

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 李明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4462) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险

印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 采用超声萃取-层析净化-气相色谱/质谱联用仪定量分析塑胶跑道中 7 种有机磷酸酯 (OPEs), 方法回收率为 71.41% ~ 110.58%, 标准曲线相关系数 $r > 0.99$, 质控良好。采集并分析了成都市 12 个学校内的塑胶跑道样品中 OPEs 的含量及分布。结果表明 2/3 学校内的塑胶跑道样品中检出了 OPEs, 其中磷酸三正丁酯 [tri-*n*-butyl phosphate, TnBP]、磷酸三异辛酯 [tris(2-ethylhexyl) phosphate, TEHP] 的检出率较高, 而磷酸三(2-氯乙基)酯 [tri(2-chloroethyl) phosphate, TCEP]、磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯 [tridichloropropyl phosphate, TDCPP]、磷酸三苯酯 [triphenyl phosphate, TPhP] 在所有样品中均未检测到。∑7OPEs 含量范围为 ND ~ 534.89 ng·g⁻¹, 其中单体含量最高的是 TnBP (ND ~ 462.18 ng·g⁻¹)。一个样品中检出了毒性较大的氯代磷酸酯-TDCPP [trichloropropyl phosphate], 含量为 205.94 ng·g⁻¹。成人和儿童通过皮肤接触摄入的 ∑7OPEs 日均暴露剂量 (以 bw 计) 最高, 分别为 0.14 ng·(kg·d)⁻¹ 和 0.64 ng·(kg·d)⁻¹, 儿童的日均暴露剂量明显高于成人。成人及儿童的风险熵值 (RQ) 为 10⁻⁷ ~ 10⁻⁵。建议政府对塑胶跑道中 OPEs 使用量及添加种类进行管控, 以更好地保护人群健康。

关键词: 有机磷酸酯; 阻燃剂; 塑胶跑道; 污染水平; 健康风险

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4868-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702086

Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products

YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, WANG Zhen, LUO Yi, DENG Xu, DING Jun-gang, TANG Ming

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Using ultrasonic assisted extraction, column chromatograph purification and gas chromatograph-mass spectrometer (GC-MS) analysis method to quantify the contents of seven kinds of organic phosphorus ester (OPEs) in plastic tracks in Chengdu City. The recovery rates of this method ranged from 71.41% to 110.58% and the correlation coefficient (r) of the standard curve was higher than 0.99, which demonstrates satisfying quality control. Plastic track samples were collected from twelve schools in Chengdu. The results show that OPEs are detected in two-thirds of plastic track samples. TnBP [Tri-*n*-butyl phosphate] and TEHP [tris(2-ethylhexyl) phosphate] were detected with high frequency, while TCEP [tri(2-chloroethyl) phosphate], TDCPP [tridichloropropyl phosphate] and TPhP [triphenyl phosphate] were not detected in any samples. Contents of the total OPEs (∑7OPEs) in the plastic track ranged from ND to 534.89 ng·g⁻¹. TnBP was identified at the highest content levels (ND-462.18 ng·g⁻¹). TDCPP [Trichloropropyl phosphate], a chlorinated phosphate with higher toxicity, was detected in one sample with a contents of 205.94 ng·g⁻¹. The average exposure dose for adults was 0.14 ng·(kg·d)⁻¹, lower than that for children of 0.64 ng·(kg·d)⁻¹. Risk quotients of OPEs for adults and children were only 10⁻⁷-10⁻⁵ and could be ignored. These results indicate that the government should limit the consumption, as well as the type of OPEs which are added to plastic tracks, to protect population health.

Key words: organic phosphorus esters (OPEs); flame retardants; plastic tracks; pollution level; health risk

自 1979 年在北京工人体育场首次采用聚氨酯塑胶跑道以来, 塑胶跑道成为运动场地炙手可热的平铺材料。聚氨酯塑胶跑道更是公认的优质运动场地。但近年来, 媒体连续报道南京、上海、深圳、成都等地一些中小学发生“毒跑道”事件, 引起各方高度关注^[1]。制作塑胶跑道的材料聚氨酯有着易水解、阻燃性能差等缺点, 而作为塑料制品的阻燃添加剂——有机磷酸酯 (OPEs) 的引入可显著改善其阻燃性。然而 OPEs 并非完全安全, 它们具有一定的生物毒性且容易从各种塑料制品释放到环境中^[2,3]。作为一类新有机污染物, OPEs 已经受到了

美国以及欧洲诸国的高度关注。欧盟于 1995 年将磷酸三(2-氯乙基)酯 [tri(2-chloroethyl) phosphate, TCEP] 列入第二类高度关注物质, 2000 年将磷酸三氯丙酯 [trichloropropyl phosphate, TDCPP]、磷酸三(2,3-二氯丙基)酯 [tridichloropropyl phosphate,

收稿日期: 2017-02-16; 修订日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (21407014); 四川省科技支撑计划项目 (2015GZ0240); 成都信息工程大学大气环境模拟与污染控制重点实验室开放课题项目 (KFKT2016001); 2014 年度校中青年学术带头人科研基金项目 (J201415)

作者简介: 印红玲 (1978 ~), 女, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为环境污染与监测, E-mail: bellling15@sina.com

TDCPP]列入第四批高度关注物质. 欧盟风险评估草案也建议控制 TCEP 的暴露水平, 每人每天吸入摄入量应低于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 通过皮肤接触的暴露水平应低于 $2 \text{ mg}^{[4]}$. 目前研究者已在各环境介质中检测出 OPEs 的广泛存在^[5-17], 但尚未报道塑胶跑道中的新型有机污染物——OPEs 的检测分析. 本文以成都市内 12 所学校内的塑胶跑道为研究对象, 测定其中 OPEs 的含量与分布, 并进行健康风险评价, 以为城市有机污染防治、保护人群健康提供科学支持.

1 材料与方法

1.1 样品采集

在成都市选取的 12 所学校内采集其 400 m 操场的塑胶跑道样品, 采样点位置及分布见图 1. 在采样点内选取 $4 \times 100 \text{ m}$ 的塑胶跑道, 等距离 (100、200、300、400 m) 布设 4 个点, 用剪刀在跑道上剪取跑道颗粒合并为一个样品, 放在铝箔中密封保存.



图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

1.2 仪器与试剂

气相色谱-质谱联用仪 (日本岛津 GC-MS 2010plus), 真空浓缩仪 (瑞士 Buchi R-215/V-700).

主要试剂包括丙酮、乙酸乙酯、正己烷、乙腈均为 HPLC 级 (科龙化工), 7 种目标化合物标准品 (Sigma aldrich) 分别为: 磷酸三丁酯 [tri-*n*-butyl phosphate, TnBP]、磷酸三异辛酯 [tris (2-ethylhexyl) phosphate, TEHP]、磷酸三丁氧乙酯 [tributoxyethyl phosphate, TBEP]、磷酸三苯酯 [triphenyl phosphate, TPhP]、磷酸三氯乙酯 [tri (2-chloroethyl) phosphate, TCEP]、磷酸三氯丙酯 [trichloropropyl phosphate, TCPP]、磷酸三 (2,3-二氯丙基) 酯 [tridichloropropyl phosphate, TDCPP].

1.3 样品前处理及分析

用清水洗净表面灰尘自然晾干后, 用剪刀剪碎成小颗粒, 风干, 备用. 利用四分法称取样品 2.00 g 于试管中, 用 20 mL 乙酸乙酯: 丙酮 (体积比) = 3:2 在避光处过夜浸泡 12 h. 将浸泡好的样品超声萃取 30 min, 萃取液转入离心管中, 再加入 10 mL 乙酸乙酯: 丙酮 (体积比) = 3:2 于试管, 超声 15 min. 合并萃取液在转速为 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下离心 5 min. 用真空浓缩仪浓缩至约 1 mL , 上样到已活化的氧化铝: 弗罗里硅土层析柱. 用正己烷淋洗 20 mL 除去杂质后, 用乙酸乙酯: 丙酮 (体积比) = 3:2 洗脱剂洗脱 20 mL , 浓缩定容至 $200 \mu\text{L}$ 后上机检测.

仪器分析条件: 色谱柱 rti-5ms ($30.0 \text{ m} \times 0.25 \mu\text{m} \times 0.25 \text{ mm}$), 进样口温度为 280.0°C , 不分流进样, 载气为高纯 He, 流量为 $1.00 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 升温程序: 60.0°C (保持 1 min), 以 $30.00^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 220.0°C (保持 1 min), 以 $5.00^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 300°C (保持 4 min). MS 条件为: EI 源, SIM 模式, 离子源温度为 200°C , 接口温度为 280°C . 7 种目标化合物的目标离子和参考离子 (m/z) 分别为 TnBP: 155/99、211、125; TCEP: 249/63、143、251; TCPP: 125/99、201、277、157; TDCPP: 75/99、191、209、381; TPhP: 326/325、77、215; TBEP: 85/100、199、299; TEHP: 99/113、211.

1.4 QA/QC

各 OPEs 组分的标准曲线 r 均能达到 0.99 以上, 回收率为 71.41% ~ 110.58% (表 1).

表 1 OPEs 的标准曲线及回收率

Table 1 Standard curve and recovery of OPEs

名称	线性方程	r	回收率/%
TnBP	$y = 6.5 \times 10^5 x - 4.1 \times 10^4$	0.99	110.58
TCEP	$y = 5.0 \times 10^5 x - 4.5 \times 10^4$	0.99	99.15
TCPP	$y = 5.8 \times 10^5 x - 2.8 \times 10^4$	0.99	92.89
TDCPP	$y = 3.0 \times 10^5 x - 1.7 \times 10^4$	0.99	80.86
TPhP	$y = 6.4 \times 10^5 x - 5.1 \times 10^4$	0.99	71.41
TBEP	$y = 2.0 \times 10^6 x - 1.0 \times 10^5$	0.99	72.38
TEHP	$y = 5.0 \times 10^6 x - 2.9 \times 10^5$	0.99	79.06

仪器精密度为 4.7% ~ 10.4%. 空白实验可检出 TBEP, 其浓度 ($6.52 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 为样品含量的 10% 以下, 故实验过程中可能带入的污染均可忽略, 质控良好.

2 结果与讨论

2.1 不同塑胶跑道中 $\sum 7\text{OPEs}$ 的含量

成都市 12 所学校塑胶跑道中 7 种 OPEs 的含量

如图2所示,7、9、10和11号样品中未检出OPEs,其他样品中 $\sum 7\text{OPEs}$ 的含量范围在 $52.37 \sim 534.89 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,故检出率为 $2/3$,平均浓度为 $76.41 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.12号的 $\sum 7\text{OPEs}$ 含量最高,达 $534.89 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;5号样品的 $\sum 7\text{OPEs}$ 含量最低($52.37 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),最高和最低含量相差一个数量级.与成都市土壤中的 $\sum 7\text{OPEs}$ 含量($31.6 \sim 211.0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[17]相比,塑胶跑道中的 $\sum 7\text{OPEs}$ 含量相当.说明OPEs可能来自于塑胶跑道生产过程中的阻燃剂添加步骤,也可能来源于跑道各原料组分的初级原料,或者外来土壤附着及大气颗粒物沉降等过程,其含量水平需引起关注.

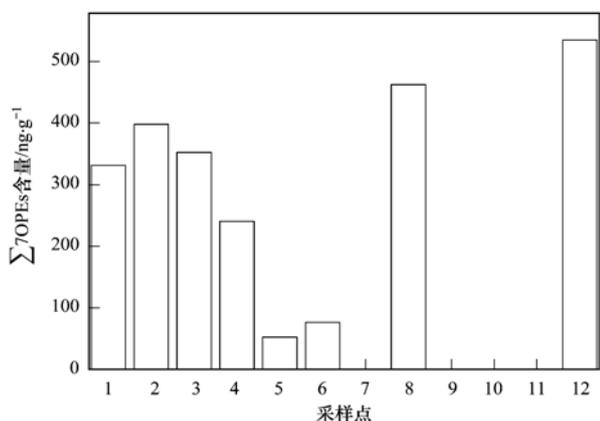


图2 塑胶跑道中 $\sum 7\text{OPEs}$ 的含量

Fig. 2 Contents of $\sum 7\text{OPEs}$ in plastic tracks

2.2 塑胶跑道中不同类OPEs的含量

磷酸酯根据其取代基的不同,分为烷基磷酸酯、芳基磷酸酯和卤代磷酸酯.各类OPEs的性质有明显差异,如烷基磷酸酯属于难降解类物质,其毒性较小;而芳基磷酸酯和卤代磷酸酯的毒性较大.因此

将样品中所测出的OPEs进行归类分析,发现采样点普遍添加的烷基磷酸酯(TnBP、TBEP和TEHP),但是1号样品中添加了氯代磷酸酯TCPP($205.94 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$).说明大部分厂家在塑胶跑道中添加的是对人类健康风险不是很大的烷基磷酸酯,个别厂家在塑胶跑道中添加了氯代磷酸酯.建议尽量少添加毒性较大且不易降解的氯代磷酸酯.

2.3 塑胶跑道中OPEs单体的含量

塑胶跑道中各OPEs单体含量如表2所示,其分布见图3.除了7、9、10和11号采样点的塑胶跑道未检出OPEs外,其他各个采样点的塑胶跑道中都含有OPEs,大多数为TnBP和TEHP.而TCEP、TDCPP、TPHP在所有样品中均未检测到.TCPP只在1号采样点的塑胶跑道中检测到,TBEP在3和4号采样点中检测到.在所有样品中,1、2、3和12号样品中TnBP的含量均高于其它OPEs的含量;4和5号样品中TnBP的浓度均小于其他OPEs的含量,而8号样品中只检出了TnBP.

在检测出OPEs的样品中,TnBP的检出率最高,达66.67%,其含量变化范围为:ND~ $462.18 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.12号样品中TnBP的含量最高($324.79 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),是含量较低的5号样品含量($7.75 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)的42倍左右.TnBP在各样品的含量比例均超过30%,在含TEHP的样品中,所占比例也都超过了10%.说明TnBP是成都市学校内塑胶跑道中添加最为广泛的OPEs.TEHP的浓度变化范围为ND~ $210.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,12号样品的含量最高,是含量较低的6号样品中($32.46 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)的6.47倍.TBEP只在3和4号采样点中检测到,含量分别为 69.16 、 $146.85 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.TCPP只在1号样品中检测到,含量为 $205.94 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.说明各学校塑胶跑道中

表2 塑胶跑道中OPEs的含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Contents of OPEs in the plastic tracks/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

编号	TnBP	TCEP	TCPP	TDCPP	TPHP	TBEP	TEHP	$\sum 7\text{OPEs}$
1	125.48	ND ¹⁾	205.94	ND	ND	ND	ND	331.42
2	256.01	ND	ND	ND	ND	ND	141.63	397.64
3	283.54	ND	ND	ND	ND	69.16	ND	352.7
4	93.79	ND	ND	ND	ND	146.85	ND	240.64
5	7.75	ND	ND	ND	ND	ND	44.62	52.37
6	44.12	ND	ND	ND	ND	ND	32.46	76.58
7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
8	462.18	ND	ND	ND	ND	ND	ND	462.18
9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	324.79	ND	ND	ND	ND	ND	210.10	534.89

1)表示未检出

OPEs 含量均不同,可能与生产厂家不同、跑道原料及生产工艺不同、塑胶跑道铺设年限不同等有关,但具体相关性还需要做进一步研究. 其中 TCPP 是毒性较大且难降解的氯代磷酸酯,虽然检出率不高,但需要引起关注,以降低其对人体健康可能带来的威胁.

另外, TBEP 和 TCPP 虽然在很少样品中查出,但是检测出来的含量均较大,分别达到了 $\sum 7\text{OPEs}$ 的 20% 以上. 成都市土壤中 OPEs 单体 TBEP 是含量最高的,其含量为总含量的 52% ~ 92%^[17]. 而塑胶跑道中 TnBP 所占比例较高, TBEP 较成都市土壤略低. 作为源样品的塑胶跑道产品和作为环境归宿之一的土壤受体样品中 OPEs 的分布有较大差异,说明成都市环境中 OPEs 的来源复杂多样.

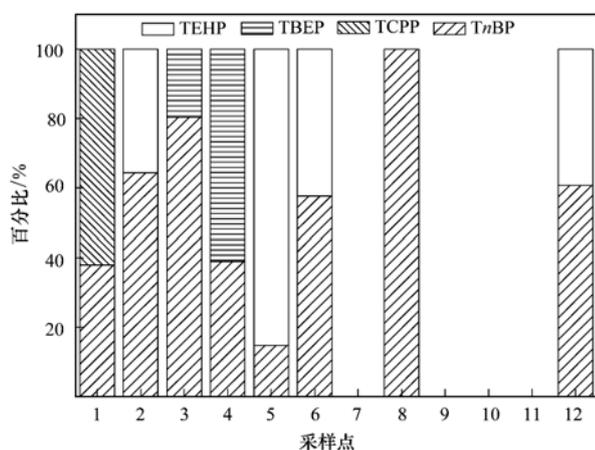


图3 塑胶跑道中 OPEs 的分布特征

Fig. 3 Distribution of OPEs in plastic tracks

2.4 风险评价

OPEs 进入人体的途径主要有经手-口摄入、呼吸摄入和皮肤接触. 针对本研究,对塑胶跑道中 7 种 OPEs 通过呼吸摄入、手-口直接摄入和皮肤接触引起的健康风险进行评估. 3 种暴露途径长期暴露日暴露剂量的计算公式如下^[18]:

$$\text{ADD}_{\text{oral}} = (C \times \text{IR} \times T \times C' \times \text{SA}) / (\text{BW} \times V)$$

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = (C \times \text{MR} \times \text{CA} \times T) / \text{BW}$$

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = (C \times M \times \text{TE} \times \text{SA}' \times \text{EF}) / \text{BW}$$

式中, ADD_{oral} 、 ADD_{inh} 、 $\text{ADD}_{\text{dermal}}$ 分别表示经手-口途径直接摄入、呼吸和皮肤接触的长期日暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C 表示塑胶跑道中 OPEs 的含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$); IR 为吸入率, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; T 为每日暴露的时间, $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$; C' 为释放到室内空气的速率, $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; SA 为接触面积, m^2 ; V 为人体周围空气体积, m^3 ; BW 为体重, kg ; MR 为迁移到手上

的迁移率, $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; CA 为皮肤接触面积, cm^2 ; M 为手-口接触迁移量, $\text{ng} \cdot \text{cm}^{-2}$; TE 为接触塑胶跑道的转移率, %; SA' 为每次手上的接触面积, cm^2 ; EF 为接触频率, $\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$.

参考剂量 (reference dose, RfD) 采用无明显损害作用水平,通过文献[18~20]获得. RQ 为风险熵值,即暴露途径中单个污染物的非致癌风险指数,用日均暴露剂量和参考剂量的比值计算: $\text{RQ} = \text{ADD} / \text{RfD}$. 当 $\text{RQ} \geq 1$ 时,则说明有健康风险, RQ 值越大,风险越大;当 $\text{RQ} < 1$ 时,则认为风险较小或可以忽略. 风险熵值 (RQ) 用每日摄入量与参考剂量的比值计算. 根据文献资料^[19~26],成人和儿童通过呼吸、皮肤接触以及手-口接触这 3 个主要途径摄入 OPEs,暴露剂量的计算参数如表 3 所示.

表3 不同暴露途径下塑胶跑道中 OPEs 暴露风险评估参数

Table 3 Parameters for OPEs exposure assessment from plastic runways in different exposure scenarios

项目	成人	儿童
$\text{IR}/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.62	0.31
$T/\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	2	2
$C'/\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	2.17×10^6	2.17×10^6
SA/m^2	5	5
V/m^3	65	65
BW/kg	59.5	30.8
CA/cm^2	131	300
$M/\text{ng} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.16×10^6	0.16×10^6
$\text{TE}/\%$	5	5
SA'/cm^2	30	20
$\text{EF}/\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$	—	28
$\text{MR}/\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	0.16×10^6	0.16×10^6

根据塑胶跑道中 OPEs 的平均含量分别计算成人和儿童所摄入的 OPEs 的日暴露剂量 (ADD) 和风险熵值 (RQ) (表 4). 由表 4 可以看出,成人通过 3 种途径的日均暴露总剂量 (以 BW 计) 为 $0.16 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,明显低于儿童通过 3 种途径的日均暴露总剂量 [$0.67 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]. 成人通过皮肤接触摄入的日均暴露剂量 [$0.14 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 明显大于呼吸摄入 [$1.72 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$],其中 TnBP 通过皮肤接触的日均暴露剂量 [$9.38 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 最大,其次为 TEHP [$2.52 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; 同样地,儿童通过皮肤接触的日均暴露剂量 [$0.64 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 最高,其次为手-口接触摄入途径 [$2.97 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$],3 种途径均以 TnBP 的日均暴露剂量最高. 故儿童对塑胶跑道中的 OPEs 摄入的日均暴露剂量明显高于成人,在塑胶跑道上玩耍通过皮肤接触和手-口摄入为主要摄入途

径. 由风险熵值也可以看出塑胶跑道中 OPEs 对成人和儿童的暴露风险均较小, 其中 TnBP 通过皮肤暴露的风险最大 (8.65×10^{-5}). 说明塑胶跑道中 OPEs 的对人体健康风险较低, 属于可接受范围.

表 4 塑胶跑道中 OPEs 在成人和儿童体内的日均暴露剂量和风险熵值

Table 4 Daily exposure assessment of OPEs via plastic tracks for adults and Children and RQ

项目		TnBP	TCEP	TCPP	TDCPP	TPhP	TBEP	TEHP	$\sum 7\text{OPEs}$ / $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	
ADD	成人	呼吸	1.12×10^{-2}	—	1.44×10^{-3}	—	—	1.52×10^{-3}	3.01×10^{-3}	1.72×10^{-2}
		皮肤	9.38×10^{-2}	—	1.21×10^{-2}	—	—	1.27×10^{-2}	2.52×10^{-2}	0.14
		手-口	— ¹⁾	—	—	—	—	—	—	—
	儿童	呼吸	5.45×10^{-3}	—	7.03×10^{-4}	—	—	7.38×10^{-4}	1.46×10^{-3}	8.36×10^{-3}
		皮肤	0.41	—	5.35×10^{-2}	—	—	5.61×10^{-2}	0.11	0.64
		手-口	1.94×10^{-2}	—	2.50×10^{-3}	—	—	2.62×10^{-3}	5.20×10^{-3}	2.97×10^{-2}
RQ	成人	呼吸	4.67×10^{-6}	—	1.81×10^{-7}	—	—	1.01×10^{-6}	—	—
		皮肤	2.39×10^{-4}	—	9.23×10^{-6}	—	—	5.16×10^{-5}	—	—
		手-口	—	—	—	—	—	—	—	—
	儿童	呼吸	2.27×10^{-6}	—	1.32×10^{-5}	—	—	7.38×10^{-5}	—	—
		皮肤	8.65×10^{-5}	—	3.34×10^{-6}	—	—	1.87×10^{-5}	—	—
		手-口	8.07×10^{-6}	—	3.12×10^{-7}	—	—	1.75×10^{-6}	—	—

1) 没有相关数据

各学校塑胶跑道中均有 OPEs 检出, 说明 OPEs 对于在跑道上运动和玩耍的人可能存在一定的健康风险. 各级各类学校、机关及社区等体育场地的塑胶跑道中的 OPEs 释放到操场空气中的含量及速率需开展进一步研究并进行风险评估. 对于跑道生产原料如废旧塑料回用中 OPEs 等新型污染物的含量等方面需要开展一定的研究及管理. 特别是对幼儿园这类抵抗力特别低下应特殊保护的人群和体育学院、中小学及高校运动场这种使用频率高的场所的塑胶跑道均应加强对 OPEs 的含量和组成进行一定的管控. 在塑胶跑道的生产和铺装过程中, 优先添加对环境及人类毒性小的烷基 OPEs, 同时应开发多类型、高性能、更环保型产品来分散 OPEs 的使用领域, 以降低环境风险.

3 结论

(1) 在 12 所学校塑胶跑道样品中, 2/3 的塑胶跑道含 OPEs, 多数跑道中添加的是 TnBP 和 TEHP, 除了在塑胶跑道中塑料的使用外, 还与环境介质中 OPEs 的污染有关, 另外与各学校塑胶跑道生产厂家、生产工艺、铺设年限的差别是否相关还需要进一步研究.

(2) 成人和儿童通过皮肤接触摄入的 $\sum 7\text{OPEs}$ 日均暴露剂量分布为 $0.14 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.64 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 儿童的日均总暴露剂量明显高于成人, 单体中 TnBP 的日均暴露剂量最高, 其次为 TEHP. 成人和儿童通过皮肤接触摄入 OPEs 的

风险熵值(RQ)均在 $10^{-7} \sim 10^{-5}$, 说明 OPEs 对人体健康的风险较小.

参考文献:

- [1] 佚名. 全视角“塑胶跑道”-“毒跑道”事件详解[J]. 聚氨酯, 2015, (11): 44-53.
- [2] 王晓伟, 刘景富, 阴永光. 有机磷酸酯阻燃剂污染现状与研究进展[J]. 化学进展, 2010, 22(10): 1983-1992.
Wang X W, Liu J F, Yin Y G. The pollution status and research progress on organophosphate ester flame retardants[J]. Progress in Chemistry, 2010, 22(10): 1983-1992.
- [3] Hoffman K, Butt C M, Webster T F, et al. Temporal trends in exposure to organophosphate flame retardants in the United States [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2017, 4(3): 112-118.
- [4] Wei G L, Li D Q, Zhuo M N, et al. Organophosphorus flame retardants and plasticizers; sources, occurrence, toxicity and human exposure[J]. Environmental Pollution, 2015, 196: 29-46.
- [5] Lu S Y, Li Y X, Zhang T, et al. Effect of E-waste recycling on urinary metabolites of organophosphate flame retardants and plasticizers and their association with oxidative stress [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 2427-2437.
- [6] Wolschke H, Sühling R, Xie Z Y, et al. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in the aquatic environment; a case study of the Elbe River, Germany [J]. Environmental Pollution, 2015, 206: 488-493.
- [7] Santín G, Eljarrat E, Barceló D. Simultaneous determination of 16 organophosphorus flame retardants and plasticizers in fish by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1441: 34-43.
- [8] Ma Y Q, Cui K Y, Zeng F, et al. Microwave-assisted extraction combined with gel permeation chromatography and silica gel cleanup followed by gas chromatography-mass spectrometry for the

- determination of organophosphorus flame retardants and plasticizers in biological samples[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, **786**: 47-53.
- [9] Su G Y, Letcher R J, Yu H X. Organophosphate Flame Retardants and plasticizers in aqueous solution: pH-dependent hydrolysis, kinetics, and pathways[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(15): 8103-8111.
- [10] Shoeib M, Ahrens L, Jantunen L, *et al.* Concentrations in air of organobromine, organochlorine and organophosphate flame retardants in Toronto, Canada[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 140-147.
- [11] 曹曙霞. 典型环境中有机磷酸酯阻燃剂和增塑剂的污染现状初步研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [12] 高小中, 许宜平, 王子健. 有机磷酸酯阻燃剂的环境暴露与迁移转化研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(2): 56-68.
- Gao X Z, Xu Y P, Wang Z J. Progress in environment exposure, transport and transform of organophosphorus flame retardants[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(2): 56-68.
- [13] 郭志明, 刘頔, 申铠君, 等. 太原市 PM_{2.5} 中有机磷阻燃剂初步研究: 污染特征及季节变化[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(6): 600-604.
- Guo Z M, Liu D, Shen K J, *et al.* Concentration and seasonal variation of organophosphorus flame retardant in PM_{2.5} of Taiyuan City[J]. *China Earth and Environment*, 2016, **44**(6): 600-604.
- [14] 刘静, 何丽雄, 曾祥英, 等. 珠江主干和东江河流表层沉积物中有机磷酸酯阻燃剂/增塑剂分布[J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(2): 436-443.
- Liu J, He L X, Zeng X Y, *et al.* Occurrence and distribution of organophosphorus flame retardants/plasticizer in surface sediments from the Pearl River and Dongjiang River[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(2): 436-443.
- [15] 隋强男, 翟玮, 耿存珍. 有机磷酸酯类阻燃剂在环境中的最新残留现状研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, **40**(10): 31-34.
- Sui Q N, Zhai W, Geng C Z. Research on residual of organophosphate ester flame retardants in environment [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, **40**(10): 31-34.
- [16] 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 等. 成都市大气 PM_{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3566-3572.
- Yin H L, Li S P, Ye Z X, *et al.* Pollution level and sources of organic phosphorus esters in airborne PM_{2.5} in Chengdu city[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3566-3572.
- [17] 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 等. 成都市土壤中有机磷阻燃剂的污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 606-613.
- Yin H L, Li S P, Ye Z X, *et al.* The pollution characteristic and sources of OPEs in the soil of Chengdu city[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 606-613.
- [18] 吕任生, 黄启飞, 杨玉飞, 等. 日用塑料制品中 PBDEs 的污染特征及其人体健康暴露风险[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(1): 74-81.
- Lv R S, Huang Q F, Yang Y F, *et al.* Distributions and risks of polybrominated diphenyl ethers in daily plastic products [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(1): 74-81.
- [19] US EPA. Example exposure scenarios [R]. Washington, DC: US EPA, 2004. 1-1436.
- [20] US EPA. Exposure factors handbook [R]. Washington, DC: US EPA, 2011.
- [21] 丁锦建. 典型有机磷阻燃剂人体暴露途径与蓄积特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [22] 李俊. 有机磷酸酯阻燃剂在饮用水及大气中的分布特征及健康风险评价[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [23] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- Li R Z, Zhou A J, Tong F, *et al.* Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [24] 环境保护部. 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, 2013.
- [25] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- Wang Z S, Duan X L, Liu P, *et al.* Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [26] US EPA. Child-specific exposure factors handbook [R]. Washington, DC: US EPA, 2008.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)