

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

## 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 ..... 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM<sub>2.5</sub> 的影响 ..... 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM<sub>2.5</sub> 分布影响因素及交互效应 ..... 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 ..... 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 ..... 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 ..... 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 ..... 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 ..... 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 ..... 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 ..... 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 ..... 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 ..... 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 ..... 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 ..... 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 ..... 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 ..... 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 ..... 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 ..... 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 ..... 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 ..... 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 ..... 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 ..... 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 ..... 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 ..... 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 ..... 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 ..... 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 ..... 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 ..... 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 ..... 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 ..... 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 ..... 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 ..... 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 ..... 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 ..... 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 ..... 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 ..... 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 ..... 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 ..... 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 ..... 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 ..... 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 ..... 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 ..... 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 ..... 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 ..... 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 ..... 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 ..... 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 ..... 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

# 青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征

刘丽娅, 印红玲\*, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

**摘要:** 于2019年12月在青藏高原东部边缘地带采集季节性冻土样品, 分析其有机磷酸酯(OPEs)的含量及分布特征, 并探讨其来源。结果表明, 7种目标OPEs, 磷酸三丁酯(TnBP)、磷酸三异辛酯(TEHP)、磷酸三丁氧乙酯(TBEP)、磷酸三苯酯(TPhP)、磷酸三氯乙酯(TCEP)、磷酸三氯丙酯(TCPP)和磷酸三(2,3-二氯丙基)酯(TDCPP)均检出。∑<sub>7</sub>OPEs在表层(0~10 cm)及次表层(10~20 cm)土壤样品中的含量(ng·g<sup>-1</sup>)分别为146.7~348.7(平均值231.1)和206.5~333.2(260.2)。该含量与城市土壤可比, 值得关注。TBEP和TDCPP是丰度较高的单体。OPEs的空间污染显著受到点源排放影响, 大气沉降对所有点位的OPEs输入有一定贡献。不同单体在土壤中的迁移程度差别较大, 芳基类的TPhP迁移趋势强于氯代OPEs。主成分分析表明, 青藏高原东部地区土壤中OPEs的主要来源有大气干湿沉降、人为带入的消费材料和汽车内饰物中OPEs的释放等。

**关键词:** 高原; 土壤; 有机磷酸酯(OPEs); 分布; 迁移; 来源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3549-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011196

## Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau

LIU Li-ya, YIN Hong-ling\*, JIAN Lin-jie, XU Zi-wen, XIONG Yuan-ming, LUO Yi, LIU Xiao-wen, XU Wei-xin

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

**Abstract:** In this study, soil samples were collected from the eastern edge of the Qinghai Tibet Plateau in December 2019. The level and distribution characteristics of organophosphate esters (OPEs) in seasonal frozen soil were analyzed, and their sources were discussed. The results showed that the target analytes including tri-n-butyl phosphate (TnBP), tris(2-ethylhexyl) phosphate (TEHP), tributoxyethyl phosphate (TBEP), triphenyl phosphate (TPhP), tri(2-chloroethyl) phosphate (TCEP), trichloropropyl phosphate (TCPP), and tris-(2,3-dichloropropyl) phosphate (TDCPP) were detected with 100% frequency. Levels of ∑<sub>7</sub>OPEs in topsoil (0-10 cm) and sub topsoil (10-20 cm) were 146.7-348.7 ng·g<sup>-1</sup> (mean: 231.1 ng·g<sup>-1</sup>) and 206.5-333.2 ng·g<sup>-1</sup> (mean: 260.2 ng·g<sup>-1</sup>), respectively. The ∑<sub>7</sub>OPEs content level is comparable to that of urban soil, which is worthy of attention. TBEP and TDCPP were the most abundant compounds in the plateau soil. Point source emissions have significant influence on the spatial distribution of OPEs, and regional deposition of OPEs contributes to all sampling sites. The migration ability of different OPE compounds in soil was different. Stronger migration ability was observed for aromatic OPEs (TPhP) than chlorinated OPEs. Principal component analysis showed that the main sources of OPEs in plateau soil were atmospheric wet and dry deposition, manufactured consumer materials, and the release of OPEs from automobile interior decoration.

**Key words:** plateau; soil; organophosphate esters (OPEs); distribution; migration; source

在多溴联苯醚被列入持久性有机污染物的名单后, 作为其替代品, 有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)的产量在世界范围内逐年提高, 是目前应用广泛且性能优异的一类阻燃剂。其中氯代磷酸酯和芳基磷酸酯常作为阻燃剂, 广泛应用于建材、纺织、化工、家具和电子等行业, 而烷基磷酸酯因与多种树脂、合成橡胶相容性好和抗菌性强, 主要用于油漆、涂料、地板蜡和胶水等材料<sup>[1,2]</sup>。目前, OPEs已在空气<sup>[3,4]</sup>、水体<sup>[5,6]</sup>、土壤<sup>[7,8]</sup>、植物<sup>[9]</sup>和生物<sup>[10,11]</sup>中广泛检出, 且在远离城市和人群的偏远农村<sup>[12]</sup>、高海拔地区<sup>[3]</sup>和极地环境<sup>[13]</sup>中均被检出。

目前, 国内针对OPEs的研究大多集中在经济发达、人口密集的沿海经济带, 而对地广人稀、经济欠发达的高原地区OPEs的研究甚少。高原地区环

境特殊, 是气候变化的“敏感区”和“放大器”。在全球变暖的持续影响下, 高原冰冻圈正发生着剧烈的变化, 包括冰川和多年冻土加速退缩、冰川径流增加等。气候变化和碳循环会促使有机物在极寒地区的再迁移, 当部分具有致癌、致畸性且只有人为源的OPEs在高原冻土中积累并发生二次迁移时, 其潜在的生态环境效应值得关注。本研究选取环境中最常见且毒性相对较大的7种目标OPEs, 通过调研受人类扰动显著、生态环境较脆弱的青藏高原东部边缘

收稿日期: 2020-11-23; 修订日期: 2020-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41773072, 21407014); 四川省科技厅项目(2019YFS0465)

作者简介: 刘丽娅(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境监测, E-mail: 1101016015@qq.com

\* 通信作者, E-mail: yhl@cuit.edu.cn

地带季节性冻土的表层及次表层土壤样品中 OPEs 的污染水平及分布,分析 OPEs 在高原土壤中空间特异性的主要影响因素;通过主成分分析法探析其主要来源.本研究结果可补充高原地区 OPEs 的研究空白,对深入探讨 OPEs 的环境行为及其污染防控具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

高原冻土样品采集:本研究所有采样点位于青藏高原东部边缘地带,南北跨度约 500 km,在不同纬度但大致同一经度(经度差不超过 $0.84034^\circ$ )上选择 8 个采样点采集高原冻土样品.各采样点海拔高度均在 3 000 m 以上,且各点位离交通干道有 2 km 以上直线距离,尽可能避免交通影响.其中位于中低纬度的 2 号样点靠近机场,4 号样点位于牧草良种繁殖场,它们可反映高原地区的特征点源输入.其余 6 个点位周边均无明显点源.5 号和 6 号点均位于青海湖中部.由于青海湖景区入口在南边,游客往来众多,人为干扰较大,且入口点东侧临近湟源县农业区,为避免与 4 号点位特征重复,故将采样点位北移,5 号点位代表临湖样点,而 6 号点位代表青海湖中部正常土壤点位.各采样点位的典型性及代表性良好.采样时间为 2019 年 12 月,天气晴,土壤上均覆盖积雪,为高原冻土.受冰冻条件所限不便采集剖面深层土壤,故在研究区域内采集了表层(0~10 cm)及次表层土壤(10~20 cm)样品.采用梅花形布点法采样,“四分法”缩分至每个采样点保留 1 kg 左右的混合样品,作为 1 个土壤样品.采样点信息如表 1 和图 1 所示.

表 1 采样点信息

Table 1 Information about the sampling sites

编号	经度 E/( $^\circ$ )	纬度 N/( $^\circ$ )	海拔/m
1	101.032 70	33.822 64	3 608.5
2	100.639 55	34.674 28	3 322.5
3	100.822 03	34.839 37	3 563.3
4	100.637 44	35.254 51	3 249.0
5	100.863 04	36.939 76	3 118.4
6	100.839 45	36.996 55	3 159.3
7	100.231 90	37.399 07	3 421.0
8	100.192 36	38.122 90	3 092.2

### 1.2 样品前处理及分析

采集的样品带回实验室冷冻干燥,过 100 目筛,四分法取样.准确称取 1.000 0 g 土样置于具塞磨口试管中,加入 1 勺铜粉,20 mL 乙酸乙酯:丙酮(3:2,体积比)的萃取剂浸泡 12 h,超声(超声波清洗器 DL-60A)30 min 并将萃取液倒入玻璃离心管中,再

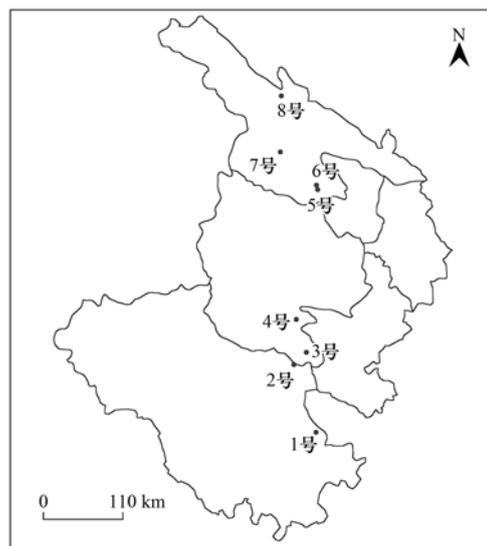


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

加入 10 mL 萃取剂超声 15 min,合并萃取液,3 000  $r \cdot \min^{-1}$ 离心 5 min,取上清液至浓缩瓶中真空浓缩(真空蒸发浓缩仪 R-215/V-700,瑞士步骐)至近干,经硅胶-氧化铝-无水硫酸钠层析柱分离净化,10 mL 正己烷淋洗杂质后,用 20 mL 乙酸乙酯:丙酮(3:2,体积比)洗脱目标化合物,洗脱液用真空浓缩仪浓缩至近干,正己烷定容至 200  $\mu\text{L}$ ,上机进样.

仪器分析,气相色谱条件:SH-Rxi-5Sil-MS 毛细管柱(30.0 m  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$   $\times$  0.25 mm),进样温度 280 $^\circ\text{C}$ ,不分流进样,载气为高纯氦气,流速 1.00  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ .升温程序:50.0 $^\circ\text{C}$ (保持 1 min),以 15.00 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 200.0 $^\circ\text{C}$ (保持 1 min),以 4.00 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 250 $^\circ\text{C}$ ,以 20.00 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 300 $^\circ\text{C}$ (保持 4 min).MS 条件为:EI 源,SIM 模式,离子源温度为 200 $^\circ\text{C}$ ,接口温度为 280 $^\circ\text{C}$ .SIM 模式提取的目标物质为 TnBP、TCEP、TCPP、TDCPP、TPhP、TBEP 和 TEHP.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 和 125;TCEP:249、63、143 和 251;TCPP:125、99、201、277 和 157;TDCPP:75、99、191、209 和 381;TPhP:326、325、77 和 215;TBEP:85、100、199 和 299;TEHP:99、113 和 211.

### 1.3 质量控制与保证(QA/QC)

实验过程中通过空白实验(溶剂空白和土壤基质空白)、加标回收实验(溶剂加标和土壤基质加标)和精密密度实验进行质量控制与质量保证.每个样品均加入 50  $\mu\text{L}$  的 2  $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  的内标物:磷酸三苯酯- $d_{15}$ (TPhP- $d_{15}$ ),计算其回收率以保证数据的准确性.用外标法定量分析.在 0.1~2.0  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  质量浓度范围内各 OPEs 单体的标准曲线的回归方程呈

良好的线性关系 ( $r > 0.99$ ). 所有样品均做平行双样. 7 种 OPE 单体标准曲线的相关系数均大于 0.990. 样品中内标回收率及基质加标回收率为 74.0% ~ 125.0%. 每批样品分析一个基质空白样品. 空白样品中仅检出 TnBP 和 TEHP, 其含量均低于所有样品中所测含量的 5%, 可忽略不计. 仪器精度在 1.9% ~ 8.3% 之间, 质控良好.

## 2 结果与讨论

### 2.1 高原土壤中 OPEs 的含量

7 种 OPE 单体在高原地区土壤环境中检出率均为 100%, 表明该污染物在高原环境中广泛存在.

$\sum_7$  OPEs 在表层土中的含量范围、中位及平均值分别为 146.7 ~ 348.7、210.5 和 231.1  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . 该水平与广州城市土壤中 OPEs 含量 (平均值 250  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 相当<sup>[14]</sup>, 比北方农田土壤 (平均值: 6.72  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[15]</sup> 高 1 ~ 2 个数量级, 略高于中国居住区土壤中 OPEs 含量 (1.70 ~ 179  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>, 约为河北塑料垃圾回收区土壤 (平均值: 398  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[17]</sup> 和三峡库区消落带河岸土壤等工业污染区 (平均值: 498  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[18]</sup> 的 1/2. 前人研究报道远离点源的地区及远离城市中心的偏远农村地区 OPEs 水平相对较低<sup>[12,15]</sup>. 但是, 本研究中  $\sum_7$  OPEs 的含量水平比预期偏高, 它与多数城市环境土壤中 OPEs 的含量相当, 比同为背景区的北极土壤 [ $\sum_8$  OPEs: 1.33 ~ 17.5  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值 (7.11 ± 5.2)  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 以 dw 计] 中 OPEs 含量水平高一个数量级<sup>[19]</sup>. 说明高海拔地区 OPEs 污染已不再“背景”化, 城市环境的 OPEs 污染正逐渐向高海拔地区迁移. 该现象也被土耳其一项研究发现的高海拔地区的乌鲁达格山土壤中  $\sum$  OPEs 的含量 (379  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 显著高于临近的城市站点 (37  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 的结果证实<sup>[3]</sup>. 故 OPEs 在高原地区的污染及潜在生态风险值得关注.

从单体分布来看, TBEP (67.7 ~ 161.9  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 中位值 88.4  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 和 TDCPP (50.0 ~ 177.3  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 中位值 80.6  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 是表层土壤中丰度较高的 OPE 单体, 其含量水平显著高于其它 5 种单体 (单因素方差分析,  $P < 0.01$ , 见图 2). 本研究表层土中 TBEP 含量水平与以 TBEP 为优势单体的广州 (41 ~ 150  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[14]</sup>、河北 (92  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>、沈阳 (7 ~ 43  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[20]</sup> 和重庆 (3.1 ~ 149  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[21]</sup> 等地土壤中的含量相当. TBEP 属于烷基磷酸酯, 分子量较大且辛醇-水分配系数较高, 容易被土壤富集<sup>[20,21]</sup>. 此外, 它也是大气颗粒物中含量较高的物质<sup>[22]</sup>, 可通过干湿沉降进入土壤, 但 TBEP 在大气

中的半衰期仅为 2 d, 故不太可能通过气相进行长距离迁移传输; 同时, 在细颗粒物含量较低的青藏高原中通过颗粒相长距离迁移的可能性有限, 故其高含量主要受持续排放的局地源的影响, 如旅游人群使用及遗弃塑料垃圾等人类活动. TDCPP 主要用作家具和婴儿产品中的聚氨酯泡沫, 由于其成本较高, 在工业上应用较为局限<sup>[23]</sup>. 三峡库区消落带河岸土壤 (0.24  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[18]</sup>、重庆市土壤 (0.86  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[21]</sup> 和北京市道路周边土壤 (3.06  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[24]</sup> 均有较低的 TDCPP 含量, 这与本研究土壤环境中较高的 TDCPP 含量水平显著不同. TDCPP 是室内灰尘中主要的 OPEs 单体, 且从室内向室外大气环境中的转移过程十分显著<sup>[23]</sup>, 故 TBEP 和 TDCPP 在高原地区较高的含量水平主要与大气沉降及旅游人群的输入有关.

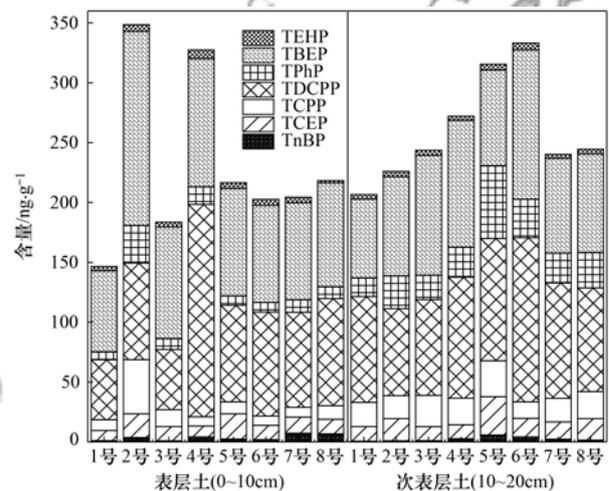


图 2 表层及次表层土壤中 OPEs 的含量及分布

Fig. 2 Levels and distribution of OPEs in surface and sub-surface soil

$\sum_7$  OPEs 在次表层土中的含量范围、中位及平均值分别为 206.5 ~ 333.2、244.0 和 260.2  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . 各单体含量 ( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 排序为 TDCPP (72.6 ~ 137.1, 中位值 92.4) > TBEP (65.7 ~ 124.6, 82.7) > TPhP (15.6 ~ 60.6, 26.3) > TCEP (13.8 ~ 30.1, 22.0) > TCEP (11.6 ~ 31.9, 16.9) > TEHP (3.9 ~ 13.4, 4.4) > TnBP (0.6 ~ 5.8, 2.5). 总体来说, 次表层土壤中单体分布与表层土相似性较强, 说明无特殊的污染来源.

将 7 种 OPEs 按取代基的不同分为烷基磷酸酯 (TnBP、TBEP 和 TEHP)、氯代磷酸酯 (TCEP、TCPP 和 TDCPP) 和芳基磷酸酯 (TPhP). 表层土中 3 种不同类型取代基 OPEs 在各点位的总含量及所占质量分数 ( $\omega$ ) 分别为氯代磷酸酯 ( $\sum_3$  OPEs = 915.8  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 占  $\sum_7$  OPEs 的 50%) > 烷基磷酸酯

( $\sum_3 \text{OPEs} = 834.3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 45%) > 芳基磷酸酯 (98.3  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 5%). 有研究指出<sup>[23]</sup>, 氯代磷酸酯 TCPP 和 TDCPP 挥发性较强, 加之二者的有机碳分配系数较高 (TCPP:  $\lg K_{oc} = 3.11$ , TDCPP:  $\lg K_{oc} = 3.97$ ), 故受 OPEs 污染较小的居民区土壤<sup>[16]</sup> 检出较高水平的 OPEs. 对于 TCEP 而言, 它的难降解特性是其在土壤中赋存含量较高的原因之一<sup>[23,24]</sup>. 次表层土中 3 种类型 OPEs 在各点位的总含量及  $\omega$  分别为: 氯代 OPEs ( $\sum_3 \text{OPEs} = 1072.4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 占  $\sum_7 \text{OPEs}$  的 52%) > 烷基 OPEs ( $\sum_3 \text{OPEs} = 733.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 37%) > 芳基 OPEs (235.7  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 11%). 与表层土相比, 烷基  $\omega(\text{OPEs})$  下降 8%, 而氯代和芳基  $\omega(\text{OPEs})$  分别增加 2% 和 6%, 说明理化性质的不同影响了 OPEs 在土壤不同深度中的分布.

本研究中  $\sum_7 \text{OPEs}$  在不同点位成对的表层-次表层土含量之间没有显著性差异 (独立样本  $t$  检验,  $P > 0.05$ ), 而单体 TPhP ( $r = 0.866$ ,  $P < 0.05$ ) 和 TCEP ( $r = 0.845$ ,  $P < 0.05$ ) 却在成对的样本中存在显著正相关关系, 说明 OPEs 在土壤中从表层到次表层存在纵向迁移. 为进一步描述这种迁移水平, 定义<sup>[9]</sup>:

$$C_s = C_{(10\sim20\text{cm})} / C_{(0\sim20\text{cm})} \times 100\%$$

式中,  $C_{(10\sim20\text{cm})}$  为各单体在次表层土 (10 ~ 20 cm) 中的含量 ( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),  $C_{(0\sim20\text{cm})}$  为各单体在 0 ~ 20 cm 的总含量 ( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ). 各单体在所有点位的  $C_s$  均值排序为: TPhP (65%) > TCPP (63%) > TCEP (55%)  $\approx$  TDCPP (54%) > TBEP (49%) > TnBP (47%)  $\approx$  TEHP (47%). 含芳基的 TPhP 向下层土壤的迁移趋势高于其它单体, 其次是氯代 OPEs. TPhP 辛醇-水分配系数较高 ( $\lg K_{ow} = 4.59$ ), 水溶性较低 (1.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 与土壤作用时, 会与土壤颗粒或者胶体强烈结合, 随着细颗粒物和胶体的优先迁移进入深层土壤<sup>[9]</sup>. 而挥发性和水溶性相对较高的氯代 OPEs (TCPP/TCEP) 可借助干湿沉降过程, 通过渗滤液迁移到更深的土壤区域<sup>[21]</sup>. 烷基类 OPEs 迁移率最低, 这与烷基 OPEs 容易被光照和土壤中的微生物降解<sup>[24]</sup> 有关.

## 2.2 高原土壤 OPEs 的空间分布

从空间分布来看, 表层土中 2 号和 4 号点位  $\sum_7 \text{OPEs}$  的含量水平显著高于其它点位 ( $P < 0.05$ ). 2 号点临近果洛玛依机场, 而机场是特征点源<sup>[25]</sup>, 航空运输会导致偏远地区 OPEs 的富集. TPhP 作为液压油广泛用于航空领域, 这与 TPhP (31.5  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 在 2 号点位显著高含量的事实一致.

4 号点位于同德县牧草良种繁殖场, 临近居民区, 人为的农业活动有明显贡献. 其余 6 个点位  $\sum_7 \text{OPEs}$  的含量水平均较低 (146.7 ~ 218.4  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ). 单因素方差分析表明这 6 个点位 (1、3 和 5 ~ 8 号)  $\sum_7 \text{OPEs}$  含量不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 表明无明显的未知点源, 而 6 个点位跨越了青海采样点的南北纵向, 说明大气沉降对研究区域土壤 OPEs 有显著贡献. 此外, 探究了空间地理要素经纬度和海拔高度与表层和次表层土中 7 种 OPEs 含量之间的相关性. 结果表明表层及次表层土中  $\sum_7 \text{OPEs}$  含量与经纬度和海拔之间均无相关性, 这一结果与部分其他污染物的研究结果不同, 如在偏远的落叶林地区土壤 (5 ~ 10 cm) 中 PBDEs 的含量随着纬度的增加而增加<sup>[26]</sup>.

## 2.3 来源分析

用主成分分析 (PCA) 对表层土及次表层土中 OPEs 进行来源解析. 结果表明, 表层土中 OPEs 的因子分析共提取两个主成分, PC1 (58.7%) 中 TCEP、TCPP、TPhP 和 TBEP 等单体的载荷较高, 而 TPhP 和 TCPP ( $r = 0.932$ ,  $P < 0.01$ ) 以及 TPhP 和 TBEP ( $r = 0.842$ ,  $P < 0.05$ ) 之间存在显著相关关系. 如前所述, TBEP、TCPP 和 TCEP 在室内灰尘和大气颗粒物中含量较高, TPhP 在电子设备中应用较多. 本研究所有点位均位于青海省的东部, 而东部是青海省年降水量最高的地区, 故表层土中 PC1 的来源可认为是干湿沉降和路面径流源<sup>[14]</sup>. PC2 (30.5%) 中 TnBP、TDCPP 和 TEHP 的载荷较高, 且 TDCPP 与 TnBP ( $r = 0.847$ ,  $P < 0.05$ ) 和 TDCPP 与 TEHP ( $r = 0.896$ ,  $P < 0.05$ ) 之间相关性显著. TDCPP 主要用作增塑剂、油漆和消泡剂等, 在汽车环境中具有高含量 (60 000  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[27]</sup>. TnBP 作为抗磨剂广泛用作汽车润滑油, 同时也是塑料和天然橡胶的重要组成部分<sup>[23]</sup>, 交通排放可能是土壤环境中 TEHP 的来源<sup>[25]</sup>. 因此 PC2 可认为是高原地区人为带入的消费材料和汽车等的综合贡献.

次表层土中 OPEs 的因子分析共提取两个主成分, PC1 和 PC2 分别解释方差的 59.5% 和 32.8%. PC1 中 TnBP、TCEP、TCPP 和 TPhP 等单体载荷较高, 而 TCEP 与 TnBP ( $r = 0.818$ ,  $P < 0.05$ )、TCPP ( $r = -0.912$ ,  $P < 0.05$ ) 和 TPhP ( $r = 0.865$ ,  $P < 0.05$ ) 之间显著相关. 与表层土中 PC1 高度相似的是, 次表层土 PC1 中 TCEP、TCPP 和 TPhP 依然具有较高的载荷, 且次表层土 PC1 中的 TnBP 与表层土 PC1 中的 TBEP 均为大气颗粒物中高丰度的单体, 说明次表层土和表层土的 PC1 来源一致, 次表层土中

PC1 主要来源于雨水洗刷后 OPEs 从表层土的向下渗透。PC2 显示 TDCPP、TBEP 和 TEHP 等单体的载荷较高,而 TDCPP 与 TEHP( $r=0.904, P<0.05$ )之间显著相关,TDCPP 和 TBEP 是高原地区 8 个采样点位中丰度最高的单体,而 TEHP 是所有单体中疏水性最高的物质,故该因子可归于土壤有机质的富集效应。

### 3 结论

(1)  $\sum_7$  OPEs 在青藏高原东部边缘地带冻土表层(0~10 cm)及次表层(10~20 cm)的含量分别为 146.7~348.7  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (平均值 231.1  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和 206.5~333.2  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (平均值 260.2  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )。该含量与多地城市土壤相当,高原地区 OPEs 的污染值得关注。

(2) TBEP 和 TDCPP 的含量显著高于其它单体。TPhP 向深层土壤迁移趋势最大,氯代 OPEs 的迁移能力强于烷基 OPEs。

(3) 受点源污染影响,表层土 OPEs 污染水平在 2 号和 4 号样点较高;而大气沉降对无点源污染点位的 OPEs 输入有显著贡献。

(4) 相关性分析及主成分分析表明高原地区土壤中 OPEs 主要来源于大气环境的干湿沉降,人为带入的消费材料和汽车的综合贡献。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Ma Y X, Xie Z Y, Lohmann R, *et al.* Organophosphate ester flame retardants and plasticizers in ocean sediments from the North Pacific to the Arctic Ocean[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(7): 3809-3815.
- [ 2 ] Wang T, Ding N, Wang T, *et al.* Organophosphorus esters (OPEs) in PM<sub>2.5</sub> in urban and e-waste recycling regions in southern China: concentrations, sources, and emissions [J]. *Environmental Research*, 2018, **167**: 437-444.
- [ 3 ] Kurt-Karakus P, Alegria H, Birgul A, *et al.* Organophosphate ester (OPEs) flame retardants and plasticizers in air and soil from a highly industrialized city in Turkey[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 555-565.
- [ 4 ] Yin H L, Liang J F, Wu D, *et al.* Measurement report: seasonal, distribution and sources of organophosphate esters in PM<sub>2.5</sub> from an inland urban city in southwest China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**: 14933-14945.
- [ 5 ] 吴迪, 印红玲, 李世平, 等. 成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1245-1251.
- Wu D, Yin H L, Li S P, *et al.* Pollution characteristics of OPEs in the surface water and sediment of the Jinjiang river in Chengdu city[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1245-1251.
- [ 6 ] Yin H L, Liu Q, Deng X, *et al.* Organophosphates (OPEs) in water, suspended particulate matter (SPM) and sediments of the Minjiang River [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2021, doi:10.1016/j.ccl.2021.02.023.
- [ 7 ] 邓旭, 印红玲, 何婉玲, 等. 有机磷酸酯在成都市市/郊区剖面土壤及农作物中的分布及迁移[J]. *环境化学*, 2019, **38**(3): 679-685.
- Deng X, Yin H L, He W L, *et al.* Distribution and migration of OPEs in soil profile and crops in urban and suburban areas of Chengdu [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(3): 679-685.
- [ 8 ] Yadav I C, Devi N L, Zhong G C, *et al.* Occurrence and fate of organophosphate ester flame retardants and plasticizers in indoor air and dust of Nepal; implication for human exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 668-678.
- [ 9 ] Cheng Z N, Wang Y, Wang S R, *et al.* The influence of land use on the concentration and vertical distribution of PBDEs in soils of an e-waste recycling region of South China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **191**: 126-131.
- [ 10 ] 侯敏敏, 史亚利, 蔡亚岐. 液液提取-固相萃取-高效液相色谱-串联质谱测定人体血液中 16 种有机磷酸酯[J]. *色谱*, 2021, **39**(1): 69-76.
- Hou M M, Shi Y L, Cai Y Q. Determination of 16 organophosphate esters in human blood by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry combined with liquid-liquid extraction and solid phase extraction [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2021, **39**(1): 69-76.
- [ 11 ] 董政, 马玉龙, 李珺琪, 等. 潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4212-4219.
- Dong Z, Ma Y L, Li J Q, *et al.* Occurrence and human exposure risk assessment of organophosphate esters in drinking water in the Weifang Binhai economic-technological development area [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4212-4219.
- [ 12 ] Ren G F, Chu X D, Zhang J, *et al.* Organophosphate esters in the water, sediments, surface soils, and tree bark surrounding a manufacturing plant in north China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 374-380.
- [ 13 ] Sun Y X, De Silva A O, Pierre K A S, *et al.* Glacial melt inputs of organophosphate ester flame retardants to the largest high arctic lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(5): 2734-2743.
- [ 14 ] Cui K Y, Wen J X, Zeng F, *et al.* Occurrence and distribution of organophosphate esters in urban soils of the subtropical city, Guangzhou, China[J]. *Chemosphere*, 2017, **175**: 514-520.
- [ 15 ] Ji Y, Wang Y, Yao Y M, *et al.* Occurrence of organophosphate flame retardants in farmland soils from Northern China; primary source analysis and risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 832-838.
- [ 16 ] He J H, Li J F, Ma L Y, *et al.* Large-scale distribution of organophosphate esters (flame retardants and plasticizers) in soil from residential area across China: implications for current level [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133997.
- [ 17 ] Wan W N, Zhang S Z, Huang H L, *et al.* Occurrence and distribution of organophosphorus esters in soils and wheat plants in a plastic waste treatment area in China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 349-353.
- [ 18 ] 杨婷. 邻苯二甲酸酯和有机磷酸酯在三峡库区消落带土壤污染特征及淹水释放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [ 19 ] Han X, Hao Y F, Li Y M, *et al.* Occurrence and distribution of organophosphate esters in the air and soils of Ny-Ålesund and London Island, Svalbard, Arctic [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114495.
- [ 20 ] Luo Q, Shan Y, Muhammad A, *et al.* Levels, distribution, and

- sources of organophosphate flame retardants and plasticizers in urban soils of Shenyang, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(31): 31752-31761.
- [21] He M J, Yang T, Yang Z H, *et al.* Occurrence and distribution of organophosphate esters in surface soil and street dust from Chongqing, China: implications for human exposure [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, **73**(3): 349-361.
- [22] Luo P, Bao L J, Guo Y, *et al.* Size-dependent atmospheric deposition and inhalation exposure of particle-bound organophosphate flame retardants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **301**: 504-511.
- [23] 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.
- [24] Gao L H, Shi Y L, Li W H, *et al.* Occurrence and distribution of organophosphate triesters and diesters in sludge from sewage treatment plants of Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 143-149.
- [25] 高立红. 北京市城市环境有机磷酸酯污染水平和分布特征研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [26] Hassanin A, Breivik K, Meijer S N, *et al.* PBDEs in European background soils: levels and factors controlling their distribution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(3): 738-745.
- [27] Brommer S, Harrad S, Van den Eede N, *et al.* Concentrations of organophosphate esters and brominated flame retardants in German indoor dust samples [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(9): 2482-2487.



## CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission .....	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM <sub>2.5</sub> Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period .....	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta Based on Grids .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration .....	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China .....	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China .....	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides .....	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake .....	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer .....	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City .....	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland .....	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou .....	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan .....	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface .....	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in Agricultural Region of Qingdao .....	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season .....	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments .....	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland .....	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay .....	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment .....	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China .....	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed .....	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles .....	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents .....	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants .....	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant .....	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge .....	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants .....	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR .....	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source .....	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System .....	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors .....	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure .....	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent .....	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 .....	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions .....	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil .....	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil .....	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province .....	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen .....	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil .....	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials .....	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau .....	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain .....	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost .....	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)