ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵

双奖期刊

中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第39卷 第2期
2018年2月15日

目 次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(Ⅲ)
序 …… 郝郑平(477)
我国机动车排放VOCs及其大气环境影响 …… 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于PMF量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 …… 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 …… 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种 …… 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)
某石油化工园区秋季VOCs污染特征及来源解析 …… 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石油化工园区冬季大气中VOCs污染特征 …… 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 …… 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 …… 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 …… 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析 …… 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放VOCs污染特征与风险评价 …… 高占啟,胡冠九,王荟,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境VOCs污染特征及其健康风险评价 …… 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海地区住宅儿童卧室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 …… 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 …… 夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单 …… 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲2014年天然源BVOCs排放、组成及时空分布 …… 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单 …… 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及VOCs成分谱 …… 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 …… 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合CVOCs的降解 …… 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 …… 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 …… 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价 …… 佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中VOCs的来源分析及环境健康风险评价 …… 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告
北京市$PM_{2.5}$时空分布特征及其与PM_{10}关系的时空变异特征 …… 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面CH_4冒泡通量的观测 …… 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 …… 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析 …… 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征 …… 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 …… 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 …… 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 …… 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 …… 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周橄(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 …… 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 …… 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 …… 渠晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 …… 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 …… 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 …… 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(Ⅱ)的去除性能 …… 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状HZO@SGH对水中氟离子的吸附作用和机制 …… 马福臻,周少奇,刘泽珺,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧化降解有机物的作用机制 …… 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝聚有机物的臭氧化特性 …… 侯瑞,金鑫,金鹏康,荀邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 …… 孟晓荣,王璁桧,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 …… 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 …… 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 …… 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的SBR中微生物种群与污泥比阻 …… 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 …… 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 …… 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 …… 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 …… 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 …… 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 …… 迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积阻控 …… 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 …… 严骁,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)
《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799,908,934)

上海地区住宅儿童卧室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析

蒋巧云, 刘平平, 王雪颖, 路荣春, 刘炜, 周华元, 龚莹莹, 周亚欣, 黄晨*

(上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 2013 年 3 月 ~2014 年 12 月对上海地区 454 户装修时间超过 1 a 的住宅内的儿童卧室室内甲醛和苯系物进行了现场监测. 不同儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度存在较大差异. 冬季卧室室内甲醛浓度明显高于其他季节 ($P<0.001$), 但苯系物浓度无明显的季节差异. 春季使用不同内墙墙面装饰材料的卧室苯系物浓度均值存在明显差异; 夏季使用不同地板装饰材料的卧室苯系物浓度均值也存在显著差异($P<0.01$). 秋季室内盆景数量为 >5 个的卧室甲醛浓度均值明显高于其他卧室. 冬季经常使用加湿器和家中饲养宠物的儿童卧室室内苯系物浓度均值显著高于其他儿童卧室($P<0.05$). 结果表明, 装修较长时间后, 装修材料的类型仍然与室内苯系物浓度存在一定的关系; 但相对于装修材料, 室内通风可能对室内甲醛浓度影响更大. 室内苯系物浓度可能与室内湿度和室内宠物的饲养有关. 家用空气净化器可能可以有效降低室内甲醛的暴露水平. 植物盆栽净化装修时间较长的住宅室内甲醛和苯系物的效果可能有限.

关键词: 上海地区; 儿童卧室; 挥发性有机物; 装修材料; 生活习性

中图分类号: X831 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)02-0585-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201703144

Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors

JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, LU Rong-chun, LIU Wei, ZHOU Hua-yuan, GONG Ying-ying, ZHOU Ya-xin, HUANG Chen*

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: From March 2013 to December 2014, we on-site inspected indoor concentrations of formaldehyde and a benzene series in 454 children's bedrooms that were decorated earlier than one year before our inspection. Large differences existed in the formaldehyde and benzene-series concentrations among individual bedrooms. Bedrooms that were inspected in winter had significantly higher concentration of formaldehyde than bedrooms that were inspected in other seasons ($P<0.001$), but the benzene-series concentration had no significant seasonal difference. Among bedrooms that were inspected in spring, those using different materials as wall coverings had significant differences in concentrations of the benzene series. Among bedrooms that were inspected in summer, those using different materials as floor coverings had significant differences in concentrations of the benzene series ($P<0.01$). Among bedrooms that were inspected in autumn, those with >5 household bonsais had significantly higher concentrations of formaldehyde than other bedrooms did. Among bedrooms that were inspected in winter, those with frequent use of air humidifiers and those in which pets were kept had significantly higher concentrations of the benzene series than other bedrooms did ($P<0.05$). These results indicate that, after a long time since decoration, the types of household wall and floor covering materials still have certain relationships with indoor benzene-series levels and, compared to decoration materials, household ventilation perhaps has greater effect on indoor formaldehyde levels. The indoor benzene-series level perhaps has associations with indoor humidity level and the keeping of pets in households. Household bonsaies may have limited effect on indoor formaldehyde and benzene-series levels in residences that were decorated a long time ago.

Key words: Shanghai; child's bedroom; volatile organic compounds (VOCs); decoration materials; lifestyle behaviors

随着近年经济水平的不断提高和建筑工业的快速发展, 住宅建筑采用的材料和日常用品的种类已发生巨大改变; 1990 ~2010 年的中国城市化面积、复合木地板和城市空调设备的销售量等均呈现指数上升趋势[1]. 同时住宅气密性不断提高也导致室内通风存在不足的现象[2]. 这些变化已经显著改变了住宅室内人员的化学成分暴露种类和浓度[3]. 较多的研究发现新型建筑装修材料和家具可散发较高浓度的多种有机性挥发物(甲醛和苯系物等)[4~6]. 而室内甲醛和苯系物等有机性挥发物的高浓度暴露与儿童哮喘等呼吸道或过敏性疾病存在关联[7~10]. 因

收稿日期: 2017-03-16; **修订日期**: 2017-04-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(51278302); 上海市教委项目(14ZZ132); 大学生创新创业训练计划项目
作者简介: 蒋巧云(1994 ~), 女, 主要研究方向为室内空气品质, E-mail: dieyu520@outlook.com
* 通信作者, E-mail: hcyhyywj@163.com

此，为改善住宅室内空气品质和降低儿童相关疾病的患病风险，有必要探明普通住宅室内有机性挥发物的暴露水平现状. 本文基于对上海市学龄儿童的住宅进行的现场检测，探究了上海地区普通住宅的儿童卧室室内甲醛和苯系物暴露水平现状及其与住宅建筑特性和居民生活习性的关系.

1 材料与方法

1.1 住宅选择和取样方法

基于前期在上海地区针对学龄前儿童开展大样本量问卷调查(中国室内环境与儿童健康研究第一阶段)获得的信息，笔者在 2013 年 3 月 ~2014 年 12 月对上海市 4 个市区行政区(杨浦区、虹口区、闸北区和静安区)和 2 个郊区行政区(宝山区和奉贤区)的 454 名 5 ~10 岁儿童的住宅室内环境进行了现场检测和调查. 这些住宅在现场监测前 1 a 内均未进行装修. 更多相关研究的信息和这些住宅的具体选择方法可参见文献[10]. 在现场检测过程中，本研究采用日本 SHINYEI 公司开发的多模式甲醛监测仪(formaldehyde multimode monitor；检测浓度范围:12 ~800 $\mu g \cdot m^{-3}$；分辨率:1 $\mu g \cdot m^{-3}$)对儿童卧室的室内甲醛浓度进行了连续 24 h(取样间隔为 30 min)的监测[11]；同时采用德国 AQUARIA 公司开发的 RING 被动吸附采样管收集了儿童卧室连续 7 d 的室内空气样本. 每户住宅现场检测和取样 1 次. 为获得儿童的真实暴露水平，现场检测和取样期间均要求家庭成员保持通常的起居和生活习惯. 儿童卧室的采样完成后，将采样管密封保存在 -40℃的冰箱，以备后续对儿童卧室室内苯系物等进行分析；甲醛监测点和空气样本采样点均布置在儿童卧室中部且离地 1 m 左右处. 在现场调查期间，通过家长问卷报告和调查员问卷报告的方法也获取了住宅建筑特性(建设年代、房间面积、楼层、地板材料和墙面材料等)和相关的居民生活习性(清洁习惯和通风习惯)等信息. 本研究得到了复旦大学公共卫生学院伦理委员会的批准.

1.2 样品检测方法

首先对样品进行前处理:将采样管从冰箱取出，迅速放入带帽的玻璃套管内. 待采样管温度恢复到室温，分两次进行超声萃取，第一次萃取加入 3 mL 二硫化碳(CS_2)，盖紧管帽，利用超声振荡清洗仪超声 20 min，强度 53 Hz. 超声完成后，将溶剂取出，重新加入 2 mL CS_2，再次进行超声. 将两次超声后的溶剂放在一起，并利用氮吹仪将萃取液浓缩至 0.5 mL.

然后利用气相色谱-质谱联用仪(GC/MS)对上述浓缩好的样品中的苯系物进行分析. 气相色谱仪型号是 Trace 1310，质谱仪型号是 ISQ，仪器均由美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产. 气相色谱条件:色谱柱为 DB5-MS 的柱子. 进样量为 1 μL，进样口温度为 260℃，辅助加热温度为 280℃. 柱温箱温度采用程序升温，初始温度 50℃，然后以 8 $℃ \cdot min^{-1}$的速度升到 180℃，再以 15 $℃ \cdot min^{-1}$的速度升温到 280℃. 载气为氦气，流速是 1 $mL \cdot min^{-1}$. 质谱条件:采用全扫描模式，扫描范围为 20 ~500，溶剂延迟时间为 3 min. 离子源温度为 250℃，四级杆温度为 280℃. 最后利用 2008 版的 NIST 数据库对谱图中出现的苯系物进行定性和定量分析[12].

对于采样柱中的苯系物浓度，采用以下公式进行计算:

$$Q_i = R_f \frac{Q_{is} A_i}{A_{is}} \tag{1}$$

式中，A_{is}内标峰值面积(m^2)；Q_{is}是测试中添加到样本溶液中的内标质量(μg)；A_i 是目标分析物 i 在校准样中的面积(m^2)；Q_i 是测试中样本中的目标分析物 i 的质量(μg)；R_f 是分析的目标物相对于内标的质量系数. 其中质量系数 R_f 采用下式进行计算:

$$R_f = \frac{Q_{is}/A_{is}}{Q_i/A_i} \tag{2}$$

在样本定量分析前，准备了与内标具有相同稀释比例的目标物质的校准溶液. 采用这些校准溶液制备一系列添加到空白采样器中具有不同浓度水平的对照样本:①在不同的玻璃罐中准备具有不同数量(10、30、50、100、200 mL)的校准溶液；②在每个玻璃罐中添加不同数量的内标溶液(从最小量开始添加，后续在同一样本中不断增加内标溶液)；③ 在每个玻璃罐中添加 2 ~3 mL 的溶剂. 各类试剂添加完成后，等待溶剂、目标分析物和内标物之间达到热力学平衡. 然后进行分析获得目标分析物的校准曲线，确定相对于内标的质量系数 R_f.

对于室内空气中的苯系物浓度，采用以下公式进行计算:

$$c_i = \frac{10^6 Q_i}{t \Phi_i} \tag{3}$$

式中，Q_i 是测试样本中的目标分析物 i 的质量(μg)；Φ_i 是扩散吸收率($mL \cdot min^{-1}$)；t 为采样柱在空气中的暴露时间(min)；c_i 是住宅室内空气中 i

物质的浓度($\mu g \cdot m^{-3}$).

1.3 统计分析方法

采用独立样本 t 检验(二分类变量)或单因素方差分析(ANOVA)(多分类变量)对目标因素(建筑特性和居民生活习性)的不同选项下的均值差异在统计学上的显著性进行检验. 一般来说，$P < 0.05$ 显示差异有统计学意义. 但因样本量较少，按 $P < 0.05$ 的规定难于有统计学意义的结果，本文也对 $P < 0.1$ 的比较结果进行了标记. 所有的统计分析均采用软件 SPSS 17.0 来实现.

2 结果与讨论

454 户住宅中共 409 户住宅(90.1%)的儿童卧室存在有效的甲醛浓度数值. 甲醛浓度均值为 21.5 $\mu g \cdot m^{-3}$；最大值为 110.7 $\mu g \cdot m^{-3}$；绝大部分的卧室甲醛浓度均低于 60 $\mu g \cdot m^{-3}$；室内甲醛浓度均值 >100 $\mu g \cdot m^{-3}$的卧室仅有 2 户，占 0.7%. 不同儿童的卧室甲醛浓度存在较大差异. 卧室甲醛浓度存在显著的季节差异($P < 0.001$)：冬季检测的卧室甲醛的检出率和浓度均值明显高于其他季节(表 1).

表 1 儿童卧室室内甲醛浓度的总体分布状况/$\mu g \cdot m^{-3}$

Table 1 Overall concentrations of formaldehyde in children's bedrooms/$\mu g \cdot m^{-3}$

项目	n (检出率/%)	均值 ± 标准差	最小值	百分位数			最大值
				25%	50%	75%	
总体	409 (90.1)	21.5 ± 13.0	6.8	12.3	19.6	27.5	110.7
春季	118 (90.8)	20.4 ± 10.3	9.2	12.3	17.6	27.1	73.2
夏季	110 (86.6)	19.7 ± 17.9	6.8	9.7	11.6	22.1	110.7
秋季	92 (88.5)	19.2 ± 12.6	6.8	11.5	18.3	23.2	109.7
冬季	89 (95.7)	27.7 ± 5.8 1)	12.8	25.8	27.5	28.2	53.0

1) $P < 0.001$

对于苯系物，358(78.9%)户住宅的儿童卧室存在有效的苯系物浓度数值. 这些儿童卧室共检测出 14 种苯系物. 检出率最高的为对二甲苯，为 91.6%；检出率最低的为丙苯，仅在 1 (0.3%)户卧室内检测出. 浓度最大值为 1,4-二氯苯 (757.4 $\mu g \cdot m^{-3}$)，其次为甲苯 (186.9 $\mu g \cdot m^{-3}$). 因大部分的苯系物检出率较低，后续分析中将这些苯系物累加作为总体进行分析. 苯系物总和浓度均值为 33.9 $\mu g \cdot m^{-3}$；绝大部分的卧室苯系物浓度均低于 200 $\mu g \cdot m^{-3}$. 检测的卧室苯系物浓度存在较大差异 (标准差为 72.1 $\mu g \cdot m^{-3}$). 卧室苯系物浓度的季节差异不显著 ($P = 0.621$)；冬季检出率和浓度高于其他季节(表 2).

表3展示了建筑特性与室内甲醛和苯系物的关系分析结果. 总体上，处在住宅楼低层的卧室甲醛浓度均值高于其他楼层的卧室；1995 年前建设的住宅的卧室甲醛浓度均值高于其他卧室. 对于秋季检测的住宅，房间面积不同的卧室甲醛浓度均值存在明显差异：房间面积 >20 m^2 的卧室甲醛浓度均值高于其他卧室. 对于冬季检测的住宅，处在住宅楼低层的卧室甲醛浓度均值高于其他楼层的卧室；1996 ~ 2005 年建设的卧室甲醛浓度均值高于其他年份建设的住宅. 总体上和不同季节检测的住宅中，不同建筑特性下的卧室苯系物浓度均值均无显著差异.

表 2 儿童卧室室内苯系物总和浓度的季节差异对比/$\mu g \cdot m^{-3}$

Table 2 Overall concentrations of $\sum$ (benzene-series) in children's bedrooms/$\mu g \cdot m^{-3}$

项目	n (检出率/%)	均值 ± 标准差	最小值	百分位数			最大值
				25%	50%	75%	
总体	358 (78.9)	33.9 ± 72.1	< LOD 1)	8.3	14.7	30.4	770.1
春季	88 (67.7)	29.2 ± 48.8	2.0	7.5	13.8	30.1	335.4
夏季	91 (71.7)	35.4 ± 81.6	0.8	5.0	11.6	26.2	595.9
秋季	88 (84.6)	30.6 ± 54.2	2.8	10.4	15.9	31.1	451.3
冬季	86 (92.5)	42.4 ± 95.8	0.2	8.8	20.6	33.0	770.1

1) LOD：limit of detection，检出限

表 4 展示了儿童卧室室内装修材料与室内甲醛和苯系物的关系分析结果. 对于春季检测的住宅，使用不同内墙墙面装饰材料的卧室苯系物浓度均值存在明显差异($P < 0.05$)：使用石灰做内墙墙面装饰材料的卧室苯系物浓度均值明显高于使用其他材料的卧室；但使用石灰做内墙墙面装饰材料的卧室样本量只有 1 户，其浓度均值明显高于使用其他材料的卧室的结果很可能存在偶然性. 对于夏季检测

的住宅，使用不同地板装饰材料的卧室苯系物浓度均值也存在显著差异($P<0.01$)：使用瓷砖做地板装饰材料的卧室苯系物浓度均值明显高于使用其他材料的卧室；但使用瓷砖做地板装饰材料的卧室样本量只有2户，其浓度均值明显高于使用其他材料的卧室的结果也可能存在偶然性. 总体上和不同季节检测的住宅中，使用不同室内装修材料的卧室甲醛浓度均值无显著差异.

表3 住宅建筑特性与室内甲醛和苯系物浓度的关系[1)]

Table 3 Associations of indoor formaldehyde or the benzene series with building characteristics

项目	甲醛						苯系物					
	总体		均值/μg·m⁻³				总体		均值/μg·m⁻³			
	n(检出率/%)	均值±标准差	春	夏	秋	冬	n(检出率/%)	均值±标准差	春	夏	秋	冬
住宅类型												
低层公寓住宅	192 (48.6)	21.9±14.4	19.7	19.6	18.8	28.0	171 (50.1)	39.6±94.1	17.2	41.9	29.4	52.1
高层公寓住宅	203 (51.4)	21.0±11.6	20.3	19.2	19.3	27.2	170 (49.9)	29.6±44.3	32.0	24.4	32.2	26.1
住宅总层数												
1~5层	179 (47.9)	22.6±14.8	19.6	21.2	18.6	28.1	160 (49.5)	41.2±96.5	21.8	43.1	30.4	51.2
≥6层	195 (52.1)	20.5±11.6	19.7	18.6	19.9	26.7	163 (50.5)	29.2±44.9	33.0	22.0	29.5	27.3
房间所在楼层												
底层	54 (13.6)	24.8±18.1	14.0	23.6	22.5	30.4	49 (14.4)	40.7±76.5	103.1	41.6	27.9	46.9
2~5层	161 (40.8)	19.8±11.3	19.5	15.8	16.5	27.1	146 (43.0)	36.3±91.5	14.6	34.1	36.0	51.2
≥6层	122 (30.9)	22.2±13.3	21.2	23.2	22.1	25.8	98 (28.8)	31.6±52.5	34.8	29.4	31.8	21.1
顶层	58 (14.7)	21.8±11.1#	18.2	22.2	18.3	28.7#	47 (13.8)	27.4±37.1	28.8	37.1	18.2	29.0
住宅建设年代												
1995年之前	67 (18.8)	23.8±15.3	19.4	26.8	22.5	25.2	58 (19.1)	38.8±73.2	49.8	17.3	57.6	43.9
1996~2000年	82 (23.0)	20.3±10.6	20.5	15.9	18.8	29.4	73 (23.9)	38.7±68.3	41.6	53.5	18.3	29.1
2001~2005年	131 (36.8)	23.1±16.1	21.9	21.0	21.1	29.9	108 (35.4)	23.1±33.1	14.5	25.2	29.6	24.9
2006年之后	76 (21.4)	17.8±8.1*	17.7	15.4	16.9	25.9#	66 (21.6)	41.9±84.1	27.3	69.8	29.4	57.7
房间面积/m^2												
4~10	62 (15.4)	21.3±16.0	20.0	16.8	23.7	27.6	54 (15.5)	27.9±50.6	43.2	25.7	20.1	22.0
11~15	225 (56.0)	21.7±13.4	21.7	20.5	16.4	28.4	189 (54.3)	39.9±90.9	24.8	47.1	32.2	52.9
16~20	98 (24.4)	20.9±10.1	19.2	17.4	21.1	26.2	88 (25.3)	24.7±32.6	25.9	14.2	27.3	31.0
>20	17 (4.2)	22.3±11.9	16.0	26.8	26.7#	21.6	17 (4.9)	43.1±54.4	44.1	33.3	60.8	20.5
房间体积/m^3												
<28	90 (22.1)	21.1±14.3	19.9	18.1	20.7	28.9	78 (22.1)	32.0±56.1	36.6	26.6	26.1	43.1
28~34	102 (25.0)	19.9±9.6	19.5	15.9	15.0	27.0	88 (24.9)	43.1±115.0	14.2	58.2	42.5	53.2
35~40	116 (28.4)	23.3±15.6	23.5	23.6	18.5	28.5	94 (26.6)	34.0±57.8	30.4	44.8	24.0	35.8
>40	100 (24.5)	21.4±11.3	18.5	19.7	22.1	27.0	93 (26.4)	28.4±38.6	33.9	16.6	32.7	33.1

1) # 表示 $0.05 \leq P < 0.1$；* 表示 $0.01 \leq P < 0.05$

表4 儿童卧室室内装修材料与室内甲醛和苯系物浓度的关系[1)]

Table 4 Associations of indoor formaldehyde or the benzene series with decoration materials

项目	甲醛						苯系物					
	总体		均值/μg·m⁻³				总体		均值/μg·m⁻³			
	n(检出率/%)	均值±标准差	春	夏	秋	冬	n(检出率/%)	均值±标准差	春	夏	秋	冬
内墙墙面装饰材料												
壁纸	32 (8.1)	22.0±15.5	21.9	17.7	23.0	43.7	24 (7.1)	41.7±50.6	27.4	67.6	68.6	3.6
乳胶漆	318 (80.7)	21.5±13.3	19.7	20.2	18.6	27.6	280 (82.3)	33.5±75.9	27.6	33.6	27.0	45.0
油漆	15 (3.8)	20.1±7.1	15.3	12.4	18.1	26.4	14 (4.1)	26.4±24.1	7.2	12.8	30.6	36.6
石灰	22 (5.6)	21.4±10.1	23.4	19.5	22.0	27.5	16 (4.7)	33.9±53.3	186.8	14.1	37.1	17.2
其他	7 (1.8)	21.8±11.2	22.5	21.2	NA	NA	6 (1.8)	77.9±152.2	9.8*	111.9	NA	NA
地板装饰材料												
实木	281 (71.3)	21.2±13.0	19.0	19.9	19.6	27.6	250 (73.5)	32.1±70.3	28.1	22.1	33.7	45.6
复合木	66 (16.8)	21.8±9.8	24.1	12.7	17.9	28.0	47 (13.8)	46.2±96.5	37.6	71.2	26.6	45.7
瓷砖	13 (3.3)	18.7±8.2	19.6	12.1	12.6	27.4	13 (3.8)	52.6±102.7	10.9	204.0	19.7	34.9
其他	34 (8.6)	24.3±19.7	19.2	28.2	19.3	27.0	30 (8.9)	31.1±40.6	20.7	52.4**	20.2	20.8

1) NA: no available, 无有效样本；* 表示 $0.01 \leq P < 0.05$；** 表示 $0.001 \leq P < 0.01$，下同

表 5 展示了居民生活习性与儿童卧室室内甲醛和苯系物的关系分析结果. 总体上，居民生活习性不同的卧室甲醛浓度均无显著差异；但冬季经常使用加湿器和家中饲养宠物的儿童卧室室内苯系物浓度均值显著高于其他儿童卧室. 对于春季检测的住宅，未经常使用空气净化器的卧室甲醛浓度均值显著高于其他卧室；室内盆景数量不同的卧室甲醛浓度均值存在差异（$P < 0.1$）：室内盆景数量为 1 ~5 个的卧室室内甲醛浓度均值高于其他卧室. 对于秋季检测的住宅，室内盆景数量不同的卧室甲醛浓度均值显著不同（$P < 0.05$），室内盆景数量为 >5 个的卧室甲醛浓度均值明显高于其他卧室；家中经常使用加湿器的卧室苯系物浓度均值显著高于其他卧室. 对于冬季检测的住宅，家中饲养宠物的卧室苯系物浓度均值明显高于家中未饲养宠物的卧室.

表 5　居民生活习性与儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的关系[1)]

Table 5　Associations of indoor formaldehyde or the benzene series with lifestyle behaviors

项目	甲醛						苯系物					
	总体		均值/μg·m⁻³				总体		均值/μg·m⁻³			
	n(检出率/%)	均值 ± 标准差	春	夏	秋	冬	n(检出率/%)	均值 ± 标准差	春	夏	秋	冬
家中是否经常使用空气净化器												
否	301 (79.0)	21.7 ±14.0	20.6	20.3	19.2	27.7	267 (77.8)	31.5 ±59.3	30.0	32.7	27.8	35.3
是	80 (21.0)	19.6 ±9.4	16.9*	16.2	20.4	27.2	76 (22.2)	43.3 ±106.6	29.0	53.0	47.8	62.5
家中是否经常使用加湿器												
否	252 (70.6)	21.8 ±13.6	19.8	20.2	20.0	27.6	229 (70.9)	30.1 ±56.0	28.3	35.4	20.6	36.2
是	105 (29.4)	20.2 ±12.9	18.4	19.9	17.7	28.1	94 (29.1)	45.3 ±106.0#	28.6	44.1	60.0**	62.0
家中是否饲养宠物												
否	335 (85.5)	21.7 ±12.7	21.0	20.7	18.4	27.6	294 (86.2)	31.1 ±60.8	27.8	36.0	28.4	31.9
是	57 (14.5)	20.2 ±15.7	16.9	14.9	26.4	27.6	47 (13.8)	50.9 ±122.0#	38.8	33.0	41.2	110.2*
室内盆栽数量(个)												
0	175 (46.5)	21.0 ±12.3	19.8	19.1	17.8	27.3	152 (46.3)	36.9 ±81.2	24.2	32.8	27.7	63.4
1 ~5	115 (30.6)	20.9 ±12.6	22.1	18.8	17.6	27.7	100 (30.5)	35.5 ±79.4	30.9	36.8	40.8	27.5
>5	86 (22.9)	22.6 ±14.3	16.3#	22.9	26.2*	27.4	76 (23.2)	28.7 ±49.2	41.6	39.1	17.3	18.5

1) #表示 $0.05 \leq P < 0.1$

由于本研究检测的住宅在检测前 1 a 内均未进行过装修，检测的儿童卧室室内甲醛（21.5 μg·m^{-3}）和苯系物（33.9 μg·m^{-3}）浓度均值均低于其他研究中对 1 a 内装修或半年内装修过的住宅进行检测获得的结果[6]. 比如，王春等[13]在 2003 年 3 ~9 月对上海市徐汇区的 23 户新装修（装修时间为 2 个月内）住宅的室内甲醛浓度进行了连续监测发现：住宅客厅、主卧和储藏室的甲醛浓度均值分别为 54.0、108.0 和 388.0 μg·m^{-3}；装修 3 个月后室内甲醛浓度明显下降，但由于不合格板材的应用，室内甲醛污染仍比较严重和普遍[13]. 此外，许多研究[6, 14~17]发现绝大部分住宅在装修 1 a 后的室内甲醛和苯系物浓度均可满足国家室内空气质量标准（甲醛：100 μg·m^{-3}，甲苯：200 μg·m^{-3}）[18]. 比如 2012 年刘晓途等全面总结了 1990 年以来有关我国城市住宅室内空气品质的研究资料发现：城市住宅室内的主要空气污染物为甲醛、甲苯和二甲苯等装修型污染；其中甲醛是首要空气污染物，新装修住宅室内各种污染物均呈现较高的浓度水平；除甲醛外，其他挥发性有机物随着竣工时间的推移而快速下降[6]. 这与本研究的结果基本一致.

本研究发现冬季卧室甲醛的检出率和浓度均值明显高于其他季节，可能与冬季儿童卧室通风量普遍不足有关[2]，也可能与冬季室外挥发性有机物浓度比其他季节高有关[19~26]. 尽管卧室通风量较差，室外高浓度的挥发性有机物还有可能通过卧室窗户缝隙处渗透进入室内，且上海地区的住宅在冬季一般都会采用空调等采暖设备保持室内较高的温度. 部分先前的研究表明住宅室内甲醛浓度的差异和分布特征与城市的气候和地理位置有关[6]. 在长沙[23]和太原[27]开展的研究发现住宅室内的甲醛浓度和检出率均高于夏季. 但徐东群等研究发现：不同城市甲醛浓度季节变化特征不同；主要取决于室内温度和通风状况[15]. 而本研究发现的儿童卧室室内苯系物浓度不存在明显的季节差异与先前的研究结果类似[6].

本研究也发现儿童卧室室内甲醛浓度与部分建筑特性（楼层、建设年代和面积）有关，但与地板和墙面装修材料无关. 总体上，处于住宅楼底层和建于 1995 年前的儿童卧室室内甲醛浓度更高. 推测住

宅楼底层的儿童卧室室内甲醛浓度更高可能与底层室内通风较差有关；而建于 1995 年前(建筑年龄约为 20 a)的儿童卧室更高可能与这些卧室或所在住宅在近年内进行过重新装修有关[6,15].而本研究发现儿童卧室室内苯系物浓度与建筑特性(楼层、建设年代和面积等)无关，但与地板和墙面装修材料有关.除去样本量仅为 1 户或 2 户的使用石灰和瓷砖做装修材料的儿童卧室，室内苯系物浓度较高的是使用壁纸、乳胶漆和复合木地板等新型装修材料的儿童卧室.这些结果说明室内装修材料与室内苯系物的暴露水平存在一定的关系，但在装修 1 a 后，室内装修材料散发的甲醛对室内甲醛暴露水平的贡献有限.相对于装修材料，室内通风可能对装修较长时间后的室内甲醛浓度影响更大[6].

本研究发现室内使用空气净化器的儿童卧室室内甲醛浓度更低，但苯系物浓度普遍更高(尽管差异在统计学上不显著).这项结果说明家用空气净化器可能可以有效降低室内甲醛的暴露水平，但也有可能会带来二次污染(比如苯系物)[28].因此，在家用空气净化器的选用和设计时应特别注意二次污染的问题.此外，不同类型的空气净化器的功能差异较大，在降低室内可吸入颗粒物的同时也可能并不能降低甲醛.本研究也发现室内经常使用加湿器和饲养宠物的儿童卧室室内苯系物浓度明显更高.这项结果说明室内苯系物浓度可能与室内湿度有关[6]；也说明宠物等动物可能会散发一定的苯系物或由于宠物的生活起居问题造成室内苯系物暴露水平较高.此外，本研究发现室内放置一定数量的盆栽的儿童卧室室内甲醛浓度并不低于室内未放置盆栽的卧室.这与大部分研究[29]和公众普遍认为的在室内放置一定的盆栽可降低室内甲醛的暴露水平的看法相悖.而有研究发现部分盆栽的植物或培养基(土壤)本身也可能会散发挥发性有机物[30].此外，对室内盆栽经常浇水和水分挥发而有可能影响室内空气湿度，从而在一定程度上导致甲醛的释放速率改变[30].因此，建议在选择室内盆栽时也应注意有可能会加重室内空气污染(比如甲醛)的问题.

本研究存在一定的局限.由于本研究的主要目的是探究儿童住宅室内污染物的真实暴露水平及其健康效应[10]，在采样前 12 h 未按《室内空气质量标准》的技术规范[18]关闭儿童卧室门窗，室内甲醛和苯系物浓度可能受到人为活动的影响.此外，每户住宅只进行了 1 次检测和取样，而不是 1 户住宅在不同季节均进行检测.这样的检测安排可能对不同季节的室内甲醛和苯系物浓度结果比较存在影响.在现场检测期间也未对室外挥发性有机物浓度进行检测，无法对室内外污染物浓度的关系进行定量分析.

3 结论

(1)上海地区学龄儿童的卧室室内甲醛和苯系物浓度存在较大差异，但绝大部分卧室的室内甲醛和苯系物浓度满足国家室内空气质量标准的规定.冬季卧室室内甲醛浓度明显高于其他季节，但苯系物浓度无明显的季节差异.

(2)装修较长时间后，新型装修材料的使用仍然与室内苯系物浓度存在一定的关系，但这些材料散发的甲醛对室内甲醛暴露水平的贡献有限.相对于装修材料，室内通风可能对装修较长时间后的室内甲醛浓度影响更大.

(3)家用空气净化器可以有效降低室内甲醛的暴露水平.室内苯系物浓度可能与室内湿度和室内宠物的饲养有关.植物盆栽净化装修时间较长后的室内甲醛和苯系物的效果可能有限.

参考文献：

[1] Zhang Y P, Mo J H, Weschler C J. Reducing health risks from indoor exposures in rapidly developing urban China[J]. Environmental Health Perspectives, 2013, **121**(7): 751-755.

[2] 孙越霞，侯静，张庆男，等.天津市居住建筑新风量的测量与分析[J].暖通空调，2016，**46**(6)：10-13.
Sun Y X, Hou J, Zhang Q N, *et al*. Measurement and analysis of outdoor air rate of residential buildings in Tianjin[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016, **46**(6): 10-13.

[3] Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(1): 153-169.

[4] Yu C, Crump D. A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings[J]. Building and Environment, 1998, **33**(6): 357-374.

[5] Wilke O, Jann O, Brödner D. VOC-and SVOC-emissions from adhesives, floor coverings and complete floor structures[J]. Indoor Air, 2004, **14**(S8): 98-107.

[6] 刘晓途，闫美霖，段恒轶，等.我国城市住宅室内空气挥发性有机物污染特征[J].环境科学研究，2012，**25**(10)：1077-1084.
Liu X T, Yan M L, Duan H Y, *et al*. Characteristics of indoor volatile organic compounds in urban residential microenvironments in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(10): 1077-1084.

[7] Rumchev K, Spickett J, Bulsara M, *et al*. Association of domestic exposure to volatile organic compounds with asthma in young children[J]. Thorax, 2004, **59**(9): 746-751.

[8] Venn A J, Cooper M, Antoniak M, *et al*. Effects of volatile organic compounds, damp, and other environmental exposures in the home on wheezing illness in children[J]. Thorax, 2003, **58**(11): 955-960.

[9] Mendell M J. Indoor residential chemical emissions as risk factors for respiratory and allergic effects in children: a review[J]. Indoor Air, 2007, **17**(4): 259-277.

[10] Huang C, Wang X Y, Liu W, *et al*. Household indoor air quality and its associations with childhood asthma in Shanghai, China: on-site inspected methods and preliminary results[J]. Environmental Research, 2016, **151**: 154-167.

[11] Maruo Y Y, Nakamura J, Uchiyama M. Development of formaldehyde sensing element using porous glass impregnated with β-diketone[J]. Talanta, 2008, **74**(5): 1141-1147.

[12] 谢为博, 邓克俭. NIST Chemistry Webbooks 数据库的批量查询和数据采集[J]. 计算机与应用化学,2004, **21**(2):314-316.

[13] 王春, 张焕珠, 蒋蓉芳, 等. 装修后居室空气中甲醛和总挥发性有机物污染现状[J]. 环境与健康杂志, 2005, **22**(5): 356-358.

Wang C, Zhang H Z, Jiang R F, *et al*. Study on the indoor air levels of indoor formaldehyde and total volatile organic compounds after decoration[J]. Journal of Environment and Health, 2005, **22**(5): 356-358.

[14] 张卫国, 郝森, 黄培林, 等. 新装修居室空气中总挥发性有机物随时间的变化规律[J]. 环境与健康杂志, 2007, **24**(10): 782-783.

Zhang W G, Hao S, Huang P L, *et al*. Time variation regularity of TVOC in indoor Air in newly decorated houses[J]. Journal of Environment and Health, 2007, **24**(10): 782-783.

[15] 徐东群, 尚兵, 曹兆进. 中国部分城市住宅室内空气中重要污染物的调查研究[J]. 卫生研究, 2007, **36**(4): 473-476.

Xu D Q, Shang B, Cao Z J. Investigation of key indoor air pollutants in residence in part of the cities in China[J]. Journal of Hygiene Research, 2007, **36**(4): 473-476.

[16] 迟欣, 石玉琴, 颜进, 等. 武汉市室内装修后甲醛浓度动态变化规律研究[J]. 环境与健康杂志, 2007, **24**(2): 81-83.

Chi X, Shi Y Q, Yan J, *et al*. Dynamic change of formaldehyde concentration in indoor air after newly decorated in Wuhan[J]. Journal of Environment and Health, 2007, **24**(2): 81-83.

[17] 张桂斌, 张金艳, 王富嵩, 等. 装修后居室内空气中苯系物浓度的动态变化[J]. 环境与健康杂志, 2007, **24**(7): 505-506.

Zhang G B, Zhang J Y, Wang F S, *et al*. Dynamic changes of benzene series level in indoor air in newly decorated houses[J]. Journal of Environment and Health, 2007, **24**(7): 505-506.

[18] GB/T 18883-2002, 室内空气质量标准[S].

[19] 张玉欣, 安俊琳, 林旭, 等. 南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 1-12.

Zhang Y X, An J L, Lin X, *et al*. Source apportionment of volatile organic compounds and health assessment of benzene series in Northern suburb of Nanjing in Winter[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 1-12.

[20] 高爽, 张坤, 高松, 等. 上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 855-866.

Gao S, Zhang K, Gao S, *et al*. Characteristics of reactive VOCs species during high haze-pollution events in suburban area of Shanghai in winter[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 855-866.

[21] 崔虎雄, 吴迓名, 高松, 等. 上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3537-3542.

Cui H X, Wu Y M, Gao S, *et al*. Characteristics of ambient VOCs and their role in O_3 formation: a typical air pollution episode in Shanghai urban area[J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 855-866.

[22] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3560-3565.

Zhou Y M, Hao Z P, Wang H L. Pollution and source of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area in Beijing[J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 3560-3565.

[23] 李念平, 朱孔敏, 潘尤贵, 等. 长沙市住宅建筑室内外 VOC 浓度的实测与分析[J]. 暖通空调, 2004, **34**(6): 17-21.

Li N P, Zhu K M, Pan Y G, *et al*. Field measurement and analysis of indoor and outdoor VOC concentration for Changsha residential buildings[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, **34**(6): 17-21.

[24] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O_3 生成潜势的相关性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 443-451.

Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al*. Correlation analysis between characteristics of VOCs and Ozone formation potential in summer in Nanjing urban district[J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 443-451.

[25] 刘丹, 解强, 张鑫, 等. 北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3693-3701.

Liu D, Xie Q, Zhang X, *et al*. Source apportionment and health risk assessment of VOCs during the haze period in the winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3693-3701.

[26] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 845-854.

Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al*. Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 845-854.

[27] 齐惠萍, 杜银梅, 王向纯, 等. 太原市部分居室甲醛污染状况调查[J]. 环境与健康杂志, 2009, **26**(3): 253.

[28] Zhang Y P, Mo J H, Li Y G, *et al*. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(26): 4329-4343.

[29] 侯海萍. 盆栽植物净化空气中挥发性有机污染物研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.

[30] 徐仲均, 皮东恒, 林爱军, 等. 植物对室内空气中甲醛的净化[J]. 环境与健康杂志, 2008, **25**(10): 935-937.

Xu Z J, Pi D H, Lin A J, *et al*. Purification of indoor air Formaldehyde by plants: a review[J]. Journal of Environment and Health, 2008, **25**(10): 935-937.

HUANJING KEXUE Vol. 39 No. 2
Environmental Science (monthly) Feb. 15, 2018

CONTENTS

Preface ······ HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment ······ CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, *et al.* (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model: A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing ······ HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, *et al.* (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone ······ ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, *et al.* (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park ······ WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, *et al.* (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China ······ HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, *et al.* (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park ······ MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, *et al.* (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China ······ LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, *et al.* (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao ······ HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, *et al.* (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province ······ YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, *et al.* (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making ······ SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, *et al.* (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers ······ GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, WANG Hui, *et al.* (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu ······ LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, *et al.* (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors ······ JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, *et al.* (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province ······ XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City ······ CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, *et al.* (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014 ······ LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, *et al.* (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing ······ HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, *et al.* (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel ······ HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, *et al.* (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl *tert*-Butyl Ether via a Biotrickling Filter ······ CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, *et al.* (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter ······ GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, *et al.* (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event ······ CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, *et al.* (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems ······ XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, *et al.* (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes ······ TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing ······ TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, *et al.* (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of $PM_{2.5}$ and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Beijing ······ YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, *et al.* (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method ······ ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, *et al.* (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China ······ WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, *et al.* (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling ······ YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, *et al.* (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis ······ LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, *et al.* (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China ······ XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, *et al.* (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake ······ WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, *et al.* (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China ······ LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, *et al.* (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter ······ ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, *et al.* (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir ······ XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, *et al.* (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis ······ LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, *et al.* (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream ······ QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, *et al.* (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area ······ ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, *et al.* (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment ······ ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, *et al.* (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors ······ TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, *et al.* (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(Ⅱ) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel ······ KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, *et al.* (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution ······ MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, *et al.* (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds ······ XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, *et al.* (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs ······ HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, *et al.* (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology ······ MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, *et al.* (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant ······ LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, *et al.* (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode ······ LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, *et al.* (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge ······ LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, *et al.* (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate ······ CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, *et al.* (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil ······ YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, *et al.* (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin ······ LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, *et al.* (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss ······ BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, *et al.* (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area ······ YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, *et al.* (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai ······ MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, *et al.* (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables ······ CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, *et al.* (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils ······ LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, *et al.* (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors ······ YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, *et al.* (953)