

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-171-05

主动绿墙净化甲醛能力分析

于乐 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 通过动态熏蒸实验研究了三种绿墙模块在不同流量梯度下对不同浓度梯度的甲醛气体的净化能力。结果表明: 主动绿墙对甲醛有较好的净化能力; 单程净化率随流量的增加而显著降低 ($P<0.01$), 净化速率随流量的增加而显著增加 ($P<0.01$); 净化速率与甲醛负荷呈线性正相关。植物种类间的表现存在显著差异, 其中吊兰净化表现最好, 鹅掌柴次之, 袖珍椰子最差。

【关键词】 植物修复; 主动绿墙; 甲醛净化
中图分类号 X511 文献标识码 A

Study on Formaldehyde Removal by Active Green Walls

Yu Le Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The purification ability of three different active green walls for formaldehyde gas with different concentrations was investigated by dynamic fumigation experiments at different airflow rates. The results showed that the active green wall had high formaldehyde removal capacity. The single pass removal efficiency decreased significantly ($P<0.01$) and the elimination capacity (EC) increased significantly ($P<0.01$) with the increase of the airflow rate; EC was linearly and positively correlated with inlet formaldehyde loading rate; Significant differences in formaldehyde removal effectiveness amongst the plant species were observed with *Chlorophytum comosum* performing the best, followed by *Schefflera octophylla*, with *Chamaedorea elegans* being the worst.

【Keywords】 phytoremediation; active green walls; formaldehyde removal

作者简介: 于乐 (1994.10-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1243537978@qq.com

通讯作者: 袁艳平 (1973.06-), 男, 博士研究生, 教授, E-mail: ypyuan@swjtu.cn

收稿日期: 2021-08-17

0 引言

随着工业化和城镇化的推进, 人们的生活和工作方式发生了显著的变化。研究发现当代人们有80%的时间实在室内度过, 室内空气品质与人员健康息息相关^[1]。然而, 在人们对居住和工作环境的追求区域高档化和舒适化的过程中, 大量的化学合成材料在室内广泛应用, 造成了室内甲醛污染^[2]。甲醛在我国有毒化学品优先控制名单上高居第二位, 其对人体的危害包括刺激作用、遗传毒性甚至导致癌症^[3]。

目前, 室内甲醛去除技术主要包括物理吸附、催化氧化、臭氧氧化和生物过滤技术^[3]。然而, 这

些技术存在价格昂贵, 只针对部分污染物, 甚至在净化过程中产生二次污染等问题^[4]。因此, 植物修复技术因其环保、绿色、人文和社会效益受到了广泛关注。植物修复技术是指通过植物及其根际微生物降解来吸附、吸收、代谢和降解来去除环境中的污染物^[5]。

到目前为止, 许多研究对盆栽植物净化甲醛的能力进行了实验, 结果表明盆栽植物在受控的实验室条件下能够有效的去除甲醛^[6]。然而, 有研究表明要获得与这些实验室研究相当的结果, 在实际应用中需要大量的植物, 指出盆栽植物等静态系统在去除甲醛污染方面效率低下^[7]。相比于盆栽植物,

集生物技术、园艺科学和通风工程于一体的主动绿墙具有更大的植物密度，垂直分布方式有效利用空间，辅以机械通风加快了对室内污染空气的处理，成为改善室内甲醛污染的有效手段^[8]。

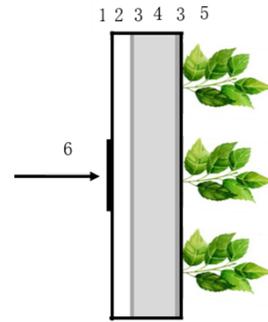
Pettit 等^[9]利用主动绿墙系统测试了 9 种不同 VOCs 的单程净化率，结果表明不同 VOCs 的单程净化率存在显著差异。Wang 和 Zhang^[10]评估了主动绿墙去除甲醛和甲苯的能力，发现净化率分别超过 90%和 70%。不同于 Wang 和 Zhang 的结果，Lee 等^[11]研究发现甲醛和苯的去除率仅为 39%。Torpy 等^[11]在 50m³/h 的主动气流下测试了主动绿墙对甲基乙基酮 (MEK) 的净化，发现单程净化率平均为 57%。对现有研究分析发现，主动气流是主动绿墙的显著特征，然而目前对于其对主动绿墙净化的影响研究不足。此外，研究几乎均在静态条件下，不能代表室内 VOCs 的长期释放过程。因此本文研究了动态条件下主动绿墙对甲醛的净化表现，分析了流量对其净化表现的影响，为主动绿墙的应用提供指导。

1 实验设计

1.1 实验材料

本文研究的绿墙模块是绿墙系统的关键组成部分，如图 1 所示。主动绿墙包括两个功能部分：(1) 生长基质和植物，其中植物和微生物等生物部分可以吸收和降解污染物，基质等非生物部分可以吸附污染物；(2) 安装在模块背部的风机将周围空气引入系统提高了污染物扩散速度。实验植物为吊兰、鹅掌柴和袖珍椰子，如图 2 所示，植物株龄为 1 年，长势良好且大小一致。模块尺寸为 350mm×350mm×100mm，带有 9 个圆孔用于扦插植物。生长基质为椰糠和泥炭土按照 50:50 比例组成。空气夹层使得从模块背部进入的空气得以均匀通过模块正面。完整的绿墙模块（已经种植植物）放在实验室条件中培养 2 个月，并通过空调系统将室内温度和相对湿度分别保持在 23℃±2℃ 和 40%±5%。为了促进植物的生长并更好地研究植物介导的甲醛净化效果，采用 LED 灯为绿墙模块提供约 6600lx（约 120μmol·m⁻²·s⁻¹）的平均照度，该值约为实验室内测得的最大光照强度的一半并足以保障植物正常的光合作用，光照周期为 12h/day。所有模块五天浇水一次至饱和并自然排水，从而模

拟绿墙模块在实际应用中的浇水频率。



1: 聚乙烯外壳; 2: 空气夹层;
3: 多空高密度聚乙烯 (固定基质); 4: 生长基质;
5: 植物地上部分; 6: 气流入口 (风机安装处)

图 1 绿墙模块结构示意图

Fig.1 Schematic of the green wall module

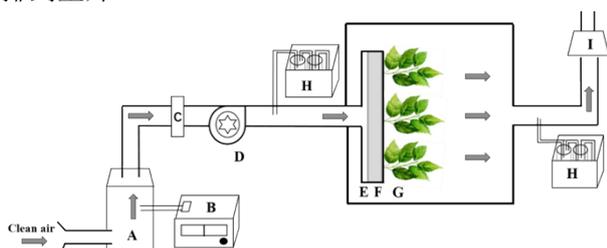


图 2 实验采用的三种植物种类 (从左到右依次为: 吊兰、鹅掌柴、袖珍椰子)

Fig.2 Plant species used in the present work. From left to right: *Chlorophytum comosum*, *Schefflera octophylla*, and *Chamaedorea elegans*

1.2 实验装置

实验采用动态玻璃舱熏蒸系统, 如图 3 所示。玻璃舱尺寸为 0.6m×0.6m×0.6m。通过调节甲醛发生装置 (HY-JQ-3, 东莞环艺仪器技术有限公司, 中国) 的发生温度和主系统风机流量来控制绿墙模块入口流量和甲醛浓度。待进出口甲醛浓度稳定后, 通过气体采样装置 (崂应 2020 型, 青岛崂山应用技术研究, 中国) 采样并测量含甲醛的空气通过绿墙模块前后的浓度。废气通过通风柜处理后排到室外。



A: 混合室; B: 甲醛发生装置; C: 流量计; D: 风机 (外径 75mm); E: 模块空气夹层 (厚度 20mm); F: 生长基质; G: 植物; H: 气体采样装置; I: 通风柜

图 3 主动绿墙动态熏蒸实验装置

Fig.3 Schematic of the experimental setup

1.3 实验设置

为了探究主动绿墙去除空气中甲醛的能力, 实验分为两部分进行: (1) 没有绿墙模块的“空室测试”。在稳定的气流速率下, 通过已知浓度的入口甲醛浓度来确定腔室损失 (例如, 由于泄漏或腔室表面吸附); (2) 在不同流量和甲醛浓度下来进行“整体绿墙模块甲醛去除测试”。

对照实验设置动态熏蒸系统的流量为 50m³/h, 通过调节甲醛发生装置的加热温度 (95℃) 及输出流量 (3L/min), 使得玻璃舱上游入口处甲醛浓度约为 2.0mg/m³。20min 后同时对进出口的甲醛进行采样测量。待一次操作完成后, 打开舱门及通风柜使得环境中甲醛尽可能排净。然后重复至少 10 次, 通过进出口甲醛浓度的配对样本 *t* 检验来确定由玻璃舱造成的甲醛净损耗。然后将每个模块都放置在动态流通室中, 并依次进行入口甲醛浓度约为 1.0、2.0 和 3.5mg/m³ 的熏蒸。气流分别设置为 30 50 和 65m³/h。实验过程中, 在甲醛发生器运行即将结束时, 同时从腔室进出口进行采样。在 60 分钟的熏蒸过程中使用了不同的采样时间, 结果表明出口甲醛浓度在每次甲醛发生结束前已达到稳定 Torpy

等^[12]在研究中发现了类似的结果, 其中出口浓度在一小时内保持稳定。甲醛浓度通过乙酰丙酮分光光度法利用分光光度计 (GENESYS 180, Thermo Fisher Scientific, USA) 按照国标《GB/T 15516-1995》进行测量。

1.4 数据处理

采用单程净化率和净化速率来分析三种绿墙模块对甲醛的净化表现及浓度和流量对绿墙甲醛净化的影响规律。

单程净化率 (single pass removal efficiency, SPRE) 表示含甲醛的空气单次通过绿墙后甲醛含量降低的程度, 利用动态腔室入口和出口处甲醛浓度按照公式 (1) 计算:

$$SPRE = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中 SPRE 为绿墙模块对甲醛的单程净化率%; C_i 为入口处甲醛浓度, mg/m³; C_o 为出口处甲醛浓度, mg/m³。

净化速率 (elimination capacity, EC) 表示单位绿墙模块面积在单位时间内去除的甲醛的质量, 其计算方式如式 (2):

$$EC = \frac{Q(C_i - C_o)}{A} \quad (2)$$

式中: EC 为绿墙模块对甲醛的净化速率, mg/(m²·h); Q 为穿过绿墙模块的流量, m³/h; A 为绿墙模块的面积, m²。

数据分析采用 Excel 和 SPSS 软件进行, 绘图采用 Origin 进行。

2 实验结果与分析

经夏皮洛-威尔克 (S-W) 检验, 对照实验进出口甲醛浓度均服从正态分布 ($P>0.05$), 再次对进出口浓度采用皮尔逊相关性分析, 结果显示二者存在高度显著正相关 ($P<0.01$) 且强相关 ($r=0.804$), 最后配对样本 *t* 检验表明进出口甲醛浓度不存在差异 ($P=0.905$), 因此, 动态熏蒸玻璃舱展现出良好的密封完整性, 其甲醛损失可忽略不计。

不同甲醛浓度和流量下主动绿墙对甲醛的单程净化率状况如表 1 所示。由表 1 可知, 主动绿墙的单程净化率总体范围为 38.2%~94.4%, 并且吊兰表现最好 (63.4%~94.4%), 鹅掌柴次之 (53.2%~

89.7%)，袖珍椰子最差 (38.2%–79.4%)。方差分析和事后检验表明主动绿墙对甲醛的单程净化率随甲醛浓度和流量的增加而显著 ($P<0.01$) 降低，并且流量对单程净化率的影响 ($F=51, P<0.01$) 超过甲醛浓度的影响 ($F=20, P<0.01$)。

表 1 不同浓度和流量下主动绿墙对甲醛的单程净化率 (%)

Table 1 Formaldehyde removal efficiency by active green walls as a function of the inlet formaldehyde concentration and airflow rate passing through the modules

浓度 (mg/m ³)	流量 (m ³ /h)	单程净化率 (%)		
		吊兰	鹅掌柴	袖珍椰子
0.97	30	92.9	87.9	79.6
	50	86.1	82.6	73.3
	65	77.7	72.8	65.3
1.91	30	90.9	85.3	75.0
	50	80.3	73.9	65.8
	65	67.9	59.6	49.8
3.31	30	88.0	82.5	66.8
	50	77.2	66.6	53.7
	65	64.6	54.5	39.1

表 2 不同浓度和流量下主动绿墙对甲醛的净化速率 (mg/(m²·h))

Table 2 Formaldehyde elimination capacity by active green walls as a function of the inlet formaldehyde concentration and airflow rate passing through the modules

浓度 (mg/m ³)	流量 (m ³ /h)	单程净化率 (%)		
		吊兰	鹅掌柴	袖珍椰子
0.97	30	219	211	188
	50	329	327	290
	65	398	379	336
1.91	30	434	410	358
	50	619	573	504
	65	676	598	494
3.31	30	670	620	542
	50	1102	945	761
	65	1134	946	685

不同甲醛浓度和流量下主动绿墙对甲醛的净化速率状况如表 2 所示。由表 2 可知，主动绿墙的净化速率总体范围为 185–1156mg/(m²·h)，吊兰

表现最好 (214–1156mg/(m²·h))，鹅掌柴次之 (205–986mg/(m²·h))，袖珍椰子最差 (185–769mg/(m²·h))。不同于浓度和流量对单程净化率的影响，主动绿墙对甲醛的净化速率随浓度和流量的增加而显著增加 ($P<0.01$)，并且甲醛浓度对主动绿墙甲醛净化速率的影响 ($F=222, P<0.01$) 超过流量的影响 ($F=48, P<0.01$)。结果表明主动绿墙能够净化大量的甲醛，不过值得注意的是，在甲醛浓度为 1.91 和 3.31mg/m³ 时，当流量从 50m³/h 增加到 65m³/h 时，袖珍椰子的甲醛净化速率分别从 504mg/(m²·h) 降至 494mg/(m²·h) 和从 761mg/(m²·h) 降至 685mg/(m²·h)。一方面可能是流速过快使得绿墙对甲醛的吸附、吸收和降解不充分，另一方面可能是绿墙的甲醛净化速率达到饱和。

上述结果表明，甲醛浓度、流量和植物种类均对主动绿墙的甲醛净化存在影响。通过方差分析下的全因子模型分析表明，甲醛浓度、流量和植物种类以及三个因素间任意两个因素的交互作用均对主动绿墙的甲醛净化表现存在显著影响 ($P<0.01$)。不过，三个独立因素的影响远远超过因素间交互作用。在这三个因素中，对主动绿墙单程净化率的影响排序为：流量 ($F=1959, P<0.000$) > 植物种类 ($F=1259, P<0.000$) > 甲醛浓度 ($F=785, P<0.000$)；对主动绿墙甲醛净化速率的影响排序为：甲醛浓度 ($F=7317, P<0.000$) > 流量 ($F=1571, P<0.000$) > 植物种类 ($F=666, P<0.000$)。为了突显植物种类差异，更好地预测不同植物组成的绿墙的甲醛去除速率，尽量消除浓度和流量的干扰，以入口甲醛负荷作为横坐标，以绿墙对甲醛净化速率为纵坐标，对其进行回归分析，得到绿墙去除甲醛的预测模型，如图 4 所示。结果表明净化速率和甲醛负荷呈线性相关，不同于生物过滤装置存在临界甲醛负荷^[13]，因此主动绿墙具有更好的甲醛净化表现。

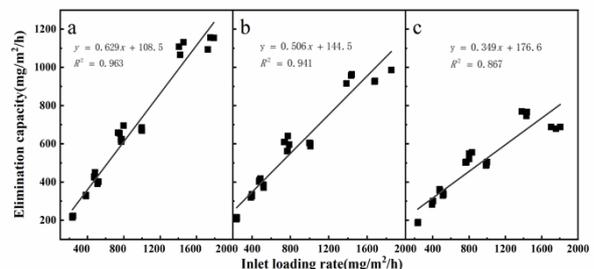


图 4 主动绿墙对甲醛的净化速率随甲醛负荷变化

Fig.4 Elimination capacity of active green walls as a function of the inlet formaldehyde loading rate

3 结论

本文采用动态玻璃舱熏蒸系统研究了动态条件下主动绿墙去除甲醛的特性,以单程净化率和净化速率为评价指标分析了浓度、流量和植物种类对主动绿墙甲醛净化的影响规律。

主动绿墙具有较高的甲醛净化表现,单程净化率和净化速率分别在 38.2%–94.4% 和 185–1156mg/(m²·h)范围内。主动气流是影响主动绿墙净化甲醛的最重要因素,单程净化率与流量呈显著负相关 ($P<0.01$),而净化速率则相反 ($P<0.01$)。植物种类对净化表现存在显著差异 ($P<0.01$),其中吊兰表现最好,鹅掌柴次之,袖珍椰子最差。主动绿墙对甲醛的净化速率与入口甲醛负荷呈线性正相关。

参考文献:

- [1] Zuo LJ, Wu D, Yuan YP, et al. Effect of arrangement and quantity of epipremnum aureum on work efficiency and subjective perceptions[J]. Environ Sci Pollut R., 2020,27(15):17804-17814.
- [2] 吴涛,张华玲,刘洋伶,等.基于污染物控制的室内空气调节技术[J].制冷与空调,2019,33(5):462-465,477.
- [3] Salonen H, Pasanen A-L, Lappalainen S, et al. Volatile organic compounds and formaldehyde as explaining factors for sensory irritation in office environments[J]. Journal of Occupational & Environmental Hygiene., 2009,6(4):239-247.
- [4] 江玲,姜小岬.室内甲醛污染治理技术研究探讨[J].广东化工,2015,42(10):134.
- [5] 孟国忠,季孔庶.室内空气污染的植物净化研究概述[J]. 林业科技开发,2013,27(4):1-6.
- [6] Kim KJ, Il Jeong M, Lee DW, et al. Variation in formaldehyde removal efficiency among indoor plant species[J]. Hortscience, 2010,45(10):1489-1495.
- [7] Cummings BE, Waring MS. Potted plants do not improve indoor air quality: a review and analysis of reported VOC removal efficiencies[J]. J Expo Sci Env Epid., 2020,30(2):253-261.
- [8] Kim KJ, Khalekuzzaman M, Suh JN, et al. Phytoremediation of volatile organic compounds by indoor plants: a review[J]. Hortic Environ Biote, 2018, 59(2):143-157.
- [9] Pettit T, Bettes M, Chapman AR, et al. The botanical biofiltration of VOCs with active airflow: is removal efficiency related to chemical properties?[J]. Atmos Environ., 2019,214 ARTN 116839.
- [10] Wang ZQ, Zhang JS. Characterization and performance evaluation of a full-scale activated carbon-based dynamic botanical air filtration system for improving indoor air quality[J]. Build Environ., 2011,46(3):758-768.
- [11] Lee CH, Choi B, Chun MY. Stabilizing soil moisture and indoor air quality purification in a wall-typed botanical biofiltration system controlled by humidifying cycle[J]. Korean J Hortic Sci., 2015,33(4):605-617.
- [12] Torpy F, Clements N, Pollinger M, et al. Testing the single-pass VOC removal efficiency of an active green wall using methyl ethyl ketone (MEK)[J]. Air Qual Atmos Hlth., 2018,11(2):163-170.
- [13] Xu ZJ, Qin N, Wang JG, et al. Formaldehyde biofiltration as affected by spider plant[J]. Bioresource Technol., 2010,101(18):6930-6934.