



评述

绿色建筑室内空气有机化学污染预评估: 研究进展及建议

黄少丹^①, 熊建银^②, 张寅平^{①*}

① 清华大学建筑技术科学系, 北京 100084;

② 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

* E-mail: zhangyp@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2016-01-29; 接受日期: 2016-02-26; 网络出版日期: 2016-10-31

国家自然科学基金(批准号: 51136002, 51476013)资助项目

摘要 随着建筑物可持续发展问题越来越受到关注和重视, 绿色建筑概念应运而生, 而室内空气质量是绿色建筑体系中的一个重要方面. 如何构建“健康、适用和节能”的绿色建筑室内环境, 已成为世界范围内尤其是我国的社会和科研热点问题. 建材和家具作为室内主要挥发性有机物(VOCs)污染源, 其散发特性直接影响室内空气质量. 要较为准确地评估室内空气污染物浓度是否达到绿色建筑对室内空气质量的要求, 须了解建材的 VOCs 散发特性. 为此, 本文介绍了描述室内材料 VOCs 散发过程的数学模型和相关特性参数的测定方法, 分析了绿色建筑室内空气 VOCs 预评估中可能出现的问题并提出了相关建议.

关键词 可持续室内环境, 绿色建筑, 室内空气质量, 甲醛, VOCs

1 引言

20世纪80年代, 为了应对人类遭到破坏的生存环境, 人们提出了“可持续发展”概念, “绿色建筑”概念也应运而生. 绿色建筑是指在建筑的全寿命期内, 最大限度地节约资源(节地、节能、节水、节材), 保护环境和减少污染, 为人们提供健康、适用和高效使用空间的建筑^[1]. 由于人的生存离不开空气, 绿色建筑应保障人在其中能够呼吸“健康”的室内空气. 在 BREEM, LEED 和我国的绿色建筑评价标准和评估体系中, “室内空气质量”都被列为室内环境质量中的重

要指标之一(图 1)^[1,2].

20世纪70年代能源危机以来, 为了降低建筑能耗, 减小建筑空调系统新风量和增加建筑气密性成为广为采用的手段. 美国采暖、制冷和空调工程师学会(American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ASHRAE)在1981年修订的新风量标准中明显降低了新风量^[3]. 与此同时, 人工复合材料在室内大量使用, 其中一些材料会散发对人体有害的气体: 极易挥发性有机化合物(very volatile organic compounds, VVOCs, 典型代表为甲醛)、挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs, 典

引用格式: 黄少丹, 熊建银, 张寅平. 绿色建筑室内空气有机化学污染预评估: 研究进展及建议. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 1135-1145
Huang S D, Xiong J Y, Zhang Y P. Pre-evaluation of indoor chemical pollutants in green building: Research progresses and suggestions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 1135-1145, doi: 10.1360/N092016-00049

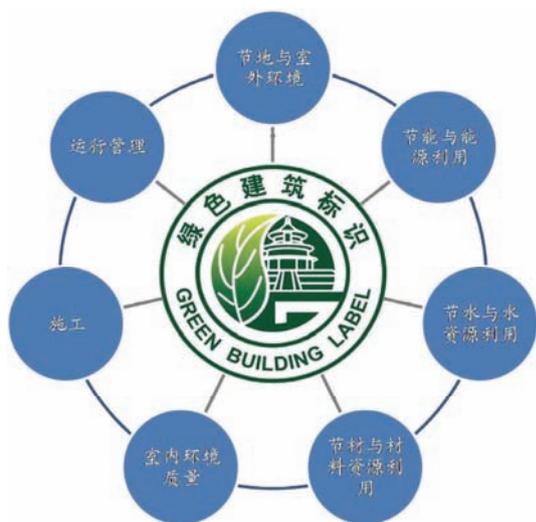


图1 (网络版彩图)绿色建筑室内环境评价指标^[1,2]

型代表为苯系物)^[4-9]、半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)^[10]。

上述因素是近30多年来发达国家出现室内空气质量问题的主要原因。据统计,美国每年因室内空气质量问题造成的经济损失高达400亿美元^[11];2002年世界卫生组织(WHO)统计表明全世界每年有2400万人的死亡与室内空气污染密切相关,并将室内空气污染与高血压、胆固醇过高及肥胖症等共同列为人类健康的十大威胁^[12]。考虑到人绝大部分时间在室内度过,丹麦技术大学室内空气领域的著名专家Fanger教授指出,“室内空气质量对人健康的影响比室外空气更重要”^[13]。近20多年来,我国经历了快速的城镇化发展进程,年增建筑面积逾10亿m²,大量人工复合材料被使用,加上大气污染问题日益严峻,导致我国的室内空气质量问题虽比发达国家晚出现了约20年,却更加严重(图2)^[14,15]。有效防治室内空气污染,营造健康、舒适和节能的可持续室内环境已成为我国室内环境研究者当下义不容辞的责任。

室内污染源散发引发的室内空气质量问题的防治主要有3种途径:源头防治、通风稀释和空气净化。其中源头防治应放在优先位置,因为它既可避免机械通风和空气净化过程中的能量消耗,又可避免空气净化可能产生的副产物问题,是节能高效、一劳永逸的治本之法,源头控制主要从室内污染源材料(主要为人工复合材料和家具)入手。据统计,我国已成为世界人造板生产第一大国,2009年年产量就突破了1亿m³,并以约20%的速度增长^[17]。此外,我国2005

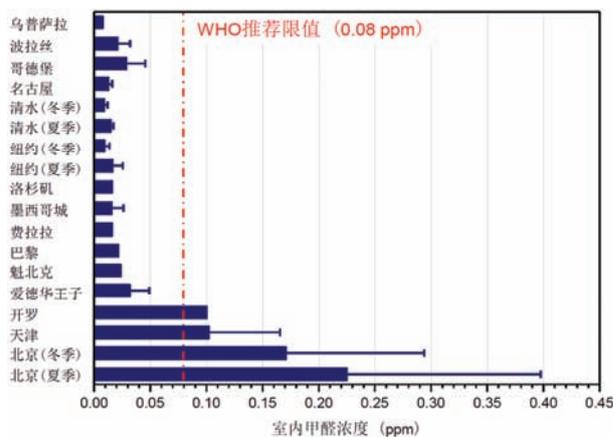


图2 (网络版彩图)不同国家代表城市室内环境中甲醛浓度检测结果对比^[16]

年的装饰装修建材产值超过了6500亿元^[18],2009年的家具产值达到7300亿元^[19],均居世界第一。目前在我国很多地区,室内材料和家具散发的各种挥发性有机化合物(VVOCs, VOCs, SVOCs)已成为导致室内空气质量问题的“罪魁祸首”^[14-16,20-22]。

室内材料或家具VVOCs, VOCs, SVOCs等污染物(下文均以VOCs代表)在室内环境中的散发过程如图3所示。它们会经过材料内部扩散到表面,然后通过空气对流传质散发到室内环境中。除了建材或家具的源散发之外,室内吸附性较强的材料(如地毯、壁纸、沙发等)还存在汇效应^[22]。室内污染物浓度是源散发和汇吸附综合作用的结果^[23]。

要准确评估室内空气质量是否达到绿色建筑对其的要求,应首先研究室内材料源/汇的散发/吸附特性。由于汇吸附过程和源散发(脱附)过程可统一描述,为简便起见,本文仅讨论源的散发过程。为此,本文首先综述了建材散发传质过程的主要研究进展;其次分析了用现有的国标方法和一些其他方法对室内材料VOCs散发特性进行预评估的精度及可能存在的问题;最后,对我国绿色建筑室内空气质量预评估中存在的困难进行了分析并提出了建议。

2 室内材料散发预测模型

一般说来,研究室内材料VOCs散发特性的方法有两种:实验测定法和模型分析法。材料VOCs散发模型的发展经历了如下历程:根据实验数据总结得到经验/半经验模型,根据物理规律得到传质模型^[24,25]。



图3 (网络版彩图)室内环境中建材或家具散发过程示意图

下面分别对上述两种模型进行介绍.

2.1 经验/半经验模型

早期描述室内材料 VOCs 散发的经验/半经验模型是通过大量的实验数据总结得到的. 其中, 最经典的一阶衰减模型得到了建材 VOCs 散发速率与散发时间呈指数衰减关系^[26,27]. 该模型在预测建材短期散发时较为准确, 却常常低估建材 VOCs 的长期散发速率. Chang 和 Guo^[27]以及 Guo^[28]发展了双一阶衰减模型, 可较准确预测建材 VOCs 的短期和长期散发. Hoetjer 和 Koerts^[29]考虑了散发速率受室内 VOCs 浓度的影响, 得到了散发速率的经验关系式如下:

$$E = k_p(C_E - C_a), \quad (1)$$

式中, E 为单位面积的材料 VOCs 散发速率, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$; k_p 和 C_E 均为经验常数; C_a 为空气中目标污染物浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

在经验模型的基础上, 研究者还提出了半经验模型. 其中较为典型的表面汇模型^[30-34]采用了如下假设: 建材的脱附速率和建材内 VOCs 浓度成正比, 建材对 VOCs 的吸附速率和室内 VOCs 浓度成正比. 表面汇模型可较准确地预测建材 VOCs 的短期散发速率^[35].

总体说来, 经验/半经验模型的优点在于形式简单, 便于应用. 其不足在于, 由于模型缺乏物理基础, 其中的经验参数往往依赖于实验条件, 难以推广到其他使用条件下, 模型的通用性较差^[23]. 近年来, 研究者关注和研究的重点多为传质模型^[25].

2.2 传质模型

传质模型假设室内材料为均匀材料或由不同层均质材料构成, 其中的传质符合 Fick 扩散定律. Little 模型^[36]为最早的、具有代表性的传质模型, 其控制方

程、边界条件和初始条件如下:

$$\text{控制方程} \quad \frac{\partial C_m}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2}; \quad (2a)$$

$$\text{边界条件} \quad \frac{\partial C_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad t > 0, \quad (2b)$$

$$V \frac{dC_a}{dt} = -D_m \cdot A \cdot \frac{\partial C_m}{\partial x} \Big|_{x=L} - Q \cdot C_a, \quad (2c)$$

$$C_a = \frac{C_m}{K} \Big|_{x=L}; \quad (2d)$$

$$\text{初始条件} \quad C_m = C_0, \quad t = 0, \quad (2e)$$

式中, C_a 为环境舱内空气中 VOCs 的浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C_m 为 VOCs 在材料内的浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; D_m 为 VOCs 在材料内的扩散系数, m^2/s ; K 为 VOCs 在材料/空气界面的分配系数; x 为建材散发方向的坐标, m ; V 为环境舱体积, m^3 ; t 为散发时间, s ; A 为材料的散发面积, m^2 ; L 为材料厚度, m ; Q 为环境舱换气量, m^3/s .

模型中的参数, 如扩散系数 D_m 和分配系数 K 等都具有明确的物理意义. Little 等人^[36]导出了建材内 VOCs 浓度逐时分布以及环境舱内 VOCs 逐时浓度的解析解, 可较为准确地预测材料 VOCs 的长期散发情况. 但由于 Little 模型假设对流传质系数 h_m 为无穷大 (即忽略了对流传质阻力), 使得在预测材料 VOCs 短期散发时与实际情况存在较大偏差.

Yang 等人^[35,37,38]以及 Huang 和 Haghghat^[39]在 Little 模型的基础上考虑了对流传质阻力的影响, 克服了 Little 模型短期散发预测误差较大的问题. Xu 和 Zhang^[40]考虑了环境舱内对流传质阻力和初始 VOCs 浓度对建材 VOCs 散发过程的影响, 得到了同时适用于直流和密闭舱情况的建材散发特性解析解. Deng 和 Kim^[41]假设建材所处的环境初始 VOCs 浓度为 0, 在 Xu 和 Zhang 模型的基础上导出了材料散发速率的完全解析解.

上述模型都包含了一个假设, 初始时刻 VOCs 在材料内均匀分布. 该假设对建材长期散发速率的预测影响不大, 但对散发初始阶段散发速率的影响却不能忽略. 为此, Xu 和 Zhang^[42]考虑了建材中 VOCs 初始浓度的非均匀分布, 导出了任意初始浓度的单面散发模型, 该模型同时适用于直流舱和密闭舱.

在实际情况下, 多层均质材料双面散发的情况很多见, 为能描述此类材料 VOCs 的散发情况, Kumar 和 Little^[43]忽略对流传质阻力, 导出了双层均质材料散发速率的解析解, 但预测结果与实际情况

在散发初始阶段偏差较大. Haghghat 和 Huang^[44]以及 Zhang 和 Niu^[45]考虑了对流传质阻力, 给出了多层均质材料的单面散发模型. Hu 等人^[46]进一步提出了任意层材料双面散发模型, 导出了解析解. Yan 等人^[47]采用状态空间法, 发展了更便于编程计算的解决上述问题的模型(实际上, 由江亿院士主持研发、在建筑节能领域获广泛应用的模拟软件 DeST 主要依据的就是状态空间法). Wang 和 Zhang^[48]发展了考虑材料化学反应后的多层材料 VOCs 散发模型, 得到了系迄今为止考虑情况最全的问题的解析解.

3 散发特性参数的测试方法和误差分析

从上述材料 VOCs 的散发模型可以看出, 在一定的环境条件下, 建材中 VOCs 的散发速率主要由材料的 3 个参数确定, 它们是 VOCs 在建材中的初始可散发浓度 C_0 、在建材中的扩散系数 D_m 以及空气和建材界面处 VOCs 的分配系数 K . 要利用传质模型预测实际材料的 VOCs 散发速率, 须已知这 3 个参数的值, 因此它们被称之为建材 VOCs 散发特性参数^[24,25,49-53]. 如何准确测定这些参数对室内材料“绿色度”的评价及控制有重要意义. 下面简要介绍一下常见的散发特性参数的测定方法.

3.1 测定方法简介

3.1.1 初始可散发浓度 C_0

初始可散发浓度 C_0 表征单位体积的建材在给定温度条件下可以散发到实际环境中 VOCs 的总量. 一种快速测定方法是研碎材料或加热以提高材料中的 VOCs 散发速率, 较为典型的方法包括: Cox 等人^[54]的流化床法、常温萃取法^[55,56]以及国标的穿孔萃取法^[57,58]等.

另一种快速方法是基于实验和模型, 测得 C_0 . 目前的方法有: Wang 和 Zhang^[59]的多平衡态回归法, Xiong 等人^[60,61]的密闭舱 C-history 方法及变体积法. 这些方法的实验时间都较短, 一般小于 3 天.

3.1.2 扩散系数 D_m

目前使用的很多建材均为多孔介质, 其扩散系数为等效扩散系数^[50]. 测量 D_m 的方法有很多, 例如单杯法、两舱法、压汞法和非线性拟合法等^[50,62-65].

3.1.3 分配系数 K

分配系数表征 VOCs 在空气和建材中分配的程度^[50]. 目前测定分配系数的方法主要有两类: 一类是根据定义计算得到, 另一类是通过非线性拟合法得到. 第一类方法主要包括: 微天平法、顶空法等, 简单且较直观^[50]. 需要注意的是非线性拟合法较为复杂且会存在多解的风险^[65].

3.1.4 测定 3 个散发特性参数的直流舱 C-history 方法

在测试散发特性参数的过程中, 力求快速、准确. 为此, Huang 等人^[66]提出了一种快速、准确测定 3 个散发特性参数的直流舱 C-history 方法.

1) 测试原理. 直流舱 C-history 方法包括两个物理过程: (1) 建材在密闭条件中自由散发直至平衡, 采样测得舱内 VOC 平衡浓度值 C_{equ} ; (2) 向环境舱中通入换气次数恒定的干净空气, 实时采集环境舱出口处的 VOC 浓度值 $C_a(t)$. 图 4 为上述两个过程中环境舱内 VOC 浓度随时间变化情况的示意图.

对于第一个物理过程, 由质量守恒可得:

$$C_{\text{equ}} = \frac{C_0}{K+R}, \quad (3)$$

式中, R 为环境舱体积与建材体积之比.

对于与第二个物理过程, 可推导得到无量纲浓度的对数 $\ln C_a(t)/C_{\text{equ}}$ 和直流散发时间 t 呈线性关系^[66]:

$$\ln \frac{C_a(t)}{C_{\text{equ}}} = \text{SL} \cdot t + \text{INT}, \quad (4)$$

式中, 斜率 SL 和截距 INT 为扩散系数 D_m 和分配系数 K 的函数^[66]. 因此, 只要将实验中直流舱内浓度数据 $C_a(t)$ 及密闭过程的平衡浓度 C_{equ} 处理成式(4)的形式, 然后进行线性拟合, 即可获得斜率 SL 和截距

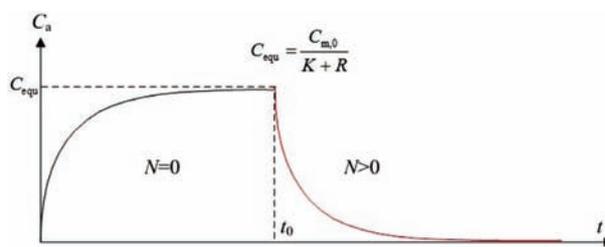


图 4 (网络版彩图)直流舱 C-history 方法舱内 VOC 浓度随时间的变化^[66]

INT. 由于 SL 和 INT 是 D_m 和 K 的函数, 因此解两个方程即可求得 D_m 和 K 的值. 然后将计算出的 K 值代入式(3)即可求得初始可散发浓度 C_0 . 由于此方法需要逐时测定材料在直流环境舱中的 VOC 浓度值, 因此称之为直流舱 C-history 方法.

2) 测量结果. 实验对一种典型的中密度板散发甲醛、己醛和丙醛的特性参数进行了测试. 其中, 甲醛同时用 MBTH 和 HPLC 两种方法测量分析, 己醛和丙醛用 HPLC 方法测量分析^[66]. 限于篇幅, 这里仅列出甲醛的结果. 图 5 为按式(4)对甲醛浓度进行线性拟合的结果, 特性参数 C_0 , D_m 和 K 的值列于表 1. 可以看出, 相关系数平方 R^2 位于 0.97~0.99 之间, 表明测量精度较高. 表 1 显示, MBTH 法和 HPLC 法结果较为接近, 两种方法测量得到的 C_0 , D_m 和 K 相对偏差分别为 2.6%, 28.4% 和 3.9%, 均小于 30%, 较适合工程应用.

将测定的特性参数代入解析模型中, 可计算出环境舱内甲醛浓度. 图 6 对比了计算与实验结果, 两者符合较好, 一定程度上验证了直流舱 C-history 方法的可行性.

与传统方法相比, 直流舱 C-history 方法的优势主要体现在两方面: (1) 大大缩短了测试时间, 传统

表 1 材料甲醛散发特性参数测试结果

采样气体测量方法	C_0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	D_m (m^2/s)	K	R^2
MBTH 法	2.58×10^6	1.16×10^{-10}	1.21×10^3	0.97
HPLC 法	2.45×10^6	2.08×10^{-10}	1.12×10^3	0.99

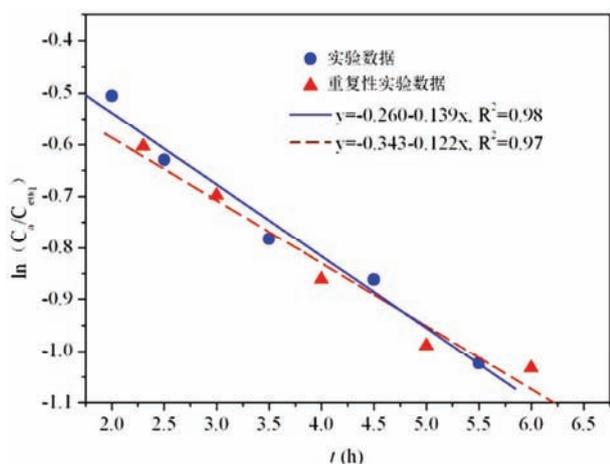


图 5 (网络版彩图)依据式(4)对甲醛浓度数据进行线性拟合的结果^[66]

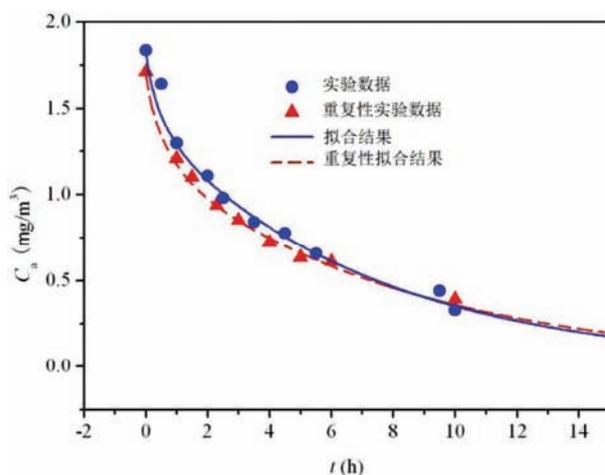


图 6 (网络版彩图)甲醛浓度的模拟值与实测值的对比^[50]

的实验方法一般至少需要 1~7 d 左右, 而该实验方法只需要 12 h; (2) 可以用一些通用性强的方法或设备(如 MBTH, HPLC, GC/MS 等)对气体进行检测, 克服了先前的密闭舱 C-history 方法^[60]为了避免舱内空气渗漏而只能用 INNOVA 进行在线检测的弱点. 因此, 该方法适用于测定建材中 VOCs 的散发特性参数^[50,66]. 最近, 基于该方法的材料或家具 VOCs 散发测试标准已通过立项, 标准正在制定中.

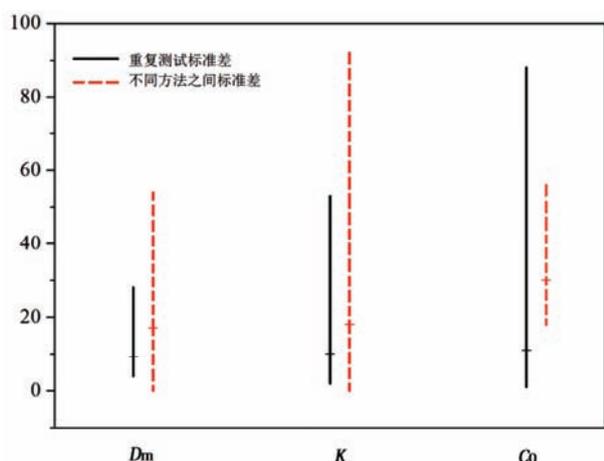
3.3 实验误差分析

测试建材 VOCs 散发特性参数的实验误差包括如下三类.

第一类, 随机误差. 一些文献中建材 VOCs 散发特性参数测定的第一类误差范围如图 7 所示^[67], 图中垂直线表示误差的最大值和最小值, 水平线表示误差的平均值. 如图 7 所示, 初始可散发浓度 C_0 误差平均值为 11%, 扩散系数 D_m 误差平均值为 9%, 分配系数 K 误差平均值为 10%.

第二类, 表示的是由于模型假设不同、测量装置不同、测试步骤不同、数据处理方法不同导致相同材料 VOCs 散发特性参数测量所产生的差别. 图 7^[67]显示了一些测试方法第二类误差, 其范围大于第一类误差, 初始可散发浓度 C_0 误差平均值为 30%, 扩散系数 D_m 误差平均值为 17%, 分配系数误差平均值为 18%.

第三类, 主要是由于不同实验室的测试用环境舱的不同以及分析测试方法的不同而造成. 文献 [68~73]给出了实验室间测试环境舱空气中 VOCs 浓

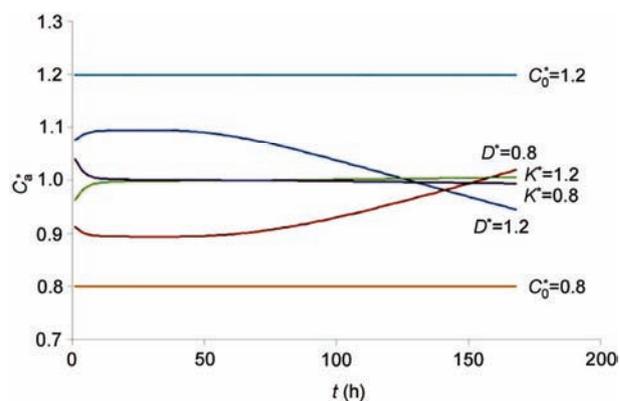
图7 (网络版彩图) 建材 VOCs 散发特性参数测试标准差^[67]

度的变异系数, 平均值在 20%~90% 之间, 文献[68]指出其值远大于同一实验室内重复测量结果的差异。导致这一结果的原因是实验室缺乏可对测试设备和测试结果进行比对的标准散发样品和比对环节, 导致一些测试精度不高的设备、方法或操作没有被识别, 从而测试结果的精度难以保证。

室内材料 VOCs 散发特性参数的测量误差会直接影响室内空气质量的预评估效果。因此, 有必要分析散发特性参数测量误差对室内空气 VOCs 浓度预测的影响。

误差分析所使用的房间为确定家具污染物限值用的标准起居室^[74], 三个散发特性参数对室内甲醛浓度 C_a 预测的独立影响如图 8 所示^[75]。图中 C_a^* , D^* , K^* 分别代表与 C_0 , D_m , K 真值间有 $\pm 20\%$ 误差的设定值。纵坐标 C_a^* 为无量纲甲醛浓度, 表示使用具有测试误差的散发特性参数预测的室内空气甲醛浓度, 与使用没有误差的散发特性参数所预测的室内空气甲醛浓度的比值。从图 8 可以看出, C_a^* 变化范围与初始可散发浓度 C_0 的设定误差范围相同。 D_m 和 K 的误差对 C_a^* 的影响随着散发时间而变化。在散发初始阶段, D_m 的正误差将导致室内甲醛浓度 C_a 的正误差。与之相反, K 的正误差导致 C_a 的负误差。当 D_m 的测量误差为 20% 时, 根据 Deng 和 Kim 模型^[41] 计算得到的 C_a 误差不超过 10%。当 K 的测量误差为 20% 时, C_a 的误差不超过 4%。

分析表明, 初始可散发浓度 C_0 对室内 VOCs 的浓度预测的影响最大。因此, 如何减少其实验误差, 对准确预测室内空气中 VOCs 浓度起关键作用。

图8 (网络版彩图) C_0 , D_m , K 的测试误差对预测室内污染物浓度 C_a 的影响^[75]

3.4 温湿度对建材 VOCs 散发预评估的影响

实际的室内温湿度随着季节、空调使用及人员的活动等情况变化, 从而导致建材散发特性有所变化。Hunt 和 Gidman^[76] 对 1000 幢英国建筑物的测试结果表明室内平均温度约为 16°C , 而最高温度可达 29°C 。对于大多数不具备调湿功能的建筑, 相对湿度可随外界条件变化, 一般在 30%~70% 范围内。而温、湿度的变化都会对材料的散发特性产生显著影响, 目前还鲜有这方面的系统研究。本节通过实验测定并结合理论分析探讨了温、湿度对材料 VOCs 散发特性(主要为初始可散发浓度、散发速率)的影响规律, 以期为不同环境条件下进行绿色建筑的室内空气质量评价提供参考。

3.4.1 温度对建材散发特性的影响

黄少丹^[50] 根据上文介绍的直流舱 C-history 方法实验测定了 8 个不同温度下建材内 VOCs 的 3 个散发特性参数^[60]。实验过程中相对湿度控制在 $50\% \pm 5\%$ 。实验中选取的材料为室内环境中广泛使用的一种中密度板, 目标污染物为甲醛。

实验结果显示, 初始可散发浓度 C_0 随着温度的升高而增大。当温度从 25°C 升至 80°C , C_0 增大了 13.5 倍! 为和上述测量结果对比, 本文利用国家标准的穿孔萃取法测定了该建材中的甲醛总含量, 其值为 $1.38 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见, 穿孔萃取法测定的游离态甲醛总含量 C_{total} 要明显高于各个温度下的 C_0 。在室温 25°C 条件下, 后者仅为前者的 4%, 这说明建材中的甲醛在室温下大部分无法散发出来。

在实验的基础上, 采用物理统计学分析方法, 可

导出 C_0 及 C_0 占总浓度的比 P 与温度的关系式^[77]:

$$C_0 = \frac{C}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{A}{T}\right), \quad (5)$$

$$\ln(P\sqrt{T}) = -\frac{A}{T} + B. \quad (6)$$

图 9 为式(6)和实验结果及文献结果^[78]的对比, 可以看出两者符合较好^[76].

实际上, 散发速率更能直观反映建材中 VOCs 的散发特性, 因此探索温度对散发速率的影响规律对认识不同温度下建材 VOCs 的散发特性更有实际意义. 基于上文 C_0 , D_m 和 K 随温度的变化关系^[78-80], 可得到准稳态的散发速率与温度之间的关系:

$$\ln \frac{E}{T^{0.25}} = E_1 - \frac{E_2}{T}, \quad (7)$$

式中, E_1 , E_2 均为与温度无关的常数.

从式(7)可以看出, $\ln(E/T^{0.25})$ 与 $1/T$ 成线性关系, E_1 和 E_2 的值可以通过对不同温度下的实验数据进行线性拟合得到. 式(7)可用于预测其他温度下准稳态的散发速率, 非常便于工程应用.

3.4.2 相对湿度对材料散发特性的影响

除了温度外, 相对湿度也会对建材 VOCs 的散发特性有重要影响. 采用前述的直流舱 C-history 方法, 本文实验测定了 5 个不同相对湿度下中密度板 VOCs 的 3 个散发特性参数, 由于篇幅限制, 这里仅给出甲醛的测试结果(图 10). 可以看出, 甲醛的 C_0 随着相对湿度的增加而增大. 在相对湿度为 20% 时, 甲醛的 C_0 为 $2.07 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 当相对湿度增加到 85% 时, 甲醛

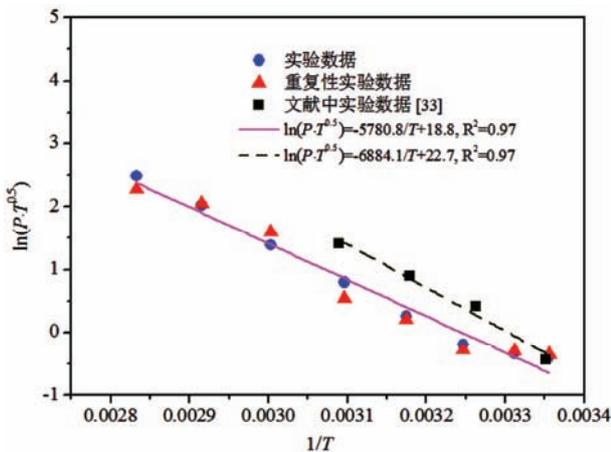


图 9 (网络版彩图)理论关系式和实验结果的对比

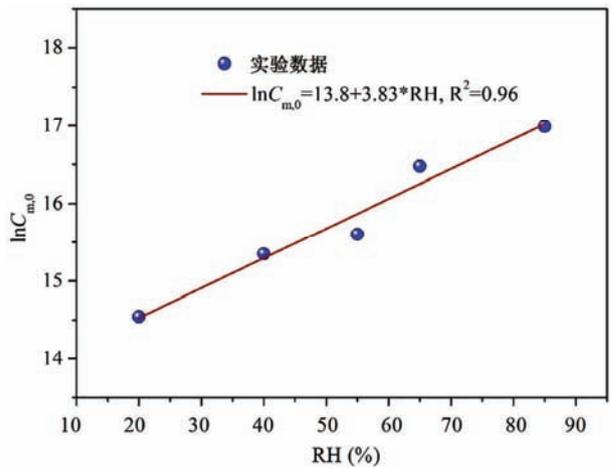


图 10 (网络版彩图)中密度板中甲醛的 $\ln C_0$ 与相对湿度 RH 的关系

的 C_0 比相对湿度为 20% 时的值增大了 10 倍.

根据实验结果, 可得到建材中 VOC 的初始可散发浓度 C_0 和相对湿度(RH)间的拟合关系式:

$$\ln C_0 = C_1 \cdot \text{RH} + C_2, \quad (8)$$

式中, C_1 , C_2 为与相对湿度无关, 仅与建材-VOC 对的物理化学性质相关的常数.

通过理论分析和推导, 可得到散发速率和相对湿度之间的关系式:

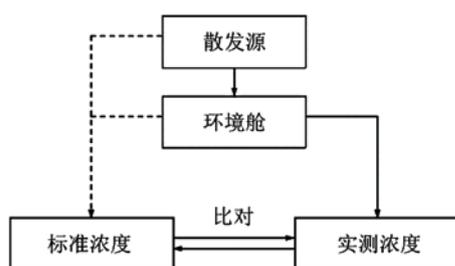
$$\ln E = E_1 \cdot \text{RH} + E_2. \quad (9)$$

对于给定的建材-VOC 对, 可由实验测得的 2 组或 2 组以上不同相对湿度下的散发速率值, 以及通过线性回归得到的 E_1 和 E_2 值计算出其他相对湿度下的散发速率值.

4 建议

如上文所述, 实验测试方法、设备和测试条件等的不一致, 均可导致建材散发特性(散发速率、散发特性参数)测试结果的差异. 为解决此问题, 一方面, 建议建立相关行业或国家标准, 提出一种大家较为认可的、精度较高且便于工程应用的测试方法. 另一方面, 建议采用标准散发源(也称标准散发样品), 评价该环境舱系统、检测设备性能以及检测人员操作的综合能力, 如图 11 所示^[81].

此外, 由于温湿度对建材 VOCs 散发有一定的影响, 一幢冬季检测达到绿色建筑室内空气质量标准

图 11 环境舱系统综合性能评价方法^[79]

的建筑, 在夏季很可能是超标的. 这就需要在测定建材散发特性时, 制定一个温湿度标准值. 当室内温度相差 8℃时, 室内甲醛的浓度可相差 150%, 而相对湿度相差 20%时, 室内甲醛浓度可相差 50%. 如果室内温度、相对湿度同时存在变化, 则它们的耦合作用将对室内污染物浓度产生更大的影响. 因此, 室内

空气质量预评估只能对绿色建筑中的选材提供一定的指导意见, 而对实际室内空气质量情况, 还需对实际建筑在使用情况下进行预评估修正并继续运行评估.

5 结语

为使室内空气质量达到绿色建筑的标准, 室内空气质量的预评估尤为重要, 室内空气中 VOCs 浓度预评估是其中的重要方面. 但要实现科学评估, 研究上还需深入, 而且管理部门、标准制定部门、第三方检测和评价部门、研究单位以及建筑设计和使用单位还应协同开展工作, 同时建议在建筑运行阶段能够进行检测评估, 以评价预评估的准确程度, 并积累经验, 不断提高绿色建筑室内空气质量的控制水平.

参考文献

- 1 邓启红. 中国室内环境与健康研究进展报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
- 2 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 绿色建筑评价标准(GB/T50378-2014). 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
- 3 Janssen J E. The history of ventilation and temperature control. *Ashrae J*, 1999, 41: 48-72
- 4 Young M K, Stuart H, Roy M H. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 997-1004
- 5 World Health Organization. Indoor air quality: Organic pollutants. Report on a WHO meeting, EURO Report and Studies, 1989. 1-70
- 6 USEPA. Reducing risk: Setting priorities and strategies for environmental protection. Technical Report. US Environmental Protection Agency, 1990
- 7 Wolkoff P, Clausen P A, Jensen B, et al. Are we measuring the relevant indoor pollutants? *Indoor Air*, 1997, 7: 92-106
- 8 Molhave L. The sick buildings and other buildings with indoor climate problems. *Environ Int*, 1989, 15: 65-74
- 9 Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmos Environ*, 2009, 43: 153-169
- 10 Weschler C J, Nazaroff W W. Semi-volatile organic compounds in indoor environments. *Atmos Environ*, 2008, 42: 9018-9040
- 11 Haymore C, Odom R. Economic effects of poor IAQ. *EPA J*, 1993, 19: 28-29
- 12 World Health Organization. The World Health Report 2002. Geneva: World Health Organization, 2002
- 13 Fanger P O, Olesen B W. Indoor air more important for human health than outdoor air. In: Stubbjær K, Kortenbach T, eds. Bridging from Technology to Society. Lyngby: Technical University of Denmark, 2004. 65-73
- 14 Zhang Y P, Mo J H, Wescher C J. Reducing health risks from indoor exposures in today's rapidly developing urban China. *Environ Health Perspect*, 2013, 121: 751-755
- 15 Zhang L P, Steinmaus C, Eastmond D A, et al. Formaldehyde exposure and leukemia: A new meta-analysis and potential mechanisms. *Mutat Res*, 2009, 681: 150-168
- 16 张寅平. 中国室内环境与健康研究进展报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- 17 刘姝威, 杨徽, 谢中圆. 装修建材零售行业发展趋势. *农村金融研究*, 2006, 8: 57-59
- 18 中国家具协会. 中国家具年鉴. 北京: 中国林业出版社, 2010
- 19 周中平, 赵寿堂, 朱立. 室内污染检测与控制. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 20 Wang L X, Zhao B, Liu C, et al. Indoor SVOC pollution in China: A review. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1469-1478
- 21 张寅平. 室内空气质量控制: 暖通空调新世纪的挑战和责任. *暖通空调*, 2013, 12: 1-7
- 22 邓琴琴. 建材吸附 VOC 特性及其对室内空气品质的影响研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2009
- 23 熊建银. 建材 VOC 散发特性研究: 测定, 微介观诠释及模拟. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2010
- 24 Liu Z, Ye W, Little J C. Predicting emissions of volatile and semivolatile organic compounds from building materials: A review. *Build*

- Environ, 2013, 64: 7–25
- 25 Zhang Y P, Mo J H, Xiong J Y, et al. Understanding and controlling indoor organic pollutants: Mass-transfer analysis and applications. *Indoor Air*, 2016, 26: 39–60
- 26 Clausen P A, Laursen B, Wolkoff P, et al. Emission of volatile organic compounds from a vinyl floor covering. In: Nagda N L, ed. *Modeling of Indoor Air Quality and Exposure*. ASTM STP 1205. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1993. 3–13
- 27 Chang J C S, Guo Z. Characterization of organic emissions from a wood finishing product-wood stain. *Indoor Air*, 1992, 2: 146–153
- 28 Guo Z. Review of indoor emission source models. Part 1. Overview. *Environ Pollut*, 2002, 120: 533–549
- 29 Hoetjer J J, Koerts F. A model for formaldehyde release from particleboard. In: Meyer B, ed. *Formaldehyde Release from Wood Products*. Washington DC: American Chemical Society, 1986. 125–144
- 30 Tichenor B A, Guo Z, Dunn J E, et al. The interaction of vapor phase organic compounds with indoor sinks. *Indoor Air*, 1991, 1: 23–35
- 31 An Y, Zhang J S, Shaw C Y. Measurements of VOC adsorption/desorption characteristics of typical interior building materials. *HVAC&R Res*, 1999, 5: 297–316
- 32 Chang J C S, Sparks L E, Guo Z. Evaluation of sink effects on VOC from a latex paint. *J Air Waste Manage*, 1998, 48: 953–958
- 33 Jorgensen R B, Dokka T H, Bjorseth O. Introduction of a sink-diffusion model to describe the interaction between volatile organic compounds (VOC) and material surfaces. *Indoor Air*, 2000, 10: 27–38
- 34 Won D, Corsi R L, Rynes M. Sorptive interactions between VOC and indoor materials. *Environ Sci Technol*, 2000, 34: 4193–4198
- 35 Yang X, Chen Q, Zeng J, et al. A mass transfer model for simulating VOC sorption on building materials. *Atmos Environ*, 2001, 35: 1291–1299
- 36 Little J C, Hodgson A T, Gadgil A J. Modeling emissions of volatile organic-compounds from new carpets. *Atmos Environ*, 1994, 28: 227–234
- 37 Yang X D. Study of building material emissions and indoor air quality. Doctor Dissertation. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999
- 38 Yang X, Chen Q, Zhang J S, et al. Numerical simulation of VOC emissions from dry materials. *Build Environ*, 2001, 36: 1099–1107
- 39 Huang H Y, Haghighat F. Modelling of volatile organic compounds emission from dry building materials. *Build Environ*, 2002, 37: 1127–1138
- 40 Xu Y, Zhang Y P. An improved mass transfer based model for analyzing VOC emissions from building materials. *Atmos Environ*, 2003, 37: 2497–2505
- 41 Deng B Q, Kim C N. An analytical model for VOC emission from dry building materials. *Atmos Environ*, 2004, 38: 1173–1180
- 42 Xu Y, Zhang Y P. A general model for analyzing single surface VOC emission characteristics from building materials and its application. *Atmos Environ*, 2004, 38: 113–119
- 43 Kumar D, Little J C. Characterizing the source/sink behavior of double-layer building materials. *Atmos Environ*, 2003, 37: 5529–5537
- 44 Haghighat F, Huang H. Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material. *Build Environ*, 2003, 38: 1007–1017
- 45 Zhang L Z, Niu J L. Modeling VOC emissions in a room with a single-zone multi-component multi-layer technique. *Build Environ*, 2004, 39: 523–531
- 46 Hu H P, Zhang Y P, Wang X K, et al. An analytical mass transfer model for predicting VOC emissions from multi-layered building materials with convective surfaces on both sides. *Int J Heat Mass Tran*, 2007, 50: 2069–2077
- 47 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
- 48 Wang X K, Zhang Y P. General analytical mass transfer model for VOC emissions from multi-layer dry building materials with internal chemical reactions. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 222–228
- 49 Xiong J Y, Liu C, Zhang Y P. A general analytical model for formaldehyde and VOC emission/sorption in single-layer building materials and its application in determining the characteristic parameters. *Atmos Environ*, 2012, 47: 288–294
- 50 黄少丹. 环境温湿度对建材 VOCs 散发特性参数影响的机理研究. 博士学位论文, 北京: 清华大学, 2013
- 51 Lee C S. A theoretical study on VOC source and sink behavior of porous building materials. Dissertation of Doctoral Degree. Montreal: Concordia University, 2003
- 52 Lee C S, Haghighat F, Ghaly W S. A study on VOC source and sink behavior in porous building materials-analytical model development and assessment. *Indoor Air*, 2005, 15: 183–196

- 53 Murakami S, Kato S, Ito K, et al. Modeling and CFD prediction for diffusion and adsorption within room with various adsorption isotherms. *Indoor Air*, 2003, 13: 20–27
- 54 Cox S S, Zhao D Y, Little J C. Measuring partition and diffusion coefficients for volatile organic compounds in vinyl flooring. *Atmos Environ*, 2001, 35: 3823–3830
- 55 Smith J F, Gao Z, Zhang J S, et al. A new experimental method for the determination of emittable initial VOC concentrations in building materials and sorption isotherms for IVOC. *Clean-Soil Air Water*, 2009, 37: 454–458
- 56 Xiong J Y, Chen W H, Smith J F, et al. An improved extraction method to determine the initial emittable concentration and the partition coefficient of VOC in dry building materials. *Atmos Environ*, 2009, 43: 4102–4107
- 57 EN 120. Wood-based panels-determination of formaldehyde content-extraction method called perforator method. European Standard, 1993
- 58 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 室内装饰装修材料-人造板及其制品中甲醛释放限量(GB18580-2001). 北京: 中国标准出版社, 2001
- 59 Wang X K, Zhang Y P. A new method for determining the initial mobile formaldehyde concentrations, partition coefficients, and diffusion coefficients of dry building materials. *J Air Waste Manage*, 2009, 59: 819–825
- 60 Xiong J Y, Yao Y, Zhang Y P. C-history method: Rapid measurement of the initial emittable concentration, diffusion and partition coefficients for formaldehyde and VOC in building materials. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 3584–3590
- 61 Xiong J Y, Yan W, Zhang Y P. Variable volume loading method: A convenient and rapid method for measuring the initial emittable concentration and partition coefficient of formaldehyde and other aldehydes in building materials. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 10111–10116
- 62 Kirchner S, Bady J R, Knudsen H N. Sorption capacities and diffusion coefficients of indoor surface materials exposed to VOCs: Proposal of new test procedures. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. 1999, 1: 430–435
- 63 Meininghaus R, Gunnarsen L, Knudsen H N. Diffusion and sorption of volatile organic compounds in building materials-impact on indoor air quality. *Environ Sci Technol*, 2000, 34: 3101–3108
- 64 Xiong J, Zhang Y, Wang X, et al. Macro-meso two-scale model for predicting the VOC diffusion coefficients and emission characteristics of porous building materials. *Atmos Environ*, 2008, 42: 5278–5290
- 65 熊建银, 杨韬, 黄少丹. 室内材料和物品中气态有害物散发特性测定方法评述. *暖通空调*, 2013, 43: 8–13
- 66 Huang S D, Xiong J Y, Zhang Y P. A rapid and accurate method, ventilated chamber C-history method, of measuring the emission characteristic parameters of formaldehyde/VOCs in building materials. *J Hazard Mater*, 2013, 261: 541–549
- 67 蔚文娟. 环境舱 VOCs 标准散发样品研制及应用. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2014
- 68 De Bortoli M, Kephapoulos S, Kirchner S, et al. State-of-the-art in the measurement of volatile organic compounds emitted from building products: Results of European interlaboratory comparison. *Indoor Air*, 1999, 9: 103–116
- 69 Risholm-Sundman M, Larsen A, Vestin E, et al. Formaldehyde emission: Comparison of different standard methods. *Atmos Environ*, 2007, 41: 3193–3202
- 70 Oppl R. Reliability of VOC emission chamber testing: Progress and remaining challenges. *Gefahrst Reinhalt L*, 2008, 68: 83–86
- 71 Rappengluck B, Apel E, Bauerfeind M, et al. The first VOC intercomparison exercise within the Global Atmosphere Watch (GAW). *Atmos Environ*, 2006, 40: 7508–7527
- 72 Cox S S, Liu Z, Little J C, et al. Diffusion-controlled reference material for VOC emissions testing: Proof of concept. *Indoor Air*, 2010, 20: 424–433
- 73 Reed C H, Liu Z, Benning J, et al. Diffusion-controlled reference material for volatile organic compound emissions testing: Pilot inter-laboratory study. *Build Environ*, 2011, 46: 1504–1511
- 74 Liu W W, Zhang Y P, Yao Y. Labeling of volatile organic compounds emissions from Chinese furniture: Consideration and practice. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3499–3506
- 75 Wei W J, Xiong J Y, Zhang Y P. Influence of precision of emission characteristic parameters on model prediction error of VOCs/formaldehyde from dry building material. *PLoS ONE*, 2013, 8: e80736
- 76 Hunt D R G, Gidman M I. A national field survey of house temperatures. *Build Environ*, 1982, 17: 107–124
- 77 Huang S D, Xiong J Y, Zhang Y P. Influence of temperature on the initial emittable concentration of formaldehyde in building materials: Interpretation from statistical physics theory and validation. *Environ Sci Technol*, 2015, 49: 1537–1544
- 78 Xiong J Y, Zhang Y P. Impact of temperature on the initial emittable concentration of formaldehyde in building materials: Experimental observation. *Indoor Air*, 2010, 20: 523–529
- 79 Zhang Y P, Luo X X, Wang X K, et al. Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials. *Atmos*

Environ, 2007, 41: 3203–3216

80 Deng Q Q, Yang X D, Zhang J S. Study on a new correlation between diffusion coefficient and temperature in porous building materials. Atmos Environ, 2009, 43: 2080–2083

81 蔚文娟, 李睦, 张寅平. 建材散发 VOC 测试准确性评价方法及标准散发样品. 暖通空调, 2013, 43: 19–22

Pre-evaluation of indoor chemical pollutants in green building: Research progresses and suggestions

HUANG ShaoDan¹, XIONG JianYin² & ZHANG YinPing¹

¹ Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

The conception of green building comes out along with the concern and attention of sustainable development of buildings. Indoor air quality is an important part of green building. How to built a healthy, suitable and energy saving building becomes a hot social and research topic of the world, especially in China. As the main source of VOCs indoor, the emission character of VOCs from building materials and furniture influences indoor air quality directly. In order to predict the pollutant concentrations indoor, we must know the emission character firstly. Therefore, this paper introduces models of VOCs emission and measurement methods to determine the emission characteristic parameters. Some possible problems during pre-evaluation of indoor air quality and related suggestion are also proposed in this paper.

sustainable indoor environment, green building, indoor air quality, formaldehyde, volatile organic compounds (VOCs)

doi: 10.1360/N092016-00049