

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气PM ₁₀ 和PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对As(V)的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价

陈卫平¹, 彭程伟^{1,2}, 杨阳^{1,2}, 吴玉梅³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京市水文总站, 北京 100038)

摘要: 地下水有机氯 (OCPs) 和有机磷 (OPPs) 农药污染是水资源保护的重点问题. 应用固相萃取-气相色谱-质谱联用技术测定北京市 18 个地下水样品内 16 种有机氯和 6 种有机磷农药的含量. 北京市地下水检出 7 种 OCPs 和 2 种 OPPs. OCPs 以六氯苯、六六六和滴滴涕为主, 峰值分别为 82.4、193 和 158 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. OPPs 检出敌敌畏和乐果, 峰值分别为 7.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 17.7 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. OCPs 和 OPPs 检出点位多分布于污灌区. 不确定性评价显示北京市人群经饮水途径摄入 OCPs 和 OPPs 非致癌和致癌风险均在可控范围内, 其中 OCPs 非致癌和致癌风险均较高, 女性为较敏感受体. 对地下水中六六六和滴滴涕的监测应引起重视.

关键词: 地下水; 有机氯农药; 有机磷农药; Monte Carlo 模拟

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0117-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201705130

Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing

CHEN Wei-ping¹, PENG Cheng-wei^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, WU Yu-mei³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Monitoring Center of Beijing Water Environment, Beijing 100038, China)

Abstract: Pollution from organochlorine (OCP) and organophosphorus (OPP) pesticides in groundwater is a key issue for water resource protection. Sixteen kinds of OCP and six kinds of OPP pesticides were detected in 18 groundwater samples determined by GC-MS. Results showed that seven kinds of OCPs and two kinds of OPPs were found in the groundwater in Beijing. Among the OCPs, there were mainly hexachlorobenzene (HCB), hexachlorocyclopentadiene (HCH), and dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), with maximum values of, respectively, 82.4, 193, and 158 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. Among the OPPs, there were *o*, *o*-dimethyl-*o*-2,2-dichlorovinylphosphate and *o*, *o*-dimethyl methylcarbamoylmethyl phosphorodithioate, with maximum values of 7.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ and 17.7 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The OCPs and OPPs were found in the sewage irrigation areas. The results of a probabilistic risk assessment showed that the non-carcinogenic and carcinogenic risks of OCPs and OPPs within the drinking water in Beijing had been controlled, that risks from OCPs were higher, and that women were more sensitive to the toxicity of the pesticides. The monitoring of HCH and DDT in the groundwater should be implemented.

Key words: underground water; organochlorine pesticides; organophosphorous pesticides; Monte Carlo simulation

有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 为持久性有机污染物, 因其具有致癌作用而受到国际社会的广泛关注^[1,2]. 由于 OCPs 毒性大、迁移性强, 难降解^[3], 我国从 20 世纪 80 年代就禁止其使用, 但至今在很多区域土壤和水体中仍检测出 OCPs 残留^[4,5]. 有机磷农药 (organophosphorous pesticides, OPPs) 相对于 OCPs 降解周期短, 毒性小, 但仍有一些种类的 OPPs 属于高毒性有机污染物, 长期残留在环境中^[6~8], 并通过地表径流和淋溶等途径进入水环境造成污染. 地下水是人类生产、生活的重要水源. 近年来, 由于能源利用过程的加快和地下水的不合理开采, 地下水 OCPs 和 OPPs 污染在国内外均有报道^[9~11]. 地下水中 OCPs 和 OPPs 可通过饮水途径直接进入人体, 因此其危害不可

忽视.

地下水 OCPs 和 OPPs 污染风险评估系统具有随机性和不确定性^[12], 传统的指数评价难以充分反映区域水环境系统 OCPs 和 OPPs 污染风险水平^[13], 参考暴露参数的直接应用也使评价结果存在偏差^[14], 而以系统不确定性角度评估 OCPs 和 OPPs 在水环境系统累积风险有助于风险决策的科学性和合理性^[12~14]. 有关北京市地下水 OCPs 和 OPPs 含量及其分布的报道较少. 本文以北京市为研究区,

收稿日期: 2017-05-14; 修订日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173123); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室项目 (SKLURE2013-1-04)

作者简介: 陈卫平 (1976 ~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为生态风险评价, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

探索地下水 OCPs 和 OPPs 分布规律,并应用 Monte Carlo 模拟^[15]开展不确定性生态风险评价,其结果有助于地下水环境保护和可持续开发利用,并对地下水 OCPs 和 OPPs 污染研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

应用 QED(Sample ProTM 采样泵)低流量采样设备于 2016 年 8 月在北京采集地下水样品 19 个,点位用便携式 GPS 进行精确定位(图 1)。采样体积为 5 L,采样容器为棕色玻璃瓶,采样后立即加入 NaN_3 ($0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 以抑制微生物作用,密封后运回实验室冷藏,并于 24 h 内完成水样前处理。

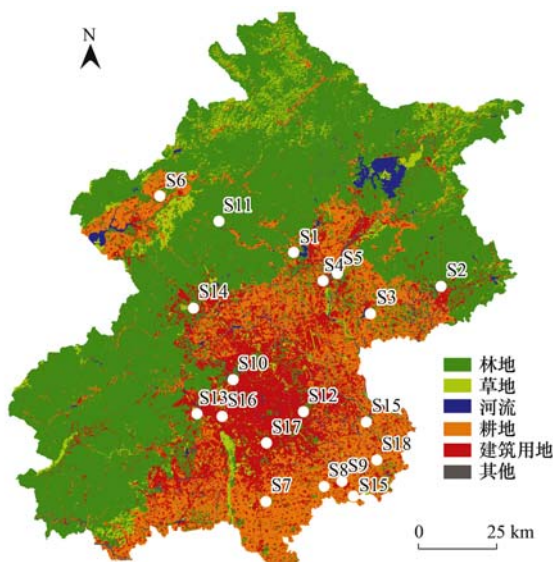


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Research area and distribution of sampling stations

1.2 样品分析

取已过滤的水样各 1 L,用 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 调节 pH 至小于 2,然后分别加入 $10 \mu\text{L}$ 浓度为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的替代物对于水样进行固相萃取,依次用 5 mL 二氯甲烷、5 mL 丙酮、10 mL 甲醇和 10 mL 超纯水活化 C18 固相萃取小柱。以 $10 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速富集完成后,用氮气干燥(同时抽真空)固相萃取柱 45 min,之后用 3 mL 丙酮和 3 mL 二氯甲烷洗脱固相萃取柱中的目标化合物于浓缩管中,后用氮气浓缩洗脱液至 0.5 mL,加入相应内标物,定容后用 GC-MS (Agilent, 78905975C, USA) 进行分析。有机氯和有机磷的内标分别为五氯硝基苯和磷酸三苯酯,替代物分别为十氯联苯和 1,3-二甲基-2-硝基苯。

OCPs 主要检测六六六(HCHs, 包括 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH 和 δ -HCH 共 4 种)、滴滴涕(DDTs, 包

括 p, p' -DDE、 p, p' -DDD、 p, p' -DDT、 o, p' -DDE、 o, p' -DDD、 o, p' -DDT 共 6 种)、硫丹[ESAs, 包括 α -ESA、 β -ESA 和硫丹硫酸酯(ESS)共 3 种]、七氯(HT)、环氧七氯(HTE)和六氯苯(HCB)等 14 种化合物。OPPs 主要检测敌百虫(DTR)、敌敌畏(DDVP)、乐果(DTT)、甲基对硫磷(PTM)、马拉硫磷(MTO)和对硫磷(PAT)等 6 种化合物。

有机磷和有机氯农药的 GC-MS 分析条件为: Agilent 7890-5975C, DB-5MS 色谱柱 (325°C , $30 \text{ m} \times 250 \mu\text{m} \times 0.25 \mu\text{m}$); 采用无分流进样(进样量 $1 \mu\text{L}$); 载气为高纯氮气; 进样口温度 280°C ; 检测器温度 290°C ; 采用程序升温, 初始温度 50°C , 保持 4 min, 以 $8^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 300°C , 保持 5 min。

1.3 质量控制

用空白样品和平行样品对处理和测定过程进行质量控制与保证。OCPs 回收率在 78.4% ~ 105.7% 之间, OPPs 回收率在 81.2% ~ 108.3% 之间, 方法空白未检出目标污染物。

1.4 评价模型

采用 USEPA 的污染物暴露模型对北京市各地地下水检测样点 OCPs 和 OPPs 所引起的成人健康风险进行健康风险评价。其中致癌风险值 CR (cancer risk) 计算公式为:

$$\text{CR}_i = (D_i \times \text{SF}_i) / \text{LT} \quad (1)$$

如果 CR_i 计算结果大于 0.01, 则按高剂量暴露方程计算:

$$\text{CR}_i = [1 - \exp(-D_i \times \text{SF}_i)] / \text{LT} \quad (2)$$

经直接饮水途径引起的非致癌风险指数 HI (health risk index) 计算公式为:

$$\text{HI}_i = [D_i \times 10^{-6} / (\text{RfD}_i \times \text{LT})] \quad (3)$$

通过饮水途径暴露的人日均暴露剂量(D_i)计算公式:

$$D_i = (\dot{I} \times c_i \times \text{TF}) / \text{BW} \quad (4)$$

式中, CR_i 为致癌物 i 经饮水暴露产生的人均年致癌风险(a^{-1}), HI_i 为致癌物 i 经饮水暴露产生的人均年非致癌风险(a^{-1}), D_i 为有毒物质 i 经饮水暴露的人日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$], c_i 为有毒物质测定浓度 ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$), $\dot{I}$ 为人群日均饮水体积(按男性和女性分开计算, $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$), SF_i 为致癌物 i 经饮水暴露的致癌斜率因子 ($\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$), LT 为人均寿命(a), BW 为人均体重(kg, 按男性和女性分开计算), RfD 为人均 Cd 摄入参考剂量(以 BW 计) [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], TF

为煮沸后有机物残留比(%),~表示随机模拟. 主要评价有毒物质模型参数^[16]见表1.

Monte Carlo 模拟常用在风险评价中来处理评估系统的随机性^[15]. 在健康风险评价中,*I* 多服从对数正态分布变量^[17,18], BW 和 AT 多服从正态分布变量. 在本文模拟中,*I* 为(3 080 ± 705) mL·d⁻¹ (男性, *n* = 354) 和(3 495 ± 970) mL·d⁻¹ (女性, *n* = 486)的对数正态分布变量, BW 为(65.1 ± 7.1) kg (男性, *n* = 354) 和(57.0 ± 6.0) kg (女性, *n* = 486)的正态分布变量, LT 为(78.3 ± 3.9) a (男性, *n* = 354) 和(82.2 ± 4.2) a (女性, *n* = 486)的正态分布变量. 饮用开水时 OCPs 和 OPPs 减少量(TF)为 50%^[16], *I*、BW 和 LT 数值均来自中国人群暴露手册(北京部分)^[19]. Monte Carlo 计算显示10 000次模拟时结果趋于稳定.

表1 模型选取参数

Table 1 Values of selected model parameters

种类	化合物	RfD /mg·(kg·d) ⁻¹	SF /kg·d·mg ⁻¹
OCPs	HCH	0.000 3	1.8
	DDT	0.000 5	1.8
	HTE	0.000 013	5.5
	HCB	0.000 8	5.5
OPPs	DDVP	0.000 5	0.29
	DTT	0.000 2	0.29

2 结果与讨论

2.1 有机氯农药浓度与分布

北京市地下水检测出 7 种 OCPs (β -HCH、 γ -HCH、*p*、*p'*-DDE、*p*、*p'*-DDT、CHT、HTE、HCB), HCB、 γ -HCH 和 *p*、*p'*-DDT 检出率最高, 分别为 44.4%、22.2% 和 16.7%. α -HCH、 δ -HCH、*p*、*p'*-DDD、*o*、*p'*-DDE、*o*、*p'*-DDD、*o*、*p'*-DDT、 α -ESA、 β -ESA 和 ESS 均未检出. 北京市地下水检出的 HCB、

γ -HCH 和 *p*、*p'*-DDT 平均浓度分别为 22.0、16.8 和 122 ng·L⁻¹, 峰值点位分别位于 S7 (82.4 ng·L⁻¹)、S14 (31.0 ng·L⁻¹) 和 S1 (158 ng·L⁻¹) (图 2). β -HCH、*p*、*p'*-DDE 和 HTE 等 3 种化合物只在单一样点检出, 检出样点分别为 S18 (190 ng·L⁻¹)、S2 (72.9 ng·L⁻¹) 和 S9 (78.4 ng·L⁻¹).

根据文献[20] (表 2), 北京地下水 HCH 检出点位 S13、S14 和 S18 属于 II 类水质, S17 属于 I 类水质; DDT 检出点位 S9 属于 II 类水质, S1、S2 和 S3 等 3 个检出点均属于 III 类水质; HCB 检出点位 S6、S7、S12、S17 和 S18 属于 II 类水质, 其它检出点位则均属于 I 类水质. 可见研究区大多样点适用于集中式生活饮用水水源. DDT 和 HCB 在区域样点峰值浓度显著高于太原市^[21]、粤桂琼区域^[22] 和东江流域^[16] 地下水中 DDT 和 HCB 含量(表 2), 具有一定的潜在污染风险. 值得注意的是 DDT 和 HCB 在样点 S18 (污灌区) 均有检出, 而样点 S4 (南水回灌区) OCPs 和 OPPs 均未检出, 由此可见污灌区地下水水质受到了污水回灌影响.

2.2 有机磷农药浓度与分布

北京市地下水 OPPs 检测出敌敌畏(DDVP) 和乐果(DTT), 检出率分别为 5.6% 和 16.7%. DTR、PTM、MTO 和 PAT 等 4 种化合物均未检出(图 2). 而 DTT 在 S13、S14 和 S16 等 3 个样点均检出, 其浓度水平从大到小依次为: S13 (17.66 ng·L⁻¹) > S14 (16.84 ng·L⁻¹) > S16 (16.14 ng·L⁻¹). 与粤桂琼区域^[8] 和东江流域^[16] 地下水中检出 OPPs 相比, 研究区地下水 DDVP 含量较高, DTT 含量与报道值较为相近.

OPPs 毒性小于 OCPs, 在施用后易被土壤及胶体吸附^[16]. 但是在研究区地下水仍检测出该两种化合物. DDVP 只在样点 S8 (污灌区样点) 检测出, 浓度为 7.05 ng·L⁻¹, 进一步证明污水灌溉对该点位

表2 北京市地下水 OCPs 和 OPPs 浓度特征

Table 2 Concentrations of detected OCPs and OPPs in groundwater in Beijing

种类	化合物	浓度水平/ng·L ⁻¹				
		最小值	最大值	平均值	地下水水质标准 ^[20]	
					Class I	Class II
OCPs	β -HCH	/	190	/	/	/
	γ -HCH	3.02	31.0	16.8	10	200
	HCHs	3.09	193	64.3	10	500
	HTE	/	72.9	/	10	40
	<i>p</i> 、 <i>p'</i> -DDE	/	78.4	/	/	/
	<i>p</i> 、 <i>p'</i> -DDT	103	158	122	/	/
	DDTs	78.4	158	111	10	100
	HCB	0.36	82.4	22.0	10	100
OPPs	DDVP	/	7.1	/	50	100
	DTT	16.1	17.7	16.9	50	16 000

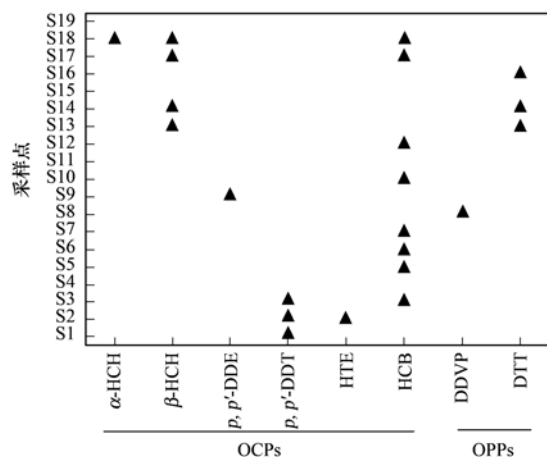


图2 研究区地下水各样点 OCPs 和 OPPs 检出概况

Fig. 2 Detected OCPs and OPPs in the groundwater samples collected from the study area

地下水产生了影响. S13、S14 和 S16 等 3 个样点均检出 DTT,且含量较为相近. 实地调查发现这 3 个样点周围种植了生菜、萝卜和白菜,为防病虫害,喷洒了多种 OCPs. 可见农业活动中残留的 DDVP 和 DTT 可经过迁移淋滤过程进入地下水环境. 研究区 DDVP 和 DTT 检出量均在地下水水质标准^[20]内 (Class I, 见表 2),但考虑到这两种农药在农业中的广泛应用,对 DDVP 和 DTT 的重点监测和对其迁移途径的进一步研究有助于地下水水质安全的保护.

2.3 OCPs 和 OPPs 健康风险评价

应用健康风险评价不确定性模型[公式(1)~(4)]和选取参数(表 1)计算研究区成人(男性和女性)通过饮水摄入 OCPs 和 OPPs 人均年非致癌风险和致癌风险. 结果显示[图 3(a)],研究区成人经饮水途径摄入 OCPs 非致癌风险主要集中在(25%~75% 分布)在 $3.1 \times 10^{-6} \sim 4.6 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ (男性)和

$3.6 \times 10^{-6} \sim 5.4 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ (女性)之间. 致癌风险[图 3(b)]主要集中在(25%~75% 分布)在 $2.6 \times 10^{-10} \sim 3.9 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (男性)和 $3.0 \times 10^{-10} \sim 4.6 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (女性)之间. 而相应地摄入 OPPs 非致癌风险[图 3(a)]主要集中在(25%~75% 分布)在 $5.0 \times 10^{-8} \sim 7.4 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ (男性)和 $5.8 \times 10^{-8} \sim 8.8 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ (女性)之间,致癌风险[图 3(b)]主要集中在(25%~75% 分布)在 $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.5 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ (男性)和 $2.9 \times 10^{-12} \sim 4.4 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ (女性)之间.

OCPs 的非致癌和致癌风险均显著高于 OPPs (图 3),但均小于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受水平($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$),可见北京水体中 OCPs 和 OPPs 对人体的健康风险较低,饮用危害较小. 成人中女性经饮水摄入 OCPs 和 OPPs 健康风险显著高于男性(图 3). 这可能与女性饮水量高 [$(3495 \pm 970) \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$]^[19],而体重较轻 [$(57.0 \pm 6.0) \text{ kg}$]^[19]有关. 文献[23]指出孕妇易受环境中农药暴露危害,并对胎儿造成影响. 因此地下水中 OCPs 和 OPPs 对女性,特别是孕妇造成的健康风险应引起重视.

2.4 高风险水平下 OCPs 及其主要化合物健康风险评价

考虑到 OCPs 的高毒性、难降解性和高风险水平(图 3),应用评价模型和选取参数评估研究区地下水最坏条件下(峰值浓度)OCPs 及其主要化合物的非致癌风险. 结果显示(图 4),高风险水平下研究区成人经饮水途径摄入 OCPs 非致癌风险主要集中在(25%~75% 分布)在 $3.4 \times 10^{-6} \sim 5.1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ (男性)和 $3.9 \times 10^{-6} \sim 5.9 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ (女性)之间. 其中,HTE 为高风险化合物[图 4(a)],对 OCPs 非

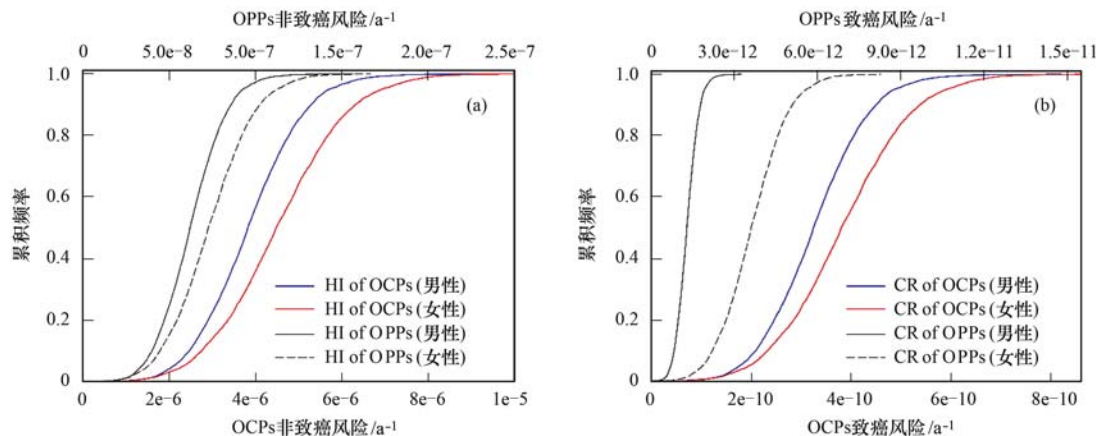


图3 研究区地下水 OCPs 和 OPPs 健康风险

Fig. 3 Health risk assessment of OCPs and OPPs in groundwater in Beijing

致癌风险贡献率高达 81%, 这与其高毒性 [$RfD = 0.000\ 013\ \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 显著相关 (表 1)。

其余 3 种化合物风险水平依次为 $\text{HCH} > \text{DDT} > \text{HCB}$ [图 4(b)]。HCH 与 DDT 的高风险与其在农业中广泛应用有关。这两种化合物虽然已被我国禁止生产和使用, 但结果显示 DDT 和 HCB 仍长期残留在环境中, 并进入了地下水系统。高风险条件下研究区人群经饮水摄入 OCPs 及主要化合物健康风险也均在可接受范围内 ($HI_{\max} < 5.0 \times 10^{-5}$

a^{-1}), 但考虑到 DDT 和 HCB 是致癌风险主要来源, 应加强对该两类化合物在水环境中的监测。与《地下水质量标准》^[20] 的对比常被用于水源地的管理, 该方法弱化了某些未超标高毒性的化合物可能造成的危害。定量的指数计算易造成信息量的丢失, 降低了风险评价的准确性。将水质评价、健康风险评价和不确定性模拟相结合有助于加强饮用水源地的风险管理, 制定和实施有效的污染物控制策略。

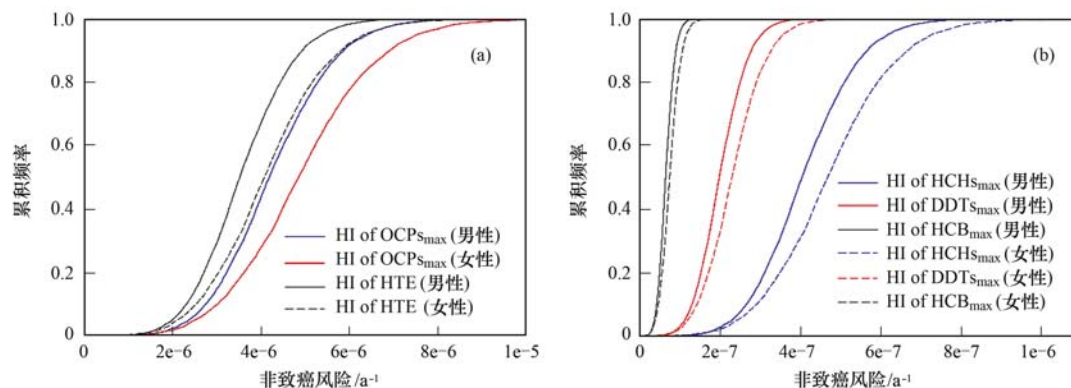


图 4 研究区地下水主要 OCPs 类化合物健康风险

Fig. 4 Health risk assessment from major OCPs in the groundwater in the study area

3 结论

北京市大部分样点适用于集中式生活饮用水水源, 有机氯农药和有机磷农药在个别样点检出, 检出量和检出样点与污水灌溉关系密切。北京市水体有机氯农药和有机磷农药对人体的健康风险较低, 区域人群经饮水途径摄入该两类化合物的非致癌和致癌风险均小于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受水平。有机氯农药毒性高且难降解, 农业活动中残留的有机磷农药也可经过迁移淋滤过程进入地下水环境, 因此应加强对该两类化合物在水环境中的监测。所构建的不确定性评价模型可同步提供区域地下水引用摄入有机氯农药和有机磷农药的健康风险水平和相应概率, 有一定的实用性。该方法与传统水质评价方法的联合使用更有助于对地下水水质安全的保护。

参考文献:

- [1] VoPham T, Bertrand K A, Hart J E, *et al.* Pesticide exposure and liver cancer: a review[J]. *Cancer Causes & Control*, 2017, **28**(3): 177-190.
- [2] Knauer K, Homazava N, Junghans M, *et al.* The influence of particles on bioavailability and toxicity of pesticides in surface water [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(4): 585-600.
- [3] Hernández Á R, Boada L D, Mendoza Z, *et al.* Consumption of

organic meat does not diminish the carcinogenic potential associated with the intake of persistent organic pollutants (POPs) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(5): 4261-4273.

- [4] Gonzalez M, Miglioranza K S B, Shimabukuro V M, *et al.* Surface and groundwater pollution by organochlorine compounds in a typical soybean system from the south Pampa, Argentina [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **65**(2): 481-491.
- [5] Cui L L, Wei L F, Wang J. Residues of organochlorine pesticides in surface water of a megacity in central China: seasonal-spatial distribution and fate in Wuhan [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(2): 1975-1986.
- [6] Karami-Mohajeri S, Abdollahi M. Toxic influence of organophosphate, carbamate, and organochlorine pesticides on cellular metabolism of lipids, proteins, and carbohydrates: a systematic review [J]. *Human & Experimental Toxicology*, 2011, **30**(9): 1119-1140.
- [7] Ripley B D, Braun H E. Retention time data for organochlorine, organophosphorus, and organonitrogen pesticides on SE-30 capillary column and application of capillary gas chromatography to pesticide residue analysis [J]. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists (USA)*, 1983, **66**(5): 1084-1095.
- [8] 刘昕宇, 汤嘉骏, 张茨, 等. 粤桂琼区域水源地有机磷农药的生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(7): 1130-1137.
- Liu X Y, Tang J J, Zhang Y, *et al.* Ecological risk assessment of organophosphorus pesticides in water source areas of guangdong, guangxi and hainan provinces [J]. *Research of Environmental*

- Sciences, 2015, **28**(7): 1130-1137.
- [9] Chaza C, Sopheak N, Mariam H, *et al.* Assessment of pesticide contamination in Akkar groundwater, northern Lebanon [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, doi: 10.1007/s11356-017-8568-6.
- [10] Kumar S, Kaushik G, Villarreal-Chiu J F. Scenario of organophosphate pollution and toxicity in India: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(10): 9480-9491.
- [11] Pirsahab M, Hossini H, Asadi F, *et al.* A systematic review on organochlorine and organophosphorus pesticides content in water resources [J]. Toxin Reviews, 2017, **36**(3): 210-221.
- [12] Bosgra S, Bos P M J, Vermeire T G, *et al.* Probabilistic risk characterization: an example with di (2-ethylhexyl) phthalate [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2005, **43**(1): 104-113.
- [13] Guo G H, Wu F C, He H P, *et al.* Ecological risk assessment of organochlorine pesticides in surface waters of Lake Taihu, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2013, **19**(4): 840-856.
- [14] Zolezzi M, Cattaneo C, Tarazona J V. Probabilistic ecological risk assessment of 1, 2, 4-trichlorobenzene at a former industrial contaminated site [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(9): 2920-2926.
- [15] Burmaster D E, Anderson P D. Principles of good practice for the use of Monte Carlo techniques in human health and ecological risk assessments [J]. Risk Analysis, 1994, **14**(4): 477-481.
- [16] 王若师, 张炯, 许秋瑾, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地有机污染物健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2874-2883.
- Wang R S, Zhang X, Xu Q J, *et al.* Health risk assessment of organic pollutants in typical township drinking water sources of Dongjiang River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(11): 2874-2883.
- [17] Swartjes F A, Versluijs K W, Otte P F. A tiered approach for the human health risk assessment for consumption of vegetables from with cadmium-contaminated land in urban areas [J]. Environmental Research, 2013, **126**: 223-231.
- [18] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究 [J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1329-1339.
- Duan X L, Wang Z S, Li Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water based on field measurement of exposure factors of Chinese people [J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1329-1339.
- [19] 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. 262-263, 765.
- [20] DZ/T 0290-2015, 地下水水质标准 [S].
- [21] 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 等. 太原市小店污灌区地下水多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 [J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 172-178.
- Li J L, Zhang C X, Wang Y X, *et al.* Pollution characteristics and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in groundwater at Xiaodian sewage irrigation area, Taiyuan city [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 172-178.
- [22] 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 等. 粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 [J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2131-2140.
- Yang Y X, Liu X Y, Zhan Z W, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of organochlorine pesticides in water source areas of Guangdong and Guangxi [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2131-2140.
- [23] 于海星, 吕沈亮, 郭剑秋, 等. 孕妇毒死蜱暴露水平评估及影响因素分析 [J]. 环境与健康杂志, 2015, **32**(9): 798-802.
- Yu H X, Lv S L, Guo J Q, *et al.* Exposure assessment and influencing factors of chlorpyrifos among pregnant women living in a county of Jiangsu province [J]. Journal of Environment and Health, 2015, **32**(9): 798-802.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F ₂ O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)