

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评估

范洁¹, 樊灏¹, 沈振兴^{1*}, 党文鹏², 郑伟², 王志华², 付毅²

(1. 西安交通大学环境科学与工程系, 西安 710049; 2. 陕西云杭环保科技有限公司, 西安 710075)

摘要: 为了解公共场所室内空气污染现状及健康风险, 在 2017 年 12 月 ~ 2020 年 7 月对西安市区内 5 类新装修的公共场所 (办公室、教室、实验室、银行和医院) 进行了空气质量监测及人体健康风险评估。监测的项目包括: 甲醛、苯、甲苯、二甲苯、乙酸正丁酯、乙苯、苯乙烯、正十一烷和总挥发性有机物 (TVOC)。结果表明, 污染物中甲醛的超标率最高 (59.4%), 其次为甲苯、TVOC、苯和二甲苯。在 5 类公共场所中, 医院的污染物超标率最高 (46.7%), 主要超标物为甲醛、苯和甲苯。结果表明, 甲醛和 TVOC 浓度与温、湿度呈现良好的正相关。健康风险评估结果表明, 不同场所的人群均存在甲醛和苯的致癌风险, 且在银行工作的人群存在较高的甲醛致癌风险, 在医院工作的人群存在较高的苯致癌风险。本研究对西安市公共场所室内空气污染水平提供了参考, 对相关人群健康风险研究具有重要意义。

关键词: 甲醛; 总挥发性有机物; 医院; 银行; 浓度水平; 健康风险评估

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2153-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009261

Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an

FAN Jie¹, FAN Hao¹, SHEN Zhen-xing^{1*}, DANG Wen-peng², ZHENG Wei², WANG Zhi-hua², FU Yi²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Yunhang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to understand the levels of indoor air pollution and health risks in public places, our research group conducted air quality monitoring and human health risk assessments for five types of public places (offices, classrooms, laboratories, banks, and hospitals) in Xi'an City from December 2017 to July 2020. The test items included formaldehyde, benzene, toluene, xylene, *n*-butyl acetate, ethylbenzene, styrene, *n*-undecane, and total volatile organic compounds (TVOC). The results showed that formaldehyde had the highest exceedance rate (59.4%), followed by toluene, TVOC, benzene, and xylene. Among the five types of public places, hospitals had the highest rate of pollutants exceeding the standard (46.7%), and the main pollutants exceeding the standard were formaldehyde, benzene, and toluene. The results showed that the concentrations of formaldehyde and TVOC were positively correlated with temperature and humidity. The health risk assessment results showed that there were carcinogenic risks of formaldehyde and benzene in different places; people working in banks had a higher risk of formaldehyde carcinogenesis, and those working in hospitals had a higher risk of benzene carcinogenesis. This study provides a reference for the level of indoor air pollution in public places in Xi'an City, and is of great significance to the health risk research of related populations.

Key words: formaldehyde; total volatile organic compounds (TVOC); hospital; bank; concentration level; health risk assessment

近年来, 由于房屋的过度装修, 室内空气质量受到了广泛的关注。挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 被广泛地应用于各种建筑材料、家具、涂料、壁纸和黏合剂等^[1-3], 是重要的室内空气污染物, 如甲醛和苯等。

为控制室内空气污染物浓度, 《空气质量标准》(GB/T 18883-2002) 规定了污染物的标准限值, 甲醛、苯、甲苯、二甲苯和总挥发性有机物 (total volatile organic compounds, TVOC) 的标准值分别为 0.10、0.11、0.20、0.20 和 0.60 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 但室内空气污染物的超标率依然很高。Shang 等^[4] 研究了中国 4 个城市商场的空气质量水平, 甲醛浓度范围为 0.03 ~ 0.12 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, TVOC 浓度范围为 0.03 ~ 0.74 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。Sofuoglu 等^[5] 的研究发现甲醛、甲苯和苯是

小学教室的主要污染物, 根据健康评价结果, 甲醛因具有较高的慢性毒性和致癌风险水平成为对人体危害较大的污染物。室内空气污染形势严峻, 目前关于居民住房空气质量已有大量研究, 而关于公共场所的室内空气污染研究较少, 尤其是可能有高浓度 VOCs 污染的公共场所, 如医院^[6], 必须明确其 VOCs 的暴露水平和健康风险。

为了解公共场所空气中主要污染物的浓度水平及其对人体健康的影响, 本文开展了对西安市区内新装修的办公室、教室、实验室、医院和银行共 357

收稿日期: 2020-09-27; 修订日期: 2020-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877383)

作者简介: 范洁 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染物特征, E-mail: 17506482650@163.com

* 通信作者, E-mail: zxshen@mail.xjtu.edu.cn

个公共场所房屋内的主要空气污染物(甲醛、苯、甲苯、二甲苯、乙酸正丁酯、乙苯、苯乙烯、正十一烷和TVOC)的监测研究,分析了不同公共场所主要污染物的浓度水平及温、湿度对甲醛和TVOC浓度的影响,最后评估了不同公共场所内甲醛和苯对人体的健康风险。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

本实验在2017年12月~2020年7月对西安市的48个室内办公场所(216个办公室)、20所学校(83个教室)、25个实验室、5家银行和5所医院进行了空气污染物浓度测定。监测项目包括:甲醛、苯、甲苯、二甲苯、乙酸正丁酯、乙苯、苯乙烯、正十一烷和TVOC。所有采样点均分布在西安市周边,监测的房间均在过去的6月内进行了装修。

采样前,所有房屋均保持正常状态,门窗关闭至少12 h,采样装置安装在离地面1.5 m的三脚架上,接近呼吸高度。采样时检查装置气密性,记录室内温度、湿度、压力、户型、装修时间和装修材料等一般描述。

甲醛样品采用气泡样管采样器(QC-2,北京市劳动保护学院)采集,VOCs样品采用恒流采样器(QC-2,北京市劳动保护学院)和装有200 mg Tenax-TA 吸收剂(60~80目)的不锈钢管采集。样品流速为0.5 L·min⁻¹,采样时间20 min。甲醛样品取样后冷藏,不暴露于光下,用于VOCs的吸收采样不锈钢管严密密封。然后,样品被立即运送到实验室进行分析。在室内采样时,还测量了外侧对照样本和空白样本。

1.2 分析方法

样品分析方法参考国家标准《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)^[7]。甲醛采用苯酚试剂分光光度法测定,VOCs采用配备有火焰电离检测器(FID)(FULI-9790)的气相色谱仪分析,检测器包括毛细管柱(SE-30,50 m×0.32 mm 石英毛细管柱)和热解吸装置(JX-3)。

1.3 健康风险评价

采用美国环保署(USEPA)健康风险评价方法的致癌风险评价模型^[8],计算方法见下式:

$$CR = LADD \times SF \tag{1}$$

式中,CR表示致癌风险;LADD表示终身日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;SF表示致癌斜率因子,kg·d·mg⁻¹

$$LADD = \frac{CA \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times LT} \tag{2}$$

式中,CA表示空气中的污染物浓度,mg·m⁻³;IR表示呼吸速率,m³·h⁻¹;ET表示暴露时间,h·d⁻¹;EF表示暴露频率,d·a⁻¹;ED表示暴露持续时间,a;BW表示体重,kg;LT表示预期寿命,25 500 d

2 结果与讨论

2.1 公共场所污染物的浓度水平

表1为本研究357个公共场所房屋的空气质量分析结果,在所有的监测位点中均检测到了甲醛、苯、甲苯、二甲苯、TVOC、乙酸正丁酯、乙苯、苯乙烯和正十一烷。甲醛浓度范围为0.05~0.38 mg·m⁻³,超标率为59.4%。TVOC超标率为14.0%,最高超标倍数为4.1。苯、甲苯和二甲苯的超标率依次

表1 公共场所空气质量检测情况

Table 1 Air quality inspection in public places

检测项目	监测点数	超标个数	超标率 /%	最小 /mg·m ⁻³	平均值 /mg·m ⁻³	最大值 /mg·m ⁻³	最高超标 倍数	标准 ¹⁾ /mg·m ⁻³
甲醛	357	212	59.4	0.05	0.12	0.38	3.7	0.10
苯	357	47	13.2	0.02	0.08	0.90	8.1	0.11
甲苯	357	62	17.4	0.03	0.15	1.23	6.2	0.20
二甲苯	357	11	3.1	0.00	0.06	1.32	6.6	0.20
TVOC	357	50	14.0	0.08	0.37	2.47	4.1	0.60
乙酸正丁酯	353			0.00	0.01	0.07		
乙苯	353			0.01	0.05	0.58		
苯乙烯	353			0.00	0.02	0.37		
正十一烷	353			0.00	0.01	0.16		

1) 标准值参考《公共场所卫生指标及限制要求》(GB 37488-2019)^[9]

为:13.2%、17.4%和3.1%。在所有的检测项目中甲醛的超标率最高,污染最为严重。

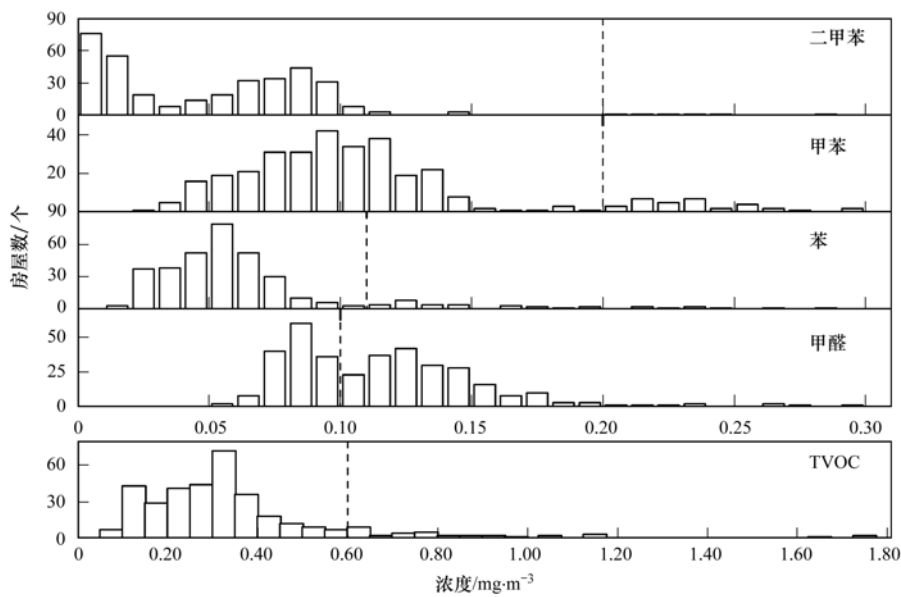
世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中,甲醛和苯为1类致癌物,明确可以致癌,乙苯和苯乙烯为2类致癌物,具有动物致癌性。在本研

究中乙苯和苯乙烯的平均浓度分别为0.05 mg·m⁻³和0.02 mg·m⁻³,其对室内空气污染程度较低。Chang等^[10]研究了2014~2015年西安市居民室内空气质量,甲醛浓度范围为0.02~0.45 mg·m⁻³,超标率为83.6%,TVOC最大浓度为0.84 mg·m⁻³,超

标率为 11.6%。通过比较居民住宅和公共场所的空气污染水平,发现公共场所的室内空气污染程度低于住宅.其原因可能是多数公共场所房屋装修较为简单,装饰材料少,且公共场所空间较大,有利于通风,使污染物稀释扩散^[10]。

为探究房屋内主要污染物浓度分布及超标情况,绘制了不同污染物浓度的房屋数量分布(图 1)。甲醛浓度主要集中在 0.05 ~ 0.15

mg·m⁻³,而 TVOC、苯和二甲苯浓度主要集中在标准值以下.甲醛主要来源于人造板、胶黏剂和地毯等^[11,12]被广泛应用的装修材料,在室内装修中甲醛污染最为严重,室内苯系物主要来源于油漆、涂料和溶剂等,其中甲苯还来自于油墨和印刷产品等^[13,14]。在所检测的苯系物中,甲苯浓度较高,可能的原因是公共场所人群对打印机及印刷产品的使用较多。



虚线位置对应标准值
图 1 检测项目的浓度分布

Fig. 1 Concentration distribution of detected items

2.2 不同公共场所的污染物浓度水平

检测的 357 个公共空间房屋包括办公室 216 个、教室 83 个、实验室 25 个、银行 21 个和医院 12 个.不同公共场所的污染物超标情况如图 2 所示.医院的污染物超标率最高为 46.7%,接下来依次是银行、办公室、实验室和教室,分别为 38.1%、23.9%、17.6% 和 5.5%。由此可见,医院、银行、办公室和实验室室内空气质量较差,而教室的污染相对较轻。

在不同公共场所污染物浓度超标情况中(表 2),医院的甲醛超标率达到 83.3%,TVOC 超标率为 50.0%,苯和甲苯超标率均为 41.7%,这是由于甲醛水溶液被广泛应用于医院的病理科用于标本保存,在取材、制片和阅片诊断等过程中均涉及甲醛的暴露^[15]。银行的甲醛和甲苯超标率分别为 76.2% 和 61.9%,这与杨常交等^[16]的检测结果基本一致,甲醛和甲苯为主要污染物,并主要源于木制家具及油漆^[12]。教室的污染物超标率最低可能因为教室装修较为简洁,基本不存在壁纸和木地板等装修材料^[5]。

在办公室、实验室、银行和医院这 4 类公共场所

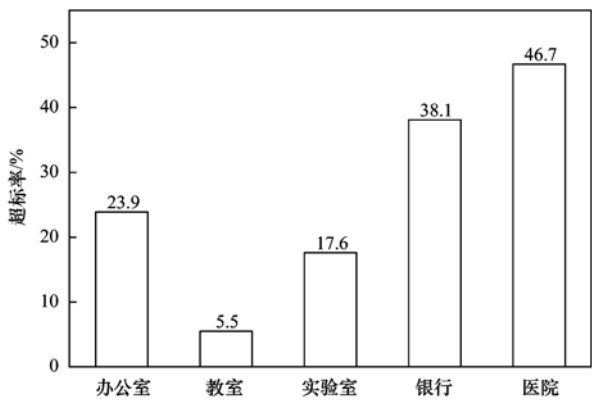


图 2 不同公共场所的污染物超标率

Fig. 2 Pollutant exceedance rate in different public places

中(图 3),甲醛浓度的算术平均值(0.12 ~ 0.16 mg·m⁻³)均高于国家标准值(0.10 mg·m⁻³),银行的甲醛平均浓度较高(0.16 mg·m⁻³)且浓度范围(0.07 ~ 0.38 mg·m⁻³)较宽.办公室、教室和实验室的 TVOC 浓度水平相当,其算术平均值均低于国家标准值(0.60 mg·m⁻³),医院的 TVOC 平均浓度(0.86 mg·m⁻³)较其他 4 类场所高且浓度范围较宽(0.14 ~ 2.28 mg·m⁻³)。

表 2 不同室内空间污染物浓度和超标情况

Table 2 Pollutant concentrations and standard exceedance in different indoor spaces

位置	污染物	个数	范围 /mg·m ⁻³	算术平均 /mg·m ⁻³	标准偏差	中位数 /mg·m ⁻³	标准 /mg·m ⁻³	超标个数	超标率 /%
办公室	甲醛	216	0.06~0.27	0.12	0.04	0.12	0.10	156	72.2
	苯	216	0.02~0.40	0.08	0.07	0.06	0.11	35	16.2
	甲苯	216	0.04~0.90	0.14	0.13	0.10	0.20	35	16.2
	二甲苯	216	0.00~0.40	0.05	0.06	0.04	0.20	6	2.8
	TVOC	216	0.08~1.69	0.35	0.22	0.31	0.60	24	11.1
教室	甲醛	83	0.05~0.14	0.09	0.02	0.08	0.10	12	14.5
	苯	83	0.02~0.10	0.05	0.02	0.05	0.11	0	0.0
	甲苯	83	0.03~0.62	0.12	0.12	0.09	0.20	7	8.4
	二甲苯	83	0.00~0.10	0.05	0.03	0.06	0.20	0	0.0
	TVOC	83	0.09~0.78	0.27	0.15	0.28	0.60	4	4.8
实验室	甲醛	25	0.08~0.24	0.12	0.04	0.11	0.10	16	64.0
	苯	25	0.02~0.26	0.08	0.05	0.07	0.11	4	16.0
	甲苯	25	0.05~0.24	0.11	0.05	0.09	0.20	2	8.0
	二甲苯	25	0.00~0.10	0.05	0.03	0.07	0.20	0	0.0
	TVOC	25	0.10~0.50	0.30	0.12	0.33	0.60	0	0.0
银行	甲醛	21	0.07~0.38	0.16	0.05	0.06	0.10	16	76.2
	苯	21	0.03~0.14	0.07	0.02	0.03	0.11	3	14.3
	甲苯	21	0.09~1.23	0.30	0.14	0.06	0.20	13	61.9
	二甲苯	21	0.01~0.95	0.13	0.09	0.01	0.20	3	14.3
	TVOC	21	0.18~2.47	0.66	0.32	0.14	0.60	5	23.8
医院	甲醛	12	0.09~0.14	0.12	0.02	0.12	0.10	10	83.3
	苯	12	0.02~0.90	0.22	0.28	0.06	0.11	5	41.7
	甲苯	12	0.03~0.66	0.21	0.20	0.10	0.20	5	41.7
	二甲苯	12	0.01~1.32	0.16	0.35	0.04	0.20	2	16.7
	TVOC	12	0.14~2.28	0.86	0.68	0.67	0.60	6	50.0

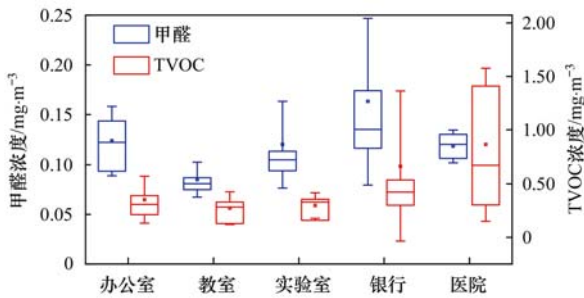


图 3 不同公共场所甲醛和 TVOC 浓度水平
Fig. 3 Concentrations of formaldehyde and TVOC in different public places

2.3 温、湿度对甲醛和 TVOC 浓度的影响

为了探究影响室内空气污染物浓度的因素,选取了办公室样本的温、湿度与甲醛和 TVOC 浓度做相关性分析.样本的温度范围为 9.2~33.5℃,相对湿度范围为 21.7%~91.0%(图 4).温、湿度对 VOCs 的影响与其亨利定理常数密切相关,VOCs 的亨利定律常数越大,温、湿度对其的影响就越大^[17,18].

如图 4 所示,甲醛、TVOC 浓度与温、湿度均呈现正相关的关系. VOCs 的释放机制为蒸发和扩散^[19~21],高温环境会增加装饰材料和物品中 VOCs 的释放速率.当湿度升高时,被蒸发到室内空气中的

蒸气含量增加,蒸气会与吸附在颗粒、灰尘和家具物体表面的 VOCs 进行竞争性吸附,从而使更多的 VOCs 物质进入室内空气中^[22]. 甲醛是一种易溶于水的化合物,相对湿度较高会使家具及装饰材料中富含甲醛的胶黏剂水解,从而导致甲醛浓度升高,而高温有利于甲醛从家具中蒸发出来,在室内空气中扩散^[23],故而,VOCs 的释放量随着温、湿度的升高而增加.

2.4 人体健康风险评价

为了评估甲醛和苯造成的健康风险,对不同公共空间和人群进行了接触风险评估.相关参数见表 3,甲醛和苯的致癌斜率因子依据 USEPA 的 IRIS 数据库^[24],分别为 0.027 kg·d·mg⁻¹和 0.046 kg·d·mg⁻¹.在本研究中,5 类公共场所甲醛的致癌风险范围为 1.73 × 10⁻⁵~1.25 × 10⁻⁴(图 5),均超过了 USEPA 建议的可接受的风险范围(1 × 10⁻⁶),即不同公共场所的人群均存在甲醛致癌风险,银行的致癌风险略大于其他 4 类场所,且男性的致癌因子大于女性,在之前的研究中有类似的结果^[25].苯在不同公共场所的致癌因子范围为 1.64 × 10⁻⁵~2.89 × 10⁻⁴,医院的苯的致癌风险远大于其他四

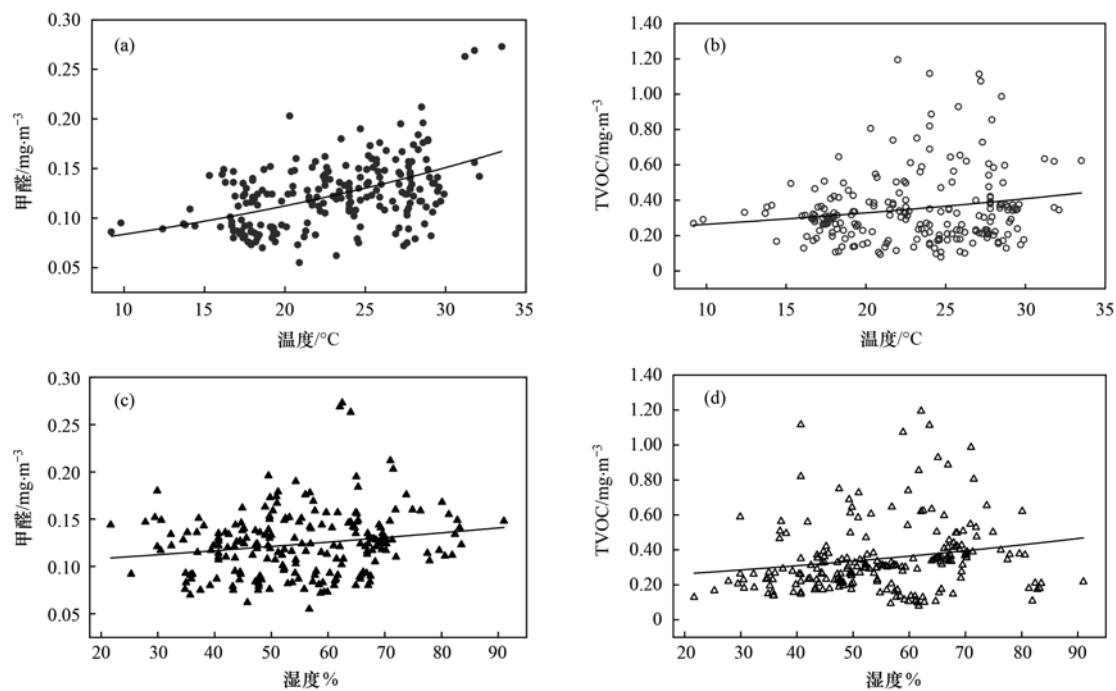


图 4 甲醛、TVOC 浓度与温湿度相关性

Fig. 4 Correlations between the concentrations of formaldehyde, TVOC, and temperature and humidity

表 3 健康风险评价相关参数

Table 3 Related parameters of health risk assessment

项目	呼吸速率 ^[8] /m ³ ·d ⁻¹	体重 ^[8] /kg	暴露时间 ^[26] /h	暴露频率 ^[26] /d·a ⁻¹	暴露持续时间 ^[26] /a
男性	15.2	70	8	250	40
女性	11.3	60	8	250	40
儿童	8.7	36	8	250	12

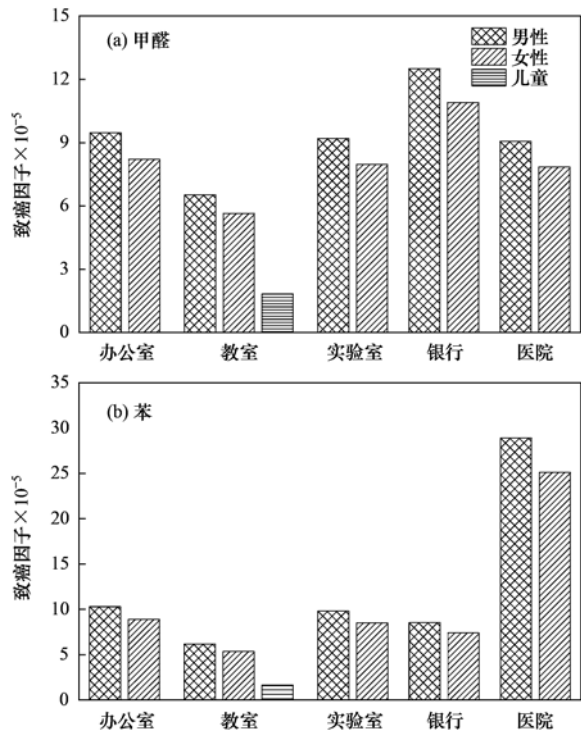


图 5 甲醛和苯的致癌风险评估

Fig. 5 Carcinogenic risk assessment of formaldehyde and benzene

类场所。儿童在教室的持续暴露时间小于成人,因此

相应癌症风险比成人低,但其致癌因子均大于 10^{-6} ,仍存在较大的致癌风险,不容忽视。

3 结论

(1)在所检测的 9 类污染物中,甲醛超标最为严重,超标率为 59.4%,其次为甲苯、TVOC、苯和二甲苯,超标率分别为 17.4%、14.0%、13.2% 和 3.1%。甲醛浓度范围为 0.05 ~ 0.38 mg·m⁻³,超标浓度主要集中在 0.10 ~ 0.15 mg·m⁻³。

(2)在 5 类公共场所中,医院的污染物超标率最高为 46.7%,其次为银行、办公室、实验室和教室。医院主要超标物为甲醛、苯、甲苯和 TVOC,银行和办公室的主要污染物为来源于木制家具及油漆的甲醛和甲苯。

(3)甲醛、TVOC 与温、湿度均呈现正相关关系。VOCs 的释放量随着温、湿度的升高而增加,高温高湿环境会增加装饰材料和物品中 VOCs 的释放速率。

(4)在健康风险评价中,不同公共场所甲醛和苯的致癌因子均大于 USEPA 推荐的安全限值(1×10^{-6}),即不同场所的人群均存在甲醛和苯的致癌风

险,且在银行工作的人群存在较高的甲醛致癌风险,在医院工作的人群存在较高的苯致癌风险。

参考文献:

- [1] Du Z J, Mo J H, Zhang Y P, *et al.* Benzene, toluene and xylenes in newly renovated homes and associated health risk in Guangzhou, China[J]. *Building and Environment*, 2014, **72**: 75-81.
- [2] Salthammer T, Bahadir M. Occurrence, dynamics and reactions of organic pollutants in the indoor environment[J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2009, **37**(6): 417-435.
- [3] Liu W W, Zhang Y P, Yao Y, *et al.* Indoor decorating and refurbishing materials and furniture volatile organic compounds emission labeling systems: a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(20): 2533-2543.
- [4] Shang Y Z, Li B Z, Baldwin A N, *et al.* Investigation of indoor air quality in shopping malls during summer in Western China using subjective survey and field measurement[J]. *Building and Environment*, 2016, **108**: 1-11.
- [5] Sofuoglu S C, Aslan G, Inal F, *et al.* An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2011, **214**(1): 36-46.
- [6] Rautiainen P, Hyttinen M, Ruokolainen J, *et al.* Indoor air-related symptoms and volatile organic compounds in materials and air in the hospital environment [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2019, **29**(5): 479-488.
- [7] GB/T 18883-2002, 室内空气质量标准[S].
- [8] U.S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I: Human health evaluation manual (Part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. Washington, DC: USEPA, 2009.
- [9] GB 37488-2019, 公共场所卫生指标及限值要求[S].
- [10] Chang T, Ren D X, Shen Z X, *et al.* Indoor air pollution levels in decorated residences and public places over Xi'an, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(9): 2197-2205.
- [11] Jones A P. Indoor air quality and health [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(28): 4535-4564.
- [12] Salthammer T, Mentese S, Marutzky R. Formaldehyde in the indoor environment [J]. *Chemical Reviews*, 2010, **110**(4): 2536-2572.
- [13] Sarigiannis D A, Karakitsios S P, Gotti A, *et al.* Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk[J]. *Environment International*, 2011, **37**(4): 743-765.
- [14] Destailats H, Maddalena R L, Singer B C, *et al.* Indoor pollutants emitted by office equipment: a review of reported data and information needs[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(7): 1371-1388.
- [15] 孔凡玲, 李仁波, 高衍新, 等. 济南市 6 家综合医院病理科室内空气甲醛浓度及变化特征[J]. *环境与职业医学*, 2015, **32**(9): 856-859.
- [16] Kong F L, Li R B, Gao Y X, *et al.* Concentrations and variations of indoor air formaldehyde in pathology departments of six general hospitals of Jinan City[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2015, **32**(9): 856-859.
- [17] 杨常交, 巫卓英, 黄晓美, 等. 某市一商业银行营业网点空气质量检测结果分析[J]. *中国医药科学*, 2012, **2**(14): 160-161.
- [18] Yang C J, Wu Z Y, Huang X M, *et al.* Analysis on indoor air quality testing results of a commercial bank outlets [J]. *China Medicine and Pharmacy*, 2012, **2**(14): 160-161.
- [19] Huang S D, Wei W J, Weschler L B, *et al.* Indoor formaldehyde concentrations in urban China: preliminary study of some important influencing factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **590-591**: 394-405.
- [20] Parthasarathy S, Maddalena R L, Russell M L, *et al.* Effect of temperature and humidity on formaldehyde emissions in temporary housing units [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2011, **61**(6): 689-695.
- [21] Cicolella A. Volatile organic compounds (VOC): definition, classification and properties [J]. *Revue des Maladies Respiratoires*, 2008, **25**(2): 155-163.
- [22] Höllbacher E, Rieder-Gradinger C, Strateva D, *et al.* A large-scale test set-up for measuring VOC emissions from wood products under laboratory conditions in simulated real rooms [J]. *Holzforschung*, 2015, **69**(4): 457-462.
- [23] Mao Y F, Li Z, Zhang Y P, *et al.* A review of mass-transfer models and mechanistic studies of semi-volatile organic compounds in indoor environments [J]. *Indoor and Built Environment*, 2018, **27**(10): 1307-1321.
- [24] Zhou C, Zhan Y, Chen S G, *et al.* Combined effects of temperature and humidity on indoor VOCs pollution: intercity comparison[J]. *Building and Environment*, 2017, **121**: 26-34.
- [25] Ye W, Zhang X, Gao J, *et al.* Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings: a literature review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 696-729.
- [26] U.S. Environmental Protection Agency. Integrated risk information system[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris>, 2003-04-17.
- [27] Rovira J, Roig N, Nadal M, *et al.* Human health risks of formaldehyde indoor levels: an issue of concern[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2016, **51**(4): 357-363.
- [28] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	 HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	 HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	 ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	 YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	 QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	 CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	 LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	 LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	 MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	 HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	 XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	 YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	 CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	 XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)