

# 绿色建筑涂料 VOCs 衰减约束下的项目工期与成本量化模型构建

王国良 滕英跃

内蒙古工业大学 内蒙古呼和浩特 010000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20147

**[摘要]** 在绿色建筑项目中,围绕节能、节材和环保的指标控制已较为成熟,但以室内空气质量为代表的健康性能仍未真正嵌入项目管理主线,尤其是在精装修阶段,涂料释放的挥发性有机物具有明显的持续性、衰减性和滞后性,使“工程完工”与“健康交付”之间常出现时间错位。基于此,本文以建筑涂料 VOCs 释放—衰减过程为研究对象,构建工期与成本耦合量化模型。研究通过建立 VOCs 浓度衰减预测方程,将空气质量达标所需时间转化为可嵌入施工网络计划的技术活动,并进一步纳入材料采购、通风治理、工期占用及延期风险等成本变量,形成多目标决策框架。结果表明,VOCs 衰减约束会显著影响项目后期关键路径与总成本结构,绿色建筑交付管理应由单纯追求按期完工转向兼顾健康性能达成的协同优化。

**[关键词]** 绿色建筑涂料 VOCs; 衰减约束; 项目工期; 成本量化; 模型构建

## 引言

随着绿色建筑理念由单纯的节能导向逐步转向健康、低碳与全寿命周期价值导向,建筑交付质量的评价尺度正在发生变化。对于使用者而言,建筑是否真正“绿色”,并不只取决于围护结构节能率、设备效率或认证等级,更直接体现在交付初期的空气品质、舒适度和健康安全。尤其是在办公楼、学校、医院及住宅精装修项目中,涂料、胶黏剂和板材等装饰材料释放的 VOCs 往往具有持续释放特征,即便材料在出厂时已满足环保标准,也不意味着在具体工程环境中能够同步实现健康交付。因此,有必要将涂料 VOCs 衰减问题从末端环保议题提升为项目管理议题,使其成为可量化、可预测、可嵌入进度与成本决策的核心参数。

### 一、作用机理与研究假设

#### (一) VOCs 衰减的工程属性

从材料科学角度看,VOCs 释放本质上是涂层内部有机组分向表面迁移并进入室内空气的传质过程,受材料配方、膜层厚度、温湿度和通风条件等多重因素影响。从工程管理角度看,这一过程至少具有三重属性。

第一,VOCs 衰减具有可预测性。虽然现场环境存在波动,但在一定边界条件下,释放曲线和浓度变化总体具有可拟合规律,因此可以被转化为可计算的等待时间。第二,VOCs 衰减具有工序依附性。涂料施工完成后,污染物释放进入集中阶段,其达标过程实质上构成交付前必须完成的一段技术等待期。第三,VOCs 衰减具有经济外部性。若等待期被忽略,项目后期将面临管理费上升、工期挤压、交付滞后和健康风险增大的连锁反应。也就是说,VOCs 不是单纯的环保检测对象,而是一个直接作用于工期和成本的管理变量。将其纳入量化模型,实质上是把“空气质量”由模糊感知转化为项目

决策参数。

#### (二) 研究范围与基本假设

为保证模型具有可解性与工程适用性,本文设定如下研究边界:研究对象主要为室内墙面与顶面涂料释放形成的 TVOC 约束,不对所有装修材料同时展开完全耦合求解;研究空间按单一功能区或相对独立分区处理;室内空气在宏观上视为均匀混合;通风、净化与吸附效应以综合清除系数表示;施工活动逻辑关系已知,且涂装完成节点可以明确识别。

在此基础上提出四项假设:一是单位面积涂层的 VOCs 释放强度随时间呈指数衰减;二是室内污染物清除主要由换气和附加治理共同决定;三是空气质量达标所需时间可转化为项目网络中的一项技术活动持续时间;四是项目管理者可在材料方案、通风强度和分区移交方式之间进行决策选择。上述假设既保留了模型的物理逻辑,也保证其能够服务于项目管理中的方案比选与动态控制。

### 二、VOCs 衰减约束下的工期与成本量化模型

#### (一) VOCs 浓度动态模型

设单位面积初始释放强度为  $E_0$ , 衰减系数为  $k$ , 则某一代表性污染物在时刻  $t$  的释放强度可表示为:

$$E(t) = E_0 e^{-kt} \quad (1)$$

式(1)表明,材料排放强度随时间递减,衰减速率主要受材料配方、施工厚度及环境条件影响。

#### (二) 室内浓度动态模型

设室内空间体积为  $V$ , 涂装有效面积为  $A$ , 则材料负荷系数为  $L=A/V$ 。若室内有效换气系数为  $n$ , 附加净化及吸附综合清除系数为  $\beta$ , 室内背景初始浓度为  $C_0$ , 则室内浓度变化满足:

$$\frac{dC(t)}{dt} = L \cdot E(t) - (n + \beta)C(t) \quad (2)$$

联立式 (1) 可得:

$$C(t) = \frac{LE_0}{n + \beta - k} (e^{-kt} - e^{-(n+\beta)t}) + C_0 e^{-(n+\beta)t} \quad (3)$$

该方程表明, 室内污染物浓度由两端共同决定: 一端是材料释放端, 另一端是环境清除端。前者对应涂料环保水平、配方和涂布厚度, 后者对应自然通风、机械通风及净化治理能力。

若交付标准要求  $C(t) \leq C^{lim}$ , 则空气质量达标所需最短时间  $t^*$  为:

$$t^* = \inf \{ t \mid C(t) \leq C^{lim} \} \quad (4)$$

当项目同时受多个污染物指标控制时, 可取各控制项所需时间的最大值作为总等待时间。

### (三) 工期嵌入模型

设项目原始网络计划总工期为  $T_0$ , 涂装工序完成节点为  $N_p$ , 合同交付节点为  $N_d$ 。在传统网络计划中,  $N_p$  至  $N_d$  之间通常只安排保洁、验收和资料整理等活动, 而在本文模型中, 需新增一个“空气质量达标等待”活动  $W_v$ , 其持续时间为:

$$d_v = \left\lceil \frac{t^*}{24} \right\rceil \quad (5)$$

项目修正后的总工期为:

$$T = T_0 + \Delta T \quad (6)$$

其中,  $\Delta T$  是否等于  $d_v$ , 取决于  $W_v$  是否落在关键路径上及原计划是否存在足够时差。若采用分区施工与分区交付方式, 则第  $z$  分区的工期可表示为:

$$T_z = T_z^{finish} + d_{v,z} + T_z^{handover} \quad (7)$$

总工期取各分区交付时间的最大值。这意味着 VOCs 约束不仅增加一个等待时段, 更可能改变后期网络结构, 使原本非关键的装修区域转变为关键区域。因此, 在交付阶段压缩工期并不只是加班抢工, 而需要前置考虑材料与环境约束。

### (四) 成本量化模型

考虑材料、治理、工期与风险的综合影响, 项目总成本定义为:

$$C_{total} = C_m + C_v + C_t + C_p + C_r \quad (8)$$

其中:

$$C_m = \sum A_j p_j \quad (9)$$

$$C_v = C_{eq} + C_{en} \quad (10)$$

$$C_t = \gamma \cdot T \quad (11)$$

$$C_p = \pi \cdot \max(0, T - T_c) \quad (12)$$

$$C_r = L_r \cdot P(C(T_c) > C^{lim}) \quad (13)$$

上式中,  $C_m$  为材料成本, 表示不同涂料方案的采购费用。通常环保等级越高, 单位价格越高;  $C_v$  为通风治理成本, 包

括机械通风设备租赁费、净化装置费用及能耗费用;  $C_t$  为工期占用成本, 指现场管理费、措施费、资金占用费等随时间增加的间接费用, 其中  $\gamma$  为单位时间工期占用成本。 $C_p$  为延期损失成本;  $C_r$  为不达标风险成本, 若项目在合同节点强行交付, 则存在空气质量超限风险, 对应潜在返工、治理和声誉损失的期望值。

### (五) 双目标决策模型

兼顾交付工期与综合成本, 可建立如下双目标优化模型:

$$\min \{ T(x), C_{total}(x) \} \quad (14)$$

约束条件为:

$$C(T_d) \leq C^{lim}, x \in X \quad (15)$$

其中,

$x$  为决策变量组合, 包括涂料方案、通风方案、施工分区方式及交付策略。若需进行工程应用层面的快速比选, 可采用加权综合函数:

$$F(x) = \omega_1 \cdot \frac{T(x) - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} + \omega_2 \cdot \frac{C_{total}(x) - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (16)$$

当业主对按期交付要求更高时, 可提高  $\omega_1$ ; 当项目对投资回收和现金流更敏感时, 可提高  $\omega_2$ 。这种模型形式兼顾了学理性与可操作性, 便于项目经理在不同约束环境下形成方案优选。

### (六) 算例分析与结果讨论

为验证模型的适用性, 构建一栋办公建筑精装修阶段算例。设其有效室内体积为 18000 m<sup>3</sup>, 涂装有效面积为 27000 m<sup>2</sup>, 则材料负荷系数为 1.50。项目原始总工期为 116 d, 合同交付工期为 120 d, 即内装后期仅保留有限机动时间。单位日工期占用成本取 4.0 万元, 延期损失按 7.5 万元/d 计。

设置三种方案:

方案 A 为普通低 VOCs 水性涂料配合自然通风;

方案 B 为高环保等级涂料配合自然通风;

方案 C 为普通低 VOCs 水性涂料配合机械通风强化。

根据模型求解, 三种方案达到空气质量阈值的等待时间分别为 6.2 d、3.9 d 和 2.8 d。若涂装完成后即进入等待阶段, 则对应项目总工期分别为 122.2 d、119.9 d 和 118.8 d。由此可知, 方案 A 虽然材料单价最低, 但其等待时间过长, 已突破合同工期上限; 方案 B 通过提高材料环保性能缩短衰减期; 方案 C 则通过提升环境清除强度进一步压缩等待时间。

继续计算总成本。方案 A 材料成本最低, 为 96 万元, 但因等待期较长, 新增工期占用成本 24.8 万元, 延期 2.2 d 产生违约损失 16.5 万元, 总成本反而高于预期。方案 B 材料成本提高至 116 万元, 但无延期, 工期占用成本降至 15.6 万元。方案 C 在材料成本 100 万元、设备及能耗费用 10.8 万元的条件下, 工期占用成本为 11.2 万元, 同样无延期。具体结果详见表 1。

表1 同材料—通风组合方案的工期与成本对比

方案	涂料方案	通风方式	达标等待时间/d	项目总工期/d	材料及治理成本/万元
A	普通低 VOCs 水性涂料	自然通风	6.2	122.2	96.0
B	高环保等级涂料	自然通风	3.9	119.9	116.0
C	普通低 VOCs 水性涂料	机械通风强化	2.8	118.8	110.8

表1显示,材料端优化与环境端优化均可缩短空气质量达标时间,但二者的成本结构并不相同。方案A虽然材料采购成本最低,却因等待时间过长导致工期占用成本与延期损失迅速放大,最终不具备综合优势。方案B通过提高材料环保等级压缩衰减周期,适用于交付时间较紧但现场附加通风条件一般的项目。方案C则表明,在一定范围内增加机械通风与净化投入,可以用较低的治理成本换取更大的工期节约,从而实现总成本最优。由此可见,绿色建筑内装阶段的最优决策并非“越环保越好”或“越便宜越好”,而是应在材料性能、通风能力和合同约定之间寻求全局均衡。

### 三、基于动态监测的模型修正与管理机制

静态预测模型为前期决策提供了基础,但工程现场的实际环境具有不确定性,诸如施工温湿度波动、涂刷厚度偏差、开窗条件变化和交叉施工扰动等因素,均可能使理论曲线与实际浓度发生偏离。因此,若要使量化模型真正服务于现场管理,还必须引入动态监测与滚动修正机制。

可在涂装完成后于关键房间布设空气质量传感器,对TVOC及代表性单体污染物浓度进行连续采集,并将监测数据与预测曲线进行拟合修正。设模型参数向量为 $\theta = (E_0, k, n, \beta)$ ,则其在线修正可表达为:

$$\hat{\theta} = \arg \min \sum_{T=1}^I (C^{obs}(\tau) - C^{pred}(\tau; \theta))^2 \quad (17)$$

通过参数更新,项目管理者可实时获得剩余达标时间预测值,并据此开展三类纠偏:其一,增加机械换气频次或延长设备运行时长;其二,调整分区验收与移交流程,使已达标区域优先交付;其三,对未达标区域局部加强治理,避免整体性延期。动态监测的管理价值不在于单纯记录数据,而在于将“结果检测”转化为“过程控制”,形成预测、监测和纠偏相结合的管理闭环。将健康性能纳入项目全过程并结合连续监测进行动态调控,是绿色建筑交付管理由末端验收向过程治理转变的关键。

### 四、模型的管理启示与适用边界

本文模型的管理启示主要体现在三个方面。第一,应改变精装修阶段“先完工、后检测”的惯性思维,把空气质量达标要求前置到材料采购和进度编制阶段。否则,项目后期即使发现问题,也往往只能以更高成本换取有限纠偏空间。第二,应把分区施工、分区通风和分区交付作为缩短总工期的重要策略。在整体交付模式下,局部最慢区域往往拖累全部交付节点;而分区管理有助于将健康约束局部化、可控化。第三,应把空气质量连续监测纳入项目后段管理。健康性能

不是一次性检测结果,而是动态衰减过程中的状态量,只有通过连续监测和模型修正,项目经理才能及时判断偏差来源并采取针对性干预。将健康性能通过连续监测系统嵌入项目全过程,并形成预测、监测和纠偏的闭环,是提升绿色建筑真实交付价值的重要抓手。

当然,本文模型也存在适用边界。其一,模型将多源污染简化为以涂料VOCs为代表的主控变量,未完全展开胶黏剂、板材和家具等多污染源叠加效应。其二,室内空气均匀混合假设便于计算,但在大空间、复杂通风组织和局部死角条件下可能存在偏差。其三,风险成本的概率表达在实际应用中仍需结合企业历史数据、项目索赔经验和用户投诉数据进行校准。因此,后续研究可在多污染物耦合、BIM空间分区建模、随机扰动模拟及实测案例反演等方向进一步深化。

### 五、结语

总而言之,衡量绿色建筑真正的价值不单单依据其建成指标是否合格,还需要细化到其交付阶段是否健康可用。文章构建的建筑涂料VOCs衰减构建工期与成本量化模型,实质上是前置长时间受到护士的空气质量问题,并将其量化呈现。研究表明,可以将空气质量达标时间视为明确的技术活动并将其列入到项目网络计划当中,同时科学组合材料类型和通风强度来达到系统管控成本和工期的目的。与过去单纯注重材料单价以及末端检测相比较而言,前置引入衰减模型、动态监测与纠偏机制,更有助于提升绿色建筑的交付确定性和使用价值。未来,随着连续监测技术、BIM模型和数字化施工平台进一步融合,健康性能有望从绿色建筑的附属指标转变为管理核心指标。

### [参考文献]

- [1]白辉,张茜,程争刚,等.基于多源数据融合的建筑公共空间评价方法与技术路径研究[J].中国建设信息化,2023(18):74-78.
  - [2]徐伟,郭雅楠.基于低碳理论的绿色建筑经济效益评价体系分析[J].上海节能,2023.
  - [3]庄懋懋.绿色建筑工程评审中节能指标量化评估方法研究[J].绿色中国,2025(6):157-159.
  - [4]贾志勇,周祁,谢士涛.公共建筑绿色运行综合效益量化计算方法探讨[J].住宅与房地产,2024(26):31-33.
- 作者简介:王国良,1989年11月,男,汉族,本科,内蒙古自治区呼和浩特市,化工工程师,绿色建筑涂料VOCs衰减规律与项目工期/成本的量化模型构建。