



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第7卷 第2期

Vol.7 No.2

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

2
2013

目次

水污染防治

颗粒活性炭深度处理抗生素废水	王健行	魏源送	成宇涛	李明月(401)
三维荧光区域积分评估城市污水中溶解性有机物去除	姚璐璐	涂响	于会彬	徐东耀
污水再生处理微滤-反渗透工艺经济分析	汤芳	孙迎雪	石晔	李旭
美国某给水厂处理工艺及净水效果	姚宏	张士超	周小轮	王春荣(422)
絮体性质对纳滤膜污染的影响	于洋	赵长伟	王艳贵	范卫红
香菇下脚料对水体中十二烷基苯磺酸钠的吸附				黄晓东
巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价	余秀娟	霍守亮	咎逢宇	赵广超
光催化氧化降解垃圾渗滤液中溶解性有机物	贾陈忠	刘松	张彩香	秦巧燕(451)
Cu/La 共掺杂 TiO ₂ 光催化氧化水中的氨氮	刘佳	龙天渝	陈前林	杜坤(457)
改性树脂对 β-萘磺酸的吸附性能				李跃金
厌氧序批式反应器中丝状颗粒污泥的形成				邵享文
紫外光照处理低浓度萘普生废水	陈依玲	刘国光	姚琨	吕文英(473)
新型立体浮床处理河道微污染源水的挂膜特性	陈亚男	郭宗楼	郑水生	汪开英
UASB 启动及不同 HRT 对老龄垃圾渗滤液处理效果的影响	刘子旭	孙力平	李玉友	邱春生
响应曲面法优化固相反硝化的工艺条件	徐影	仇天雷	韩梅琳	李军
不同沸石材料对沼液中磷素静态吸附去除	邢贻	陈玉成	熊佰炼	孙晓东
固态碳源去除地下水硝酸盐的模拟实验				王曼曼
旁路微氧池污泥停留时间对污泥减量化的影响	刘宇星	刘东方	张忠品	唐云鹭
工业废水中多金属离子的吸附净化	雷绍民	王欢	王恩文	李佳
改性粉煤灰吸附稀土废水中的氨氮				陈莉荣
改性玉米秸秆吸附 Cu ²⁺ 的动力学和热力学	陈钰	龚正君	杨顺生	孙彩云(523)
微生物絮凝剂的研制及其对水体叶绿素 a 的去除				陆洪省
多孔性 Mn ₃ O ₄ 的制备及其对水中镉的吸附				李长安
复合生物滤池处理城市高污染水体				张孝中
多孔孔板水力空化反应器的水力特性	朱孟府	邓橙	宿红波	游秀东
臭氧催化氧化降解苯胺的机理				宁军
改性沸石对低浓度氨氮废水的动态吸附	贾小宁	王耀龙	周林成	李彦锋(557)
电极面积对无质子交换膜微生物燃料电池协同去污能力的影响				
.....	冉春秋	李海燕	王冰	孙红杰
质子化壳聚糖的除磷性能				李隽截
固体超强酸 SO ₄ ²⁻ /TiO ₂ -SnO ₂ /Ce ⁴⁺ 光催化降解含酚废水	王九思	王宏英	赵来	吕涛涛
天然和 CPB 改性沸石对 Hg ²⁺ 的吸附特征	黄慧	郝硕硕	朱家亮	申源源
改性甘蔗渣对 Cu ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的吸附机理				齐亚凤
沼液中臭味物质的去除方法及其对营养物质的影响				何正艳
机械清洗法对 MBR 膜泥饼层的影响	尤朝阳	刘汤勤	张丹	肖晓强
生物接触氧化法处理选矿废水的影响因素	宋卫锋	唐铁柱	林梓河	严明
不同阳极微生物燃料电池产电性能的比较				尹航
活性炭吸附苯酚及其超声波再生效果				朱金凤
油田水反硝化技术抑制硫酸还原菌	邵涛	苟智	王林	(617)

大气污染防治

商业 SCR 烟气脱硝催化剂钙中毒研究	商雪松	陈进生	姚源	胡恭任(624)
膜生物反应器中生物膜的生长特性	苗峻赫	陈蓉	廖强	王永忠

湿法净化黑烟中添加剂对炭黑沉降性能的影响	战 琪 李彩亭 路 培 赵亚培 宋靖珂 方 鑫 罗飞杭 (637)
可旋转径向式微粒捕集器消声特性影响因素灰色关联分析	 龚金科 田 婵 王曙辉 陈 韬 左青松 官庆武 刘恒语 (643)
胶合竹材 GluBam 甲醛释放影响因素的气候箱实验与分析	 单 波 陈 杰 肖 岩 (649)
NiO/ γ -Al ₂ O ₃ 反应吸附苯并噻吩	 尹海燕 李春虎 周洪洋 (657)
钙基吸附剂捕集生物质燃气中的二氧化碳	 胡 辉 邹妍晖 张海旭 程 晖 李 芳 (663)
六铝酸盐催化剂的催化还原脱硫脱硝性能	 任晓光 朱旭东 李富霞 (668)
基于密相半干法脱硫工艺的生石灰消化及改性	 梁宝瑞 宋存义 赵荣志 常冠钦 刘希文 冷廷双 (673)
盆栽植物净化甲苯废气	 侯海萍 徐仲均 (679)

固 体 废 物 处 置

垃圾焚烧飞灰中不同粒径的毒性特性	李夫振 周少奇 林奕明 (684)
石灰污泥共热法在水泥煅烧中的应用	范海宏 张 鹏 李斌斌 (689)
水热炭化餐厨垃圾制备纳米铁/炭复合材料	吴倩芳 吴建芝 张付申 (695)
石灰预处理和干发酵对稻草热解特性影响	梁越敢 程备久 司友斌 曹德菊 郑 正 罗兴章 (701)
污泥膜覆盖好氧发酵通风调节方法	 盛金良 龚 莹 官 宁 施 炜 (705)
利用某尾矿制备纳米 SiO ₂	 廖茂荫 徐文彬 何舜锋 (711)
过量生石灰对污泥含水率和有机物含量的影响	周宏仓 徐 露 周云桥 何都良 章文斌 查 键 聂东阳 (717)
菇渣作为有机栽培基质好氧改性的实验	张唐娟 袁巧霞 陈 红 张利红 洪 娟 张俊峰 (722)
餐厨垃圾混菌发酵制备燃料乙醇	刘爱民 徐双锁 蔡 欣 彭 鹏 卢存龙 (727)
风淬钢渣对高炉渣基微晶玻璃性能的影响	陈左朋 申星梅 吕辉鸿 李辽沙 (732)
河湖疏浚淤泥的表征、絮凝和脱水	李 冲 吕志刚 陈洪龄 许 超 常 健 (737)
医疗废物回转窑焚烧线中二恶英的生成	 卢 青 (743)
多元回归和 BP 人工神经网络在预测混合厌氧消化产气量过程中的应用比较	张文阳 张良均 李 娜 周红艳 (747)

环 境 生 物 技 术

污泥好氧颗粒化过程中氨氧化菌群结构的演替与分析	张 斌 陈照立 陈 哲 李君文 王景峰 赵 阳 (753)
pH、接种量及固形物含量对氧化亚铁硫杆菌 LX5 煤炭生物脱硫的影响	刘玉娇 杨新萍 张德伟 王世梅 (759)
灵芝漆酶对直接蓝 86 的催化脱色性能	赵世光 刘 强 张庆庆 汤明礼 (765)
铜绿假单胞菌 NY3 所产表面活性剂对原油降解的影响	 常 虹 聂麦茜 葛碧洲 刘 超 杨 琴 周立辉 樊晓宇 孙 超 韦绒绒 蒋 欣 (771)
低温 1,2,4-TCB 降解菌的选育、降解特性及邻苯二酚 1,2-双加氧酶基因表达水平	 胡日查 孙立波 (777)
一株高效 MC-RR 降解菌的分离鉴定及其降解特性	崔亚青 俞 鲁 高雪莲 马田田 杨兴明 沈其荣 (783)
响应面法和神经网络优化 <i>Acinetobacter</i> sp. DNS32 发酵基质	 王 洋 王志刚 王 溪 郭火生 孟冬芳 张 颖 (791)

环 境 监 测 与 评 价

“7.16”大连新港石油管道爆炸事故中的热红外溢油监测	陈 澎 李 颖 余小凤 刘丙新 (796)
-----------------------------------	-----------------------

CONTENTS

Advanced treatment of antibiotic wastewater by granular activated carbon	Wang Jianxing Wei Yuansong Cheng Yutao Li Mingyue(401)
Evaluation of dissolved organic matter removal in municipal wastewater based on fluorescence regional integration	Yao Lulu Tu Xiang Yu Huibin Xu Dongyao Han Lu Song Yonghui(411)
Cost analysis for a microfiltration-reverse osmosis (MF-RO) process applied in wastewater reclamation	Tang Fang Sun Yingxue Shi Ye Li Xu Hu Hongying(417)
Process design and water purification efficiency of one water treatment plant in America	Yao Hong Zhang Shichao Zhou Xiaolun Wang Chunrong(422)
Effect of floc characteristics on nanofiltration membrane fouling	Yu Yang Zhao Changwei Wang Yangui Fan Weihong Luan Zhaokun(427)
Adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate from aqueous solutions by lentinus deodes residue	Huang Xiaodong Lou Benyong(433)
Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China	Yu Xiujuan Huo Shouliang Zan Fengyu Zhao Guangchao Xi Beidou Su Jing(439)
Degradation of dissolved organic matter in landfill leachate during photocatalytic treatment process	Jia Chenzhong Liu Song Zhang Caixiang Qin Qiaoyan(451)
Photocatalytic catalytic oxidation of ammonia in aqueous solutions by Cu/La-codoped TiO ₂	Liu Jia Long Tianyu Chen Qianlin Du Kun(457)
Adsorption behavior of β -naphthalenesulfonic acid by modified resin	Li Yuejin Li Ying Li Changhai(463)
Formation of granular sludge with filamentous microorganisms in anaerobic sequencing batch reactor (ASBR)	Shao Xiangwen Peng Dangeong(468)
Treatment of naproxen-containing water in low concentration by ultraviolet irradiation	Chen Yiling Liu Guoguang Yao Kun Lü Wenyong(473)
Biofilm colonization characteristics of tridimensional floating bed in treating micro-polluted river source water	Chen Yanan Guo Zonglou Zheng Shuisheng Wang Kaiying Wu Haitao Liu Lu(477)
Impact of UASB start-up and different HRT on treatment effect of old landfill leachate	Liu Zixu Sun Liping Li Yuyou Qiu Chunsheng Zhu Yongqiang(483)
Optimization of solid-phase denitrification process using response surface methodology	Xu Ying Qiu Tianlei Han Meilin Li Jun Wang Xuming(489)
Static adsorption characteristics and removal efficiency of phosphate in biogas slurry by different zeolite substrates	Xing Ze Chen Yucheng Xiong Bailian Sun Xiaodong Sun Xiaojing(494)
Simulation test of nitrate removal in groundwater with solid carbon source	Wang Manman Wang Jiaquan Chu Huanan(501)
Effect of retention time on sidestream bypass oxygen-limited sludge reduction process	Liu Yuxing Liu Dongfang Zhang Zhongpin Tang Yunlu Yu Jie Chen Ruiping Li Kexun(507)
Adsorption and purification of multiple metal ions in industrial wastewater	Lei Shaomin Wang Huan Wang Enwen Li Jia Guo Zhenhua Xu Teng(513)
Adsorption of ammonia nitrogen in rare-earth wastewater by modified fly ash	Chen Lirong Li Yumei Du Mingzhan(518)
Kinetics and thermodynamics for Cu ²⁺ adsorption by modified corn straw	Chen Yu Gong Zhengjun Yang Shunsheng Sun Caiyun(523)
Preparation of microbial flocculant and its removal of chlorophyll a in water	Lu Hongsheng Wei Wenchao Xue Tingting(530)
Preparation of porous Mn ₃ O ₄ and its adsorption for cadmium in water	Li Changan Liu Wei Chen Shang(535)
Treatment of urban highly polluted water by composite biofilter	Zhang Xiaozhong Huang Xin Jing Zhaoqian Cao Shiwei(541)
Hydraulic characteristics of hydrodynamic cavitation reactor with orifice plate	Zhu Mengfu Deng Cheng Su Hongbo You Xiudong Chen Ping Yuan Yinghai Zhu Lu(546)
Degradation mechanism of aniline by ozonation catalysis	Ning Jun Chen Liwei Cai Tianming(551)
Ammonia nitrogen dynamic adsorption from low concentration wastewater by modified zeolite	Jia Xiaoning Wang Yaolong Zhou Lincheng Li Yanfeng(557)
Effect of electrode area on collaborative removal of pollutant by membrane-less microbial fuel cells	Ran Chunqiu Li Haiyan Wang Bing Sun Hongjie Li Junjie Sun Jianan(563)
Dephosphorization effect of protonated chitosan	Zhang Chunhua Wang Wenjun An Xiaowen Hao Yannan(568)
Photocatalytic degradation of phenol solution by solid superacid catalyst SO ₄ ²⁻ /TiO ₂ -SnO ₂ /Ce ⁴⁺	Wang Jiushi Wang Hongying Zhao Lai Lü Taotao Wang Qi(573)
Adsorption characteristic of mercury (II) on natural and CPB modified zeolite	Huang Hui Hao Shuoshuo Zhu Jialiang Shen Yuanyuan Wang Zhigang Chen Hong(579)
Adsorption mechanism for Cu ²⁺ and Zn ²⁺ by modified bagasse	Qi Yafeng He Zhengyan Yu Junxia Chi Ruan(585)
Methods for bad smell materials removal and their impacts on nutrients in anaerobic fermentation liquids	Zhang Han Liu Yongjun(591)
Effect of mechanical cleaning method on MBR membrane sludge cake layer	You Chaoyang Liu Tangxun Zhang Dan Xiao Xiaoqiang Liu Zhiyin(598)

Some influencing factors of flotation wastewater treatment with bio-contact oxidation method	Song Weifeng Tang Tiezhu Lin Zihe Yan Ming Deng Qi Chen Xiaoping (603)
Comparison of power generation performance of different types of anodes in microbial fuel cells	Yin Hang Hu Xiang (608)
Phenol adsorption on activated carbons and their regeneration performance by ultrasonic	Zhu Jinfeng Wang Sanfan Lu Jiongyuan (613)
Denitrification inhibiting sulfate-reducing bacteria activity in oilfield water	Shao Tao Gou Zhi Wang Lin (617)
Study on calcium poisoning of commercial SCR de-NO _x catalyst	Shang Xuesong Chen Jinsheng Yao Yuan Hu Gongren (624)
Growth characteristics of biofilm in membrane bioreactor	Miao Junhe Chen Rong Liao Qiang Wang Yongzhong Zhu Xun (631)
Effect of additives in smoke wet purification on soot settling properties	Zhan Qi Li Caiting Lu Pei Zhao Yapei Song Jingke Fang Xin Luo Feihang (637)
Grey relational analysis on influencing factors of muffling characteristic in a radial rotatable diesel particulate filter	Gong Jinke Tian Chan Wang Shuhui Chen Tao Zuo Qingsong Guan Qingwu Liu Hengyu (643)
Influencing factors analysis of formaldehyde emission from GluBam sheet by climate chamber test	Shan Bo Chen Jie Xiao Yan (649)
Reactive adsorption of benzothiophene on NiO/ γ -Al ₂ O ₃ adsorbent	Yin Haiyan Li Chunhu Zhou Hongyang (657)
Capturing carbon dioxide in biomass gas by calcium-based sorbents	Hu Hui Zou Yanhui Zhang Haixu Cheng Hui Li Fang (663)
Properties of hexaaluminate catalysts and catalytic reduction activity for desulfurization and denitrification	Ren Xiaoguang Zhu Xudong Li Fuxia (668)
Digestion and modification of lime based on dense semi-dry desulfurization process	Liang Baorui Song Cunyi Zhao Rongzhi Chang Guanqin Liu Xiwen Leng Tingshuang (673)
Toluene purification by potted plants	Hou Haiping Xu Zhongjun (679)
Toxicity characteristics of different particle sizes of fly ash from municipal solid waste incinerators	Li Fuzhen Zhou Shaoqi Lin Yiming (684)
Application of sludge drying heat with lime in cement burning	Fan Haihong Zhang Peng Li Binbin (689)
Fe/C nano-materials development from kitchen garbage under hydrothermal condition	Wu Qianfang Wu Jianzhi Zhang Fushen (695)
Effect of lime pretreatment and dry digestion on pyrolysis characteristics of rice straw	Liang Yuegan Cheng Beijiu Si Youbin Cao Deju Zheng Zheng Luo Xingzhang (701)
Ventilation adjustment methods in sludge static aerobic fermentation with membrane covering technology	Sheng Jinliang Gong Ying Gong Ning Shi Wei (705)
Preparation of nano SiO ₂ by using tailings	Liao Maoyin Xu Wenbin He Yifeng (711)
Effect of adding excessive lime on moisture content and organic matter content in sludge	Zhou Hongcang Xu Lu Zhou Yunqiao He Duliang Zhang Wenbin Zha Jian Nie Dongyang (717)
Aerobic modified experiment of mushroom residue as organic substrate	Zhang Tangjuan Yuan Qiaoxia Chen Hong Zhang Lihong Hong Juan Zhang Junfeng (722)
Fuel ethanol production from food waste by being mixed microbial fermentation	Liu Aimin Xu Shuangshuo Cai Xin Peng Peng Lu Cunlong (727)
Effect of air quenched steel slag on properties of glass-ceramic based on blast furnace slag	Chen Zuopeng Shen Xingmei Lü Huihong Li Liaosha (732)
Characterization, flocculation and dehydration of dredged sludge	Li Chong Lü Zhigang Chen Hongling Xu Chao Chang Jian (737)
Formation of dioxin in a rotary kiln medical waste incineration line	Lu Qing (743)
Comparing multiple regression and BP artificial nerve net model used on prediction of anaerobic co-digestion gas-producing process	Zhang Wenyang Zhang Liangjun Li Na Zhou Hongyan (747)
Evolution and analysis of ammonia-oxidizing bacteria communities during aerobic sludge granulation	Zhang Bin Chen Zhaoli Chen Zhe Li Junwen Wang Jingfeng Zhao Yang (753)
Effect of pH, inoculation and coal burden on bio-desulfurization of coal by <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> LX5	Liu Yujiao Yang Xinpeng Zhang Dewei Wang Shimei (759)
Decolorization of Direct Blue 86 catalyzed by laccase from <i>Ganoderma lucidum</i>	Zhao Shiguang Liu Qiang Zhang Qingqing Tang Mingli (765)
Effects of rhamnolipid on oil degradation by <i>Pseudomonas aeruginosa</i> strain NY3	Chang Hong Nie Maiqian Ge Bizhou Liu Chao Yang Qin Zhou Lihui Fan Xiaoyu Sun Chao Wei Rongrong Jiang Xin (771)
Isolation, degradation characteristics and catechol 1,2 dioxygenase gene expression level of 1,2,4-TCB degrading bacterium under low temperature	Hu Richa Sun Libo (777)
Isolation and identification of a MC-RR degradation bacillus and its degradation characteristics	Cui Yaqing Yu Lu Gao Xuelian Ma Tianian Yang Xingming Shen Qirong (783)
Optimization of fermentation medium for <i>Acinetobacter</i> sp. DNS32 by response surface methodology and artificial neural network	Wang Yang Wang Zhigang Wang Xi Guo Huosheng Meng Dongfang Zhang Ying (791)
Thermal infrared oil spills monitoring in “7.16” Dalian Xingang oil pipeline explosion	Chen Peng Li Ying Yu Xiaofeng Liu Bingxin (796)

盆栽植物净化甲苯废气

侯海萍 徐仲均*

(北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029)

摘要 采用动态模拟法模拟盆栽植物对甲苯污染气体的净化, 考察吊兰和金绿萝两种盆栽植物在净化甲苯过程中, 甲苯入口浓度与植物对甲苯净化速率的关系。结果表明, 2种盆栽植物对低浓度甲苯废气具有长期明显的净化效果。在相同条件下, 吊兰茎叶和土壤的净化速率优于金绿萝体系。在植物的耐受浓度范围内, 2种植物茎叶和土壤的净化速率均随着甲苯入口浓度的升高而增大, 且白天的净化速率明显高于黑夜时的净化速率。在实验过程中, 吊兰土壤体系的降解率随着甲苯浓度的升高逐渐下降; 金绿萝土壤体系的降解率基本不受甲苯入口浓度的影响。吊兰盆栽体系的降解率明显大于金绿萝的降解率。两种植物盆栽体系的降解率随甲苯进口浓度的影响可以忽略。

关键词 吊兰 金绿萝 甲苯 动态模拟

中图分类号 X701.7 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)02-0679-05

Toluene purification by potted plants

Hou Haiping Xu Zhongjun

(Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract A dynamic method was used to simulate the toluene purification by the potted plant for investigating the relation between toluene concentration and removal capacities for potted spider plant and golden pothos. The results showed that the two kinds of plants can obviously remove toluene from air in a long time. The toluene removal capacities for shoots and soil of the spider plant were respectively higher than for golden pothos in the same environment. The removal capacities for shoots and soil of a couple of plants increased with inlet toluene concentration. The removal capacities were higher in the daytime than in the nighttime. The degradation efficiency of soil of spider plant decreased while that of golden pothos did not drop with enhancing toluene concentration. The potted spider plant had higher degradation efficiency compared with golden pothos. The effect of inlet toluene concentration on degradation efficiencies of the potted plants can be negligible.

Key words spider plant; golden pothos; toluene; dynamic simulation

甲苯作为有机化工的重要原料, 被广泛用作汽油添加剂、喷漆、橡胶等行业的溶剂和稀释剂^[1], 是常见的工业有机废气之一。同时, 甲苯常被用作建筑材料、装潢材料的溶液^[2], 也是主要的室内污染物之一。甲苯主要损害人的中枢神经, 造成神经系统障碍, 长期接触甲苯会出现头晕、失眠、记忆力减退等症状^[3]。

目前, 甲苯的净化处理方法有很多, 主要有: 通风、物理吸附、化学吸收、催化氧化、等离子体法、生物法等^[4-8]。目前, 生物净化技术已经广泛地运用于甲苯废气的净化中。采用绿色植物净化空气, 不仅具有很好的观赏价值, 对甲苯废气也具有良好的净化效果^[9]。而且采用绿色植物净化的方法具有不产生二次污染、持久净化的特点。目前, 国内对植物净化甲苯的研究大都集中于对一定空间内静态甲

苯的净化。但是工业有机废气的产生具有连续性, 建筑材料中甲苯的释放也具有缓慢释放的特点。因此, 采用动态模拟法能更好地模拟对连续产生的甲苯污染气体的净化。皮东恒等^[10]采用动态模拟法科学地研究了光照、甲醛进口浓度、空气流速等对植物吊兰净化甲醛气体的影响。Xu等^[11]也曾采用动态模拟法研究了盆栽植物土壤对甲醛气体的净化贡献。

本研究采用动态模拟的方法模拟盆栽植物对连续释放的甲苯废气的净化。选取吊兰和金绿萝2种

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(41175103)

收稿日期: 2011-12-16; **修订日期:** 2012-02-11

作者简介: 侯海萍(1987~), 女, 硕士研究生, 主要从事环境污染控制的研究工作。E-mail: houhaiping1016@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhongjunxu@163.com

易于种植管理的盆栽进行实验。实验研究2种盆栽植物茎叶和土壤地下部分各自对甲苯的净化效率和降解率的贡献。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

实验用的盆栽吊兰和金绿萝来源于北京中蔬大森林花卉市场,甲苯溶液(分析纯),光照培养箱(GXZ-280B,宁波江南仪器厂),气相色谱分析仪(Acme6000,韩国英麟)。

1.2 实验方法与装置

称取相同质量的土壤,用指定的瓷花盆将新购买的盆栽吊兰和金绿萝栽好。将重新栽好的盆栽放置于实验室1周,以适应实验室和土壤的环境。

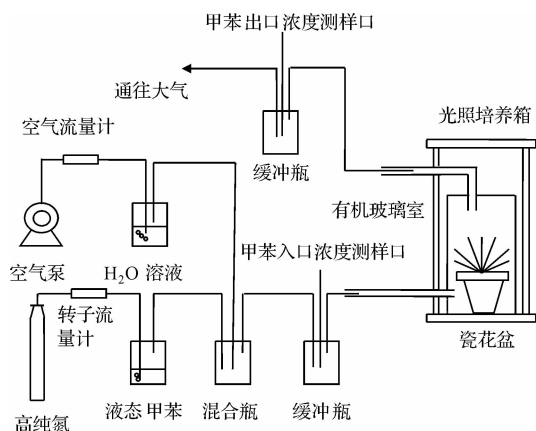


图1 盆栽植物净化甲苯实验装置图

Fig.1 Experimental device diagram of toluene purification by potted plants

图1为测定盆栽植物净化甲苯速率的实验装置图。净化速率的测定采用动态模拟的方式。首先将没有栽种盆栽植物的花盆放置于培养箱中,通入一定浓度的甲苯气体。每隔半个小时测定一次甲苯的进出口浓度。观察甲苯浓度稳定的时间,以及甲苯进出口浓度的变化。结果表明,甲苯浓度在实验开始后约4 h达到稳定,且进出口浓度的差异可以忽略。

将已栽种植物的盆栽放置于有机玻璃室中,通过向体系中通入连续的一定浓度的甲苯气体来模拟盆栽植物对化工生产过程和室内环境中持续产生或挥发出的甲苯的净化。有机玻璃室的温度和光照强度、时间是通过光照培养箱调节的。温度设为23℃。

气态甲苯通过高纯氮气吹脱甲苯溶液得到。甲

苯气体的浓度通过转子流量计和针型阀共同调节。同时向体系中通入一定量的水,通过调节空气流量计控制体系的湿度。

为了研究盆栽植物在白天和黑夜对甲苯净化速率的差异,通过调节光照培养箱的光照强度来实现对白天和黑夜光照条件的模拟。其中白天的光照强度为240 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光照时间为12 h;黑夜时无光照,运行时间为12 h。每24 h为1个运行周期。每个甲苯入口浓度运行两个周期,保证植物在同一浓度下的净化速率稳定。在各个浓度稳定的第2个周期开始测定甲苯进出口的浓度。为保证不同浓度下植物净化速率的可比性,在光照改变后的第5个小时连续测定3个平行样。

为了研究植物茎叶和土壤体系对甲苯净化的各自贡献,在盆栽植物净化甲苯实验完成后,切除植物地上部分,采用相同方式测定土壤体系的净化甲苯速率。植物地上部分的净化速率是由盆栽体系的净化速率与土壤体系的差值得到。

盆栽植物体系对甲苯的净化速率的计算采用以下公式:

$$V = (C_{\text{入}} - C_{\text{出}}) \cdot L_{\text{空气}} \quad (1)$$

式中: V 为净化速率, mg/h ; $C_{\text{出}}$ 为系统出口的甲苯浓度, mg/m^3 ; $C_{\text{入}}$ 为系统入口的甲苯浓度, mg/m^3 ; $L_{\text{空气}}$ 为空气流量, m^3/h 。

1.3 甲苯分析方法

实验过程中的甲苯气体浓度采用韩国英麟 Acme 6000 气相色谱仪分析,FID 检测器,DB-624 毛细管柱(规格:30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 1.8 μm)。气相色谱的分析条件为:柱温 90℃,进样口温度 150℃,检测器温度 200℃。色谱柱的温度控制采用恒温的方式。

2 结果与讨论

2.1 盆栽植物体系净化甲苯气体

图2为甲苯入口浓度与盆栽植物净化速率的关系。随着甲苯浓度的增加,植物茎叶对甲苯的净化速率也随之增大。很多学者曾报道植物对甲醛的吸收速率与甲醛浓度正相关^[10-12]。在同一甲苯浓度下,吊兰和金绿萝盆栽在白天时对甲苯的净化速率明显高于在黑夜时的速率。这可能是植物白天进行光合作用,对甲苯的代谢增强的结果。

皮东恒研究发现盆栽吊兰对甲醛的耐受浓度为11.7 mg/m^3 ,盆栽金绿萝对甲醛的耐受浓度为6.8

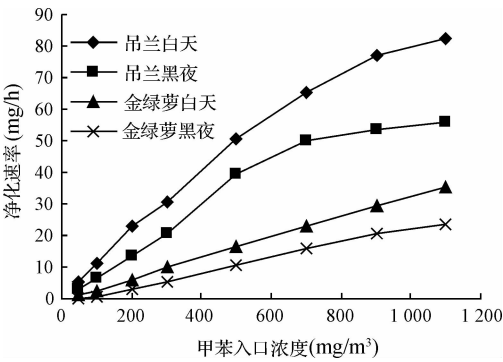


图 2 甲苯浓度对盆栽植物净化甲苯速率的影响

Fig.2 Effect of toluene concentration on purification rate by potted plants

mg/m^3 ^[13]。与 2 种植物的甲醛耐受浓度比较,在高浓度的甲苯环境 ($>1\ 100\ \text{mg}/\text{m}^3$) 中,2 种盆栽植物仍表现为较强的生命力和显著的净化能力。盆栽植物对两种污染物耐受的不同可能是由于植物对甲醛和甲苯的净化机理的差异造成的。

盆栽植物体系对气态污染物的净化主要依靠植物降解、植物转化、根际降解和植物挥发等途径^[14,15]。有学者报道植物叶际的分泌物也会增加对甲苯的降解^[16]。Ugrekheldize 等^[17]报道植物叶片对苯系物的同化是通过吸收和转化两步完成的。有研究证明植物叶子可以吸附亲酯性物质^[18]。植物茎叶吸收甲苯主要通过叶片的气孔,或者通过上表皮的角质层的渗透作用进入植物体内。甲苯进入植物体内后,在酶的作用下甲苯苯环被氧化打开^[17]。

2.2 植物茎叶净化甲苯气体

由图 3 可以看出,随着甲苯浓度的增加,植物茎叶净化曲线的斜率随之缓慢变小,即植物茎叶对污染物的解毒能力趋于最高。这说明当甲苯浓度约为 $1\ 100\ \text{mg}/\text{m}^3$ 时,植物茎叶的解毒能力最强。在同一甲苯浓度下,吊兰和金绿萝茎叶在白天时对甲苯的净化速率明显高于在黑夜时的速率。这可能是植物白天气孔张开,夜晚气孔关闭的结果。Cornejo 等^[19]也研究证明,植物去除气体污染物的效果与其叶片的气孔数量和尺寸有关。

当甲苯的入口浓度为 $0\sim1\ 200\ \text{mg}/\text{m}^3$ 时,吊兰茎叶在白天时的净化速率为 $1.94\sim214.05\ \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$,黑夜时的净化速率为 $0\sim118.86\ \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;金绿萝茎叶在白天时的净化速率为 $2.77\sim177.56\ \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$,黑夜时的净化速率为 $0\sim78.31$

$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。无论是在白天还是黑夜,同一污染浓度下,吊兰茎叶体系对甲苯的净化速率均明显高于金绿萝茎叶体系。

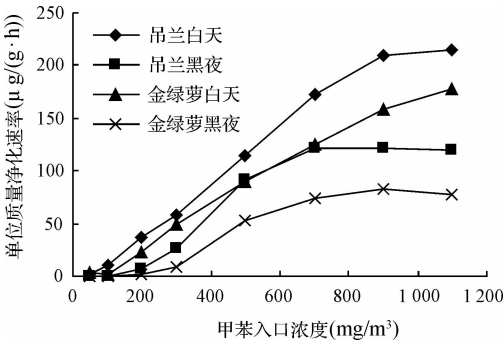


图 3 甲苯浓度对吊兰和金绿萝茎叶净化甲苯速率的影响

Fig.3 Effect of toluene concentration on purification rate by spider plant and golden pothos shoot

2.3 盆栽土壤净化甲苯气体

根据杨显万等提出的“吸附-生物膜”新型(双膜)理论,甲苯气体从气相本体扩散,通过气膜被吸附在润湿的土壤表面^[20]。吸附在土壤表面的甲苯被土壤中的微生物捕获、吸收。进入微生物体内的甲苯被微生物以碳源的形式吸收,最终转化无害无污染的物质进入气相本体。因此,扩散和吸收是甲苯转化的两个决定步骤,并以气膜扩散控制为主。

图 4 是吊兰和金绿萝土壤体系对甲苯的净化速率。实验结果表明,随着甲苯入口浓度的增加,两种植物的土壤体系对甲苯的净化速率也随之增大。在同一甲苯浓度下,吊兰和金绿萝土壤体系在白天时的净化速率优于黑夜时的速率。Xu 等^[11]研究发现,在同一浓度甲醛熏蒸下,吊兰土壤体系和金绿萝土壤体系白天对甲醛的吸收效率高

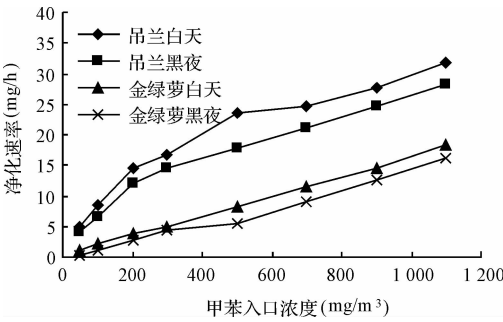


图 4 甲苯浓度对吊兰和金绿萝土壤体系净化甲苯速率的影响

Fig.4 Effect of toluene concentration on purification rate by spider plant and golden pothos soil system

于黑夜时的吸收效率。而土壤对有机污染物的净化主要依靠土壤中微生物的作用。这可能是光照促进了微生物的新陈代谢。

当甲苯的入口浓度为 0 ~ 1 200 mg/m³ 时,吊兰土壤体系在白天时的净化速率为 4.82 ~ 31.77 mg/h,黑夜时的净化速率为 4.08 ~ 28.09 mg/h;金绿萝土壤体系在白天时的净化速率为 0.97 ~ 18.35 mg/h,黑夜时的净化速率为 0.27 ~ 16.16 mg/h。无论是在白天还是黑夜,同一污染浓度下,吊兰土壤体系对甲苯的净化速率均高于金绿萝土壤体系。

2.4 甲苯入口浓度对盆栽植物体系降解率的影响

表 1 为吊兰和金绿萝土壤体系在白天时对甲苯的降解率。从表中可以看出随着甲苯浓度的增加,吊兰土壤体系的降解率(即土壤体系对甲苯的降解量占甲苯初始量的百分数)逐渐降低,由 48.24% 降低到 14.44%。而金绿萝土壤体系的降解率随着甲苯浓度的变化波动不大,约为 10% 左右。由此可见,虽然暴露于甲苯环境中的土壤面积(0.018 m²)不大,但是在甲苯的净化中起到了非常重要的作用。

表 1 吊兰和金绿萝盆栽体系和土壤体系在白天时对甲苯的降解率

Table 1 Degradation rate by spider plant and golden pothos shoot and soil system in daytime				
甲苯浓度 (mg/m ³)	吊 兰		金绿萝	
	土壤(%)	盆栽体系(%)	土壤(%)	盆栽体系(%)
50	48.24	52.82	9.72	12.34
100	42.59	55.23	11.62	12.12
200	36.08	57.94	9.60	15.03
300	27.87	50.76	8.40	16.22
500	23.59	50.78	8.18	16.72
700	17.71	46.78	8.13	16.57
900	15.31	42.86	8.11	16.45
1 100	14.44	37.43	8.34	15.98

表 2 为吊兰和金绿萝土壤体系在黑夜时的降解率。从表中可以看出随着甲苯浓度的增加,吊兰土壤体系的降解率也在逐渐降低,由 40.82% 降低到 12.77%。而金绿萝土壤体系的降解率随着甲苯浓度的变化波动不大,约为 6.5% 左右。

无论是白天还是黑夜,吊兰盆栽体系的甲苯降解率总高于金绿萝盆栽体系的降解率。在低浓度的甲苯污染物下,吊兰土壤对甲苯表现为较高的降解率;金绿萝土壤的降解率受甲苯入口浓度的影响不大。

表 2 吊兰和金绿萝盆栽体系和土壤体系在黑夜时对甲苯的降解率

Table 2 Degradation rate by spider plant and golden pothos shoot and soil system in nighttime				
甲苯浓度 (mg/m ³)	吊 兰		金绿萝	
	土壤(%)	盆栽体系(%)	土壤(%)	盆栽体系(%)
50	40.82	40.82	2.69	2.69
100	32.23	32.70	5.48	5.48
200	30.33	34.22	6.88	7.50
300	24.35	34.72	7.35	8.86
500	17.72	39.15	5.55	10.51
700	14.99	35.63	6.50	11.53
900	13.63	29.60	7.03	11.39
1 100	12.77	25.54	7.35	10.72

3 结 论

吊兰盆栽和金绿萝盆栽体系对甲苯具有长期有效的净化作用。盆栽体系在白天对甲苯的净化速率明显高于黑夜时的净化速率。随着甲苯浓度的升高,吊兰和金绿萝盆栽体系对甲苯的净化速率也随之升高。在同一甲苯入口浓度下,2 种植物的净化速率比较:吊兰盆栽 > 金绿萝盆栽。

在实验过程中,吊兰土壤体系的降解率随着甲苯浓度的升高逐渐下降;金绿萝土壤体系的降解率基本不受甲苯入口浓度的影响。吊兰盆栽体系的降解率明显大于金绿萝的降解率。2 种植物盆栽体系的降解率随甲苯进口浓度的影响可以忽略。

参 考 文 献

[1] 周 亘,蒋永荣,蒋东云,等. 植物对甲苯的降解. 绝缘材料,2010,43(3):64-68
Zhou Dan, Jiang Yongrong, Jiang Dongyun, et al. Degradation of toluene under the action of plant. Insulating Materials, 2010,43(3):64-68(in Chinese)

[2] 兰丽娟,李晓强,张宏,等. 植物对室内空气中甲苯的净化能力研究. 安徽农业科学,2011,39(9):5191-5192
Lan Lijuan, Li Xiaoqiang, Zhang Hong, et al. Study on the ability of plants purifyinl-indoor methylbenzene. Journal of Anhui Agri. Sci., 2011,39(9):5191-5192(in Chinese)

[3] 依成武,刘洋,马丽,等. 有机废气的危害及治理技术. 安徽农业科学,2011,37(1):351-352
Yi Chengwu, Liu Yang, Ma Li, et al. Harmfulness and treatment technology of organic waste gas processing. Journal of Anhui Agri. Sci., 2011,37(1):351-352(in Chinese)

- [4] 周建斌,邓丛静,傅金和,等. 竹炭负载纳米 TiO_2 吸附与降解甲苯的研究. 新型碳材料, **2009**, 24(2):131-135
Zhou Jianbi, Deng Congjing, Fu Jinhe, et al. Absorption and degradation of toluene over TiO_2 supported on bamboo charcoal. New Carbon Materials, **2009**, 24(2):131-135 (in Chinese)
- [5] 曹慧云,黄立维,张晓,等. 电化学反应器去除甲苯废气实验研究. 浙江工业大学学报, **2008**, 36(1):26-29
Cao Huiyun, Huang Liwei, Zhang Xiao, et al. Experimental study on the removal of toluene by an electrochemical reactor. Journal of Zhejiang University of Technology, **2008**, 36(1):26-29 (in Chinese)
- [6] 赵圣伟,黄学敏,曹晓强,等. $\text{CuMnO}_x/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 对含甲苯废气催化燃烧的性能研究. 环境工程, **2008**, 26(5):13-15
Zhao Shengwei, Huang Xuemin, Cao Xiaoqing, et al. Performance study on catalytic combustion of containing toluene with $\text{CuMnO}_x/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Environmental Engineering, **2008**, 26(5):13-15 (in Chinese)
- [7] 竹涛,何绪文,徐东耀,等. 吸附增效低温等离子体法去除甲苯废气的研究. 环境污染与防治, **2010**, 32(2):37-40
Zhu Tao, He Xuwen, Xu Dongyao, et al. Decomposition of toluene by adsorption enhanced non-thermal plasma. Environmental Pollution & Control, **2010**, 32(2):37-40 (in Chinese)
- [8] 王丽萍,吴先前,何士龙,等. 高效生物滴滤系统净化甲苯废气快速启动研究. 哈尔滨工业大学学报, **2004**, 36(4):446-449
Wang Liping, Wu Xianqian, He Shilong, et al. Rapid start-up processes of a high performance biotrickling filter. Journal of Harbin Institute of Technology, **2004**, 36(4):446-449 (in Chinese)
- [9] 李娟,穆肃,丁曦宁. 绿色植物对室内空气中甲醛、苯、甲苯净化效果研究. 科技资讯, **2009**, (28):119-120
Li Juan, Mu Su, Ding Xining. Study on purification of formaldehyde, benzene and toluene from indoor air by green plants. Science & Technology Information, **2009**, (28):119-120 (in Chinese)
- [10] 皮东恒,徐仲均,王京刚,等. 盆栽吊兰净化空气中的甲醛研究. 环境工程学报, **2011**, 5(2):383-386
Pi Dongheng, Xu Zhongjun, Wang Jinggang, et al. Study on formaldehyde purification from air by potted spider plant. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2011**, 5(2):383-386 (in Chinese)
- [11] Xu Zhongjun, Wang Li, Hou Haiping, et al. Formaldehyde removal by potted plant-soil systems. Journal of Hazardous Materials, **2011**, 192(1):314-318
- [12] Kondo T., Hasegawa K., Uchida R., et al. Absorption of formaldehyde by oleander (*Nerium indicum*). Environmental Science and Technology, **1995**, 29(11):2901-2903
- [13] 皮东恒. 盆栽植物净化室内空气中甲醛机理研究. 北京:北京化工大学硕士学位论文, **2010**
Pi Dongheng. Study on mechanism of formaldehyde purification from indoor air by potted plants. Beijing: Master's Degree Thesis of Beijing University of Chemical Technology, **2010** (in Chinese)
- [14] 邢新会. 环境生物技术理论和应用. 北京:化学工业出版社, **2005**
- [15] 吴启堂,陈同斌. 环境生物修复技术. 北京:化学工业出版社, **2006**
- [16] De Kempeneer L., Sercu B., Vanbrabant W., et al. Bioaugmentation of the phyllosphere for the removal of toluene from indoor air. Applied Microbiology and Biotechnology, **2003**, 64(2):284-288
- [17] Ugrehelidze D., Korte F., Kvesitadze G. Uptake and transformation of benzene and toluene by plant leaves. Ecotoxicology and Environmental Safety, **1997**, 37(1):24-29
- [18] 刘强,陈荣,邓瑜衡. 植物去除空气污染物的机理研究进展. 安全与环境工程, **2007**, 14(1):24-27
Liu Qiang, Chen Rong, Deng Yuheng. Mechanism research progress on the decontamination of air pollution by plants. Safety and Environmental Engineering, **2007**, 14(1):24-27 (in Chinese)
- [19] Cornejo J., Munoz F., Ma C., et al. Studies on the decontamination of air by plants. Ecotoxicology, **1999**, 8(4):311-320
- [20] 杨显万,孙珮石,黄若华,等. 生物法净化低浓度挥发性有机废气研究. 中国工程科学, **2011**, 3(9):64-68
Yang Xianwan, Sun Peishi, Huang Ruohua, et al. Research on purifying waste gases containing volatile organic compounds in low concentration by using biochemical method. Engineering Science, **2011**, 3(9):64-68 (in Chinese)