风险的目的.装修时尽量少用建材和家具

以及选择环保的产品是室内空气质量的根本保证.而装修后空置一段时间再入住和合理的通风则是降低室内健康风险的有力措施.

## 4 结论

(1) 近 3 年杭州市装修 1 年以内的家庭房间 TVOC 平均浓度为 $(0.65 \pm 0.69) \text{ mg/m}^3$ ,超标率达 35.6%.所监测的各类房间中超标率为客厅>书房>卧室.与国内城市相比,杭州市家庭 TVOC 的污染较轻,但仍比部分欧洲国家高出 1 倍多.

(2) 源特征和装修时间、门窗自然封闭时间、温度、湿度等 4 个环境因素与 TVOC 浓度水平呈显著相关( $P < 0.01$ ).源特征对 TVOC 浓度的影响最大,装修时间和室内通风状况次之,温度和湿度对其影响相对较弱.几个因素的拟合关系式( $R^2 = 0.83$ )为

$$\begin{aligned} \text{Ln}(C_{\text{TVOC}}) = & 0.212 \times \text{Ln}(t_1 + 1) - 5.42 \times 10^{-3} \times t_2^2 - 1.52 \\ & \times \frac{273.15}{T + 273.15} - 44.1 \times \frac{1}{\text{RH}} + 0.952 \times d + 1.40. \end{aligned}$$

(3) 以最终拟合关系式为基础,综合分析了不同类型的房间在不同的环境条件下 TVOC 浓度的变化规律为: A 级装修水平的房间装修两周后基本可以达标, B 级装修的要 6~8 个月,而 C 级装修的房间则要 15~16 个月;若其他因素值固定,则门窗自然封闭大于 1 h 比封闭 1 h 的 TVOC 浓度值增加 $((t_1 + 1)/2)^{0.212} - 1$ ×100%.

表 11 TVOC 浓度( $\text{mg/m}^3$ )和门窗封闭时间的量化关系

$t_1$ (h)	B 级装修					C 级装修					较 1 h 增幅(%)
	1 个月	3 个月	6 个月	9 个月	12 个月	1 个月	3 个月	6 个月	9 个月	12 个月	
1	0.64	0.61	0.53	0.42	0.30	1.66	1.59	1.37	1.08	0.77	—
2	0.70	0.67	0.58	0.45	0.32	1.81	1.73	1.50	1.17	0.83	9.0
3	0.74	0.71	0.61	0.48	0.34	1.92	1.84	1.59	1.25	0.89	15.8
6	0.84	0.80	0.69	0.54	0.39	2.17	2.07	1.79	1.40	1.00	30.4
12	0.95	0.91	0.79	0.62	0.44	2.47	2.37	2.04	1.60	1.14	48.7
24	1.10	1.05	0.91	0.71	0.50	2.84	2.72	2.35	1.84	1.31	70.8
36	1.19	1.14	0.98	0.77	0.55	3.08	2.95	2.55	2.00	1.42	85.6

## 参考文献

- 1 Brown S K. Volatile organic pollutants in new and established buildings in Melbourne, Australia. *Indoor Air*, 2002, 12: 55-63
- 2 Andersson K, Bakke J V, Bjorseth O, et al. TVOC and health in non-industrial indoor environments—Report from a Nordic scientific consensus meeting at Langholmen in Stockholm. *Indoor Air*, 1997, 7: 78-91
- 3 Molhave L, Clausen G, Berglund B, et al. Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations. *Indoor Air*, 1997, 7: 225-240

- 4 田园春, 孙亚兵, 冯景伟, 等. 南京市居室内 SO<sub>2</sub>、HCHO 和 TVOCs 污染的研究. 环境科学学报, 2007, 27: 190-194
- 5 Jarnstrom H, Saarela K, Kalliokoski P, et al. Reference values for indoor air pollutant concentrations in new, residential buildings in Finland. Atmos Environ, 2006, 40: 7178-7191
- 6 Haghghat F, Bellis De L. Material emission rates: Literature review, and the impact of indoor air temperature and relative humidity. Build Environ, 1998, 33: 261-277
- 7 Zhang Q, Zhang G Q. Study on TVOCs concentration distribution and evaluation of inhaled air quality under a re-circulated ventilation system. Build Environ, 2007, 42: 1110-1118
- 8 Yan W, Zhang Y P, Wang X K. Simulation of VOC emissions from building materials by using the state-space method. Build Environ, 2009, 44: 471-478
- 9 中华人民共和国建设部. GB 50325-2001 民用建筑工程室内环境污染控制规范. 2006 版. 北京: 中国计划出版社, 2006
- 10 Jokl M V. Evaluation of indoor air quality using the decibel concept based on carbon dioxide and TVOC. Build Environ. 2000, 35: 677-697
- 11 孙丽颖, 李洁, 张小彬. 哈尔滨市部分新装修住宅室内空气质量的检测与评价. 环境保护科学, 2009, 35: 59-62
- 12 王靖, 陈慧, 张一婷. 北京市住宅室内空气中 TVOC 污染现状分析. 中国环境管理干部学院学报, 2009, 19: 74-82
- 13 曾凡丽, 王槐, 杨海波, 等. 住宅装修室内环境污染状况调查. 四川环境, 2008, 27: 48-51
- 14 Raw G J, Coward S K D, Brown V M, et al. Exposure to air pollutants in English homes. J Expo Anal Env Epid, 2004, 14: 85-94
- 15 杭州市年鉴编辑部. 杭州年鉴. 北京: 中华书局出版社, 1998. 64