

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩译, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 李璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估

赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建*

(中国环境科学研究院国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012)

摘要: 有机磷酸酯(OPEs)作为溴代阻燃剂的替代品,在生产生活中被广泛使用,其环境污染和毒性效应受到广泛关注. 梳理中国七大典型流域水体中 OPEs 的含量水平和分布特征,计算中国成人、青少年和儿童的 OPEs 日均饮水暴露量,对其健康风险进行评估,并通过蒙特卡洛模拟方法评价了结果的可靠性. 检索整理了 12 种 OPEs 对水生生物的毒性效应浓度,构建物种敏感度分布(SSD)曲线,对生态风险进行评估. 结果表明,低等暴露水平下,七大流域 $\sum$ OPEs 的第 5 百分位浓度为 $52.61 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 中等暴露水平下,七大流域 $\sum$ OPEs 的中位浓度为 $499.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷酸三氯乙酯(TCEP)、磷酸三乙酯(TEP)和磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯(TDCP)为主要污染物; 高等暴露水平下,七大流域 $\sum$ OPEs 的第 95 百分位浓度为 $1904.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 是其中等暴露水平的 3.8 倍,长江流域的 $\sum$ OPEs 浓度最高. 健康风险评估表明,不同人群通过饮用水暴露于 OPEs 的非致癌风险均在可接受范围内. 磷酸三甲酯(TMP)、磷酸三异丁酯(TiBP)和 TCEP 是致癌风险的主要贡献者. 生态风险评估结果表明, TCEP 在高等暴露水平下存在中等生态风险; 磷酸三正丁酯(TnBP)在中等暴露水平下存在中等生态风险,在高等暴露水平下,有较高生态风险; 磷酸三苯酯(TPhP)在低中高 3 种暴露水平下的风险商均大于 1,有较高生态风险,需要重点关注.

关键词: 有机磷酸酯(OPEs); 七大流域; 分布特征; 风险评估; 蒙特卡洛

中图分类号: X131.2; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6700-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210293

Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China

ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, YANG Jiang-tao, LUO Ying, CAO Miao, SUN Shan-wei, GUO Chang-sheng, XU Jian*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Organophosphate esters (OPEs), as a substitute for brominated flame retardants, are widely used in production and life, and their environmental pollution and toxic effects have attracted widespread attention. In this study, the concentrations and distribution characteristics of OPEs in seven major drainage basins of China were sorted out. The average daily dose of OPEs in Chinese adults, adolescents, and children was calculated to assess the health risks, and the reliability of the results was evaluated using Monte Carlo simulation. The toxic effect concentrations of 12 OPEs on aquatic organisms were investigated, and the species sensitivity distribution (SSD) curve was constructed to assess the ecological risk. The results showed that the 5th percentile concentration of $\sum$ OPEs in the seven drainage basins was $52.61 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ under the low exposure scenario. The median concentration of $\sum$ OPEs in the seven basins was $499.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, with trichloroethyl phosphate (TCEP), triethyl phosphate (TEP), and triethyl phosphate (1,3-dichloro-2-propyl) esters (TDCP) as the main contaminants. Under the high exposure scenario, the 95th percentile concentration of $\sum$ OPEs in the seven basins was $1904.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 3.8 times that of the intermediate exposure scenario, and the Yangtze River Basin had the highest $\sum$ OPEs concentration under the high exposure scenario. The health risk assessment showed that the non-carcinogenic risk of OPEs exposure through drinking water was within acceptable limits for different populations. Trimethyl phosphate (TMP), triisobutyl phosphate (TiBP), and TCEP were the main contributors to cancer risk. The results of ecological risk assessment showed that TCEP had medium ecological risk at the high exposure level, tributyl phosphate (TnBP) had medium ecological risk under the intermediate exposure scenario, and there was higher ecological risk under the high exposure scenario. Triphenyl phosphate (TPhP) had a risk quotient greater than 1 under the low, intermediate, and high exposure scenarios, and there was a high ecological risk, which requires special attention.

Key words: organophosphate esters (OPEs); drainage basins of China; distribution characteristics; risk assessment; Monte Carlo

21 世纪初, 溴系阻燃剂 (brominated flame retardants, BFRs) 的某些种类因其持久性、生物积累性和高毒性在世界范围内被限制或禁止使用^[1]. 作为 BFRs 的主要替代产品, 有机磷酸酯 (organophosphate esters, OPEs) 具有良好物理化学性能和优异阻燃效果, 已在世界范围内大量使用^[2]. 2013 年, 全球 OPEs 的使用量达到 62 万 t^[3], 我国 OPEs 的年排放量从 2014 年的约 670 t·a⁻¹ 增长到 2018 年的 1 000 t·a⁻¹^[4]. OPEs 被广泛用作塑料^[5]、纺织品^[6]、家具^[7] 和建筑 (如室内装潢) 材

料^[8] 的添加剂, 其易通过挥发、浸出和产品使用磨损等过程释放进入环境^[9]. 目前 OPEs 已在污水^[10]、地表水^[11]、饮用水^[12]、沉积物^[13]、降雪^[14]、室内外空气和灰尘^[15], 甚至母乳、毛发和血

收稿日期: 2022-10-25; 修订日期: 2023-02-11

基金项目: 中央财政科技计划结余经费项目 (2021-JY-28); 科技部第二次青藏高原综合考察研究项目 (2019QZKK0608); 长江生态环境保护修复联合研究 (第二期) 项目 (2022-LHYJ-02-0202)

作者简介: 赵江陆 (1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染物的风险评价, E-mail: zhaojianglu2021@163.com

* 通信作者, E-mail: xujian@craes.org.cn

液中均有检出^[16],并表现出环境持久性、长距离迁移性和生物可利用性,对人体健康产生潜在威胁。OPEs 种类繁多且来源复杂,化合物之间性质差异大,目前关注较多的包括烷基类、卤代类和芳香类 OPEs^[17]。当前的研究多针对在局部区域 OPEs 的污染水平和分布特征进行分析,对 OPEs 在全国范围,尤其是典型流域水体中污染特征、人体健康风险及水生生态风险的了解还不充分。

我国幅员辽阔,河流众多,流域分布面积广,根据主要河流覆盖区域可划分为松辽、海河、黄河、淮河、太湖、长江和珠江这七大流域^[18]。OPEs 的污染与地区生产生活、自然地理和经济发展等有密切联系。本研究结合课题组前期研究成果,同时检索了近 12 年的相关研究,系统地分析和总结了我国七大典型流域水体中 OPEs 的污染水平和特征。基于美国环保署(US EPA)推荐的风险评估方法,对人体健

康风险进行评估,并通过蒙特卡洛模拟方法评价了结果的可靠性。通过构建物种敏感度分布(SSD)曲线对其生态风险进行评估,以期为我国水环境中 OPEs 的环境管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

以中英文检索词“有机磷酸酯”、“中国”和“河流”检索 Web of Science、Science Direct、中国知网和中国学位论文全文数据库等数据库,共检索出 939 篇文献,其中英文 787 篇,中文 152 篇。经筛选,获得发表于 2011 年 6 月至 2022 年 6 月的文献共 33 篇,覆盖中国七大流域主要河流、湖泊和水库中 25 种 OPEs 的检测数据 1 474 条。涉及的 25 种 OPEs 化合物有 12 种烷基磷酸酯,6 种卤代磷酸酯和 7 种芳香基磷酸酯,其名称和理化性质如表 1 所示。

表 1 25 种 OPEs 化合物名称及理化性质¹⁾
Table 1 Name and physicochemical properties of 25 OPEs

化合物种类	缩写	分子式	中文名称	CAS 号	lg K _{ow}	25℃时溶解度 /mg·L ⁻¹	25℃时蒸气压 /Pa
烷基磷酸酯	TMP	C ₃ H ₉ O ₄ P	磷酸三甲酯	512-56-1	-0.65	3.00 × 10 ⁵	113.00
	TEP	C ₆ H ₁₅ O ₄ P	磷酸三乙酯	78-40-0	0.80	5.00 × 10 ⁵	52.40
	TPnP	C ₉ H ₂₁ O ₄ P	磷酸三丙酯	513-08-6	2.67	827.00	3.20
	TtBP	C ₂₁ H ₂₇ O ₄ P	磷酸三异丁酯	126-71-6	3.60	3.72	1.72
	TBEP	C ₁₈ H ₃₉ O ₇ P	磷酸三丁氧基乙酯	78-51-3	3.65	1 200.00	1.64 × 10 ⁻⁴
	TEHP	C ₂₄ H ₅₁ O ₄ P	磷酸三辛酯	78-42-2	4.22	2.00 × 10 ⁻⁶	1.10 × 10 ⁻⁵
	TnBP	C ₁₂ H ₂₇ O ₄ P	磷酸三正丁酯	126-73-8	4.00	280.00	0.15
	TiPP	C ₉ H ₂₁ O ₄ P	磷酸三异丙基酯	513-02-0	2.12	501.50	0.027
	TBOEP	C ₁₈ H ₃₉ O ₇ P	磷酸三(2-丁氧基)乙酯	78-51-3	3.75	NA	NA
	DNBP	C ₈ H ₁₉ O ₄ P	磷酸二丁酯	107-66-4	2.29	430.10	0.13
	TPeP	C ₁₅ H ₃₃ O ₄ P	磷酸三正戊酯	2528-38-3	5.29	0.33	0.093
	THP	C ₁₈ H ₃₉ O ₄ P	磷酸三己基酯	2528-39-4	6.76	1.0 × 10 ⁻⁵	3.29 × 10 ⁻⁴
卤代磷酸酯	TCEP	C ₆ H ₁₂ Cl ₃ O ₄ P	磷酸三氯乙酯	115-96-8	1.44	7 000.00	1.10 × 10 ⁻⁴
	TCPP	C ₉ H ₁₈ Cl ₃ O ₄ P	磷酸三氯丙酯	13674-84-5	2.59	1 600.00	8.17
	TDCP	C ₉ H ₁₅ Cl ₆ O ₄ P	磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯	13674-87-8	3.80	1.50	9.80 × 10 ⁻⁶
	V6	C ₁₃ H ₂₄ Cl ₆ O ₈ P ₂	四(2-氯乙基)二氯异戊基二磷酸酯	38051-10-4	1.90	2.10	0.23
	BDCIPP	C ₁₆ H ₁₁ Cl ₄ O ₄ P	双(1,3-二氯-2-丙基)磷酸酯	72236-72-7	2.18	130.00	0.27
	TDBPP	C ₉ H ₁₅ Br ₆ O ₄ P	磷酸三(2,3-二溴丙基)酯	126-72-7	NA	NA	0.19
芳香基磷酸酯	TPhP	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P	磷酸三苯酯	115-86-6	4.59	1.90	8.40 × 10 ⁻⁴
	CDPP	C ₁₉ H ₁₇ O ₄ P	磷酸甲苯二苯酯	26444-49-5	5.25	0.23	2.61 × 10 ⁻³
	TCrP	C ₂₁ H ₂₁ O ₄ P	磷酸三甲苯酯	563-04-2	6.34	1.84 × 10 ⁻²	8.00 × 10 ⁻⁵
	EHDPP	C ₂₀ H ₂₇ O ₄ P	磷酸三(2-乙基己基二苯基)酯	1241-94-7	6.64	1.90	8.65 × 10 ⁻⁵
	DPHP	C ₁₂ H ₁₁ O ₄ P	磷酸二苯酯	838-85-7	2.88	82.38	0.12
	ToCP	C ₂₁ H ₂₁ O ₄ P	三邻甲苯磷酸酯	1330-78-5	5.11	0.36	0.13
	TPPO	C ₁₈ H ₁₅ OP	三苯基氧化磷	791-28-6	2.83	62.76	0.15

1) NA 表示未查到相关数据

七大流域的1 474条数据中,松辽流域 94 条、海河流域 215 条、黄河流域 98 条、淮河流域 71 条、太湖流域 188 条、长江流域 634 条和珠江流域 174 条。依照风险评估最大化原则,原始数据小于检测限(limit of detection, LOD) 的以其 1/2 LOD 计入统计分析^[19]。

1.2 健康风险评估方法

文献检索出的部分 OPEs 未存在于所有流域,为了保证评估结果的准确性,以检索结果存在于 5 个及 5 个以上流域为筛选原则,共筛选出常见的 12 种 OPEs 进行风险评估。包括 7 种烷烃取代基磷酸酯,TMP、TEP、TPnP、TiBP、TBEP、TEHP 和 TnBP,

3 种氯代磷酸酯,TCEP、TCPP 和 TDCP,2 种芳香基磷酸酯,TPhP 和 CDPp.

本研究采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型,评价 OPEs 对人群的健康风险.水中 OPEs 经口摄入途径的暴露量,使用公式(1)计算:

ADD = (c × IR × EF × ED) / (BW × AT) = (c × IR × EF × ED) / (BW × 365 × ED) = (c × IR) / BW (1)

式中,ADD 为日均暴露量,ng·(kg·d)⁻¹; c 为污染物浓度,ng·L⁻¹; IR 为日均饮水摄入量,L·d⁻¹; EF 为饮水暴露频率,d·a⁻¹,取值均为 365 d·a⁻¹[20]; ED 为饮水暴露周期,a; BW 为体重,kg; AT 为终身饮水暴露时间,d.对于非致癌效应为 ED 对应的天数,对于致癌效应固定为25 550,即 70 a 对应的天数[21].在计算全国饮用水水中 OPEs 的暴露剂量和健康风险时,不同人群所参考的参数存在差异,模型中所用参数参见表 2,研究采取的人群参数值参照中国人群暴露参数手册[22~24].

表 2 不同人群饮水暴露的风险评估参数值¹⁾

Table 2 Parameters of daily intake via drinking water

组别		日均饮水摄入量 (IR)/L·d ⁻¹			体重 (BW)/kg
		P ₅	P ₅₀	P ₉₅	
儿童	男	0.26	0.75	1.70	17.00
	女	0.24	0.75	1.70	16.00
	全部	0.25	0.75	1.70	16.00
青少年	男	0.59	1.20	2.60	41.00
	女	0.55	1.10	2.60	39.00
	全部	0.57	1.20	2.60	40.00
成年人	男	0.70	2.0	5.40	65.00
	女	0.60	1.70	4.80	57.00
	全部	0.64	1.90	5.20	61.00

1) P₅、P₅₀ 和 P₉₅ 分别表示化合物浓度位置的 第 5 百分位、第 50 百分位和第 95 百分位

采用场景风险评估 (scenario-based risk assessment, SceBRA) 模式估算通过饮用水接触 OPEs 的污染物 ADD^[25].通过计算化合物浓度位置的 第 5 百分位 (P₅,最优情景)、第 50 百分位 (P₅₀,一般情景) 和第 95 百分位 (P₉₅,最差情景) 浓度作为风险评估基础参数,分别定义为低等暴露水平 (low exposure scenario, LES)、中等暴露水平 (intermediate exposure scenario, IES) 和高等暴露水平 (high exposure scenario, HES)^[26].基于 SceBRA 模式,计算分析低、中、高不同暴露水平下 OPEs 的日均暴露量.

非致癌风险使用 HQ (hazard quotient) 表征,经口摄入途径的 HQ,使用公式(2)计算:

HQ = ADD/RfD (2)

式中, HQ 为危害商; ADD 是日均暴露量,ng·(kg·d)⁻¹; RfD 为参考剂量,ng·(kg·d)⁻¹,见表 3.当 HQ ≥ 1 时,有非致癌风险; HQ < 1 时,认为无非致癌风险.

致癌风险使用 CR^[14] 表征,经口摄入途径的 CR,使用公式(3)计算:

CR = ADD × SF (3)

式中, CR 为致癌风险; ADD 为日均暴露量,ng·(kg·d)⁻¹; SF 为斜率因子,(kg·d)·ng⁻¹,见表 3; 当 CR ≥ 1 × 10⁻⁶ 时,有致癌风险; CR < 1 × 10⁻⁶ 时,认为无致癌风险. RfD 和 SF 的参数值通过文献 [27,28] 获得.

1.3 生态风险评估方法

OPEs 的生态风险根据欧盟委员会风险评估技术指导文件中的污染最严重情景进行评估^[28].采用风险商 (risk quotient, RQ) 对地表水中 OPEs 的生态

表 3 RfD 和 SF 的值¹⁾

Table 3 Values of RfD and SF

参数	单位	TMP	TEP	TPtP	TiBP	TBEP	TEHP	TnBP	TCEP	TCPP	TDCP	TPhP	CDPP
RfD	ng·(kg·d) ⁻¹	10 000	125 000	NA	NA	15 000	10 000	10 000	7 000	10 000	20 000	70 000	NA
SF	(kg·d)·ng ⁻¹	2 × 10 ⁻⁸	NA	NA	9 × 10 ⁻⁸	NA	3 × 10 ⁻⁹	9 × 10 ⁻⁹	2 × 10 ⁻⁸	NA	3.1 × 10 ⁻⁸	NA	NA

1) NA 表示未查到相关数据

风险进行评估,RQ ≥ 1,表示生态风险较高,0.10 ≤ RQ < 1 表示中等生态风险,RQ < 0.1,表示生态风险较低.计算公式如下:

RQ = MEC/PNEC (4)

式中, MEC 为水中 OPEs 污染物的实测浓度,ng·L⁻¹; PNEC 为预测的 OPEs 污染物无效应浓度,ng·L⁻¹.

12 种 OPEs 的毒性数据从现有毒性数据库 (例如 ECOTOX 数据库) 收集,数据筛选时遵循准确性、

相关性和可靠性原则^[29].选择测量终点是半数致死浓度 (LC₅₀) 或半数抑制浓度 (EC₅₀) 的毒性数据为急性毒性数据.对于慢性毒性数据,选择测试终点为无观察效应浓度 (NOEC) 的毒性数值.当 NOEC 数据不足时,使用最低效应浓度 (LOEC) 或 EC_{xx}、LC_{xx} 值 (如 EC₂₀、EC₁₀ 和 LC₂₀).同一物种在同一终点有多个值的情况下,计算几何平均值. SSD 曲线一般是根据 NOEC 转化的对数累积分布或基于急性数据 LC₅₀ 对数正态函数得到的^[30].当以获得 PNEC 为研

究目的时,用 NOEC 来计算 HC_5 (假定特定生态系统中 5% 的物种受到压力的危险浓度) 数值的生态意义更为明确^[31]. 本文用慢性毒性数据模拟 SSD 曲线,通过 EEC-SSD 软件包得出 HC_5 值,最终的 PNEC 由 HC_5 通过计算得出,公式如下:

$$PNEC = HC_5 / SF \quad (5)$$

式中, HC_5 为假定特定(生态)系统中 5% 的物种受到压力的危险浓度值, $mg \cdot L^{-1}$; SF 为安全因子,取保守估计值 5^[31].

由于在 12 种 OPEs 中,只有 TnBP 和 TPhP 的慢性毒性数据可以满足构建 SSD 曲线最低条件,因此剩余 10 种 OPEs 的 PNEC 选择最敏感物种的急性毒性数据与 AF (AF = 1 000) 相比^[32] 得出,计算公式如下:

$$PNEC = L(E)C_{50} / AF \quad (6)$$

式中, $L(E)C_{50}$ 为供试生物的半数致死(效应)浓度; AF 为评价因子,根据欧盟水框架指令,AF 取 1 000^[27].

1.4 蒙特卡洛模拟方法

本研究在计算健康风险时使用了全国范围内的污染物浓度数据,考虑到 OPEs 浓度和其他评估因素的可变性,为克服评价过程的不确定性,引入蒙特卡洛模拟以避免高估或低估健康风险^[33]. 使用 Oracle Crystal Ball 的蒙特卡洛模拟对 OPEs 的健康风险进行不确定性和敏感性分析^[34]. 用于通过饮水暴露途径计算 ADD 的输入参数如表 2 所示,并随机

模拟了 10 000 次,得出计算结果,估计了中等暴露水平下儿童的健康风险值.

2 结果与讨论

2.1 中国七大流域中 OPEs 污染现状

由图 1 可知 ($\sum$ OPEs、 $\text{chl-}\sum$ OPEs 和 $\text{ar-}\sum$ OPEs 分别表示烷基磷酸酯、氯代磷酸酯和芳香基磷酸酯),中等暴露水平 (P_{50}) 下,七大流域整体 $\sum$ OPEs 的 P_{50} 浓度水平为 $499.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 1),氯代磷酸酯占 $\sum$ OPEs 的 83.5%. 淮河、长江和太湖流域 $\sum$ OPEs 浓度分别为 112.86、215.26 和 $300 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,低于七大流域整体浓度水平;太湖、松辽和黄河流域 $\sum$ OPEs 浓度分别为 1 150、1 088.41 和 $758.73 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,检出浓度远高于七大流域整体浓度水平. 其中,松辽流域烷基磷酸酯和芳香基磷酸酯的浓度分别为 $36.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $18.85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,是七大流域整体浓度水平 ($19.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 1.85 倍和 5.39 倍.

在低等暴露水平 (P_5) 下,松辽流域的 $\sum$ OPEs 浓度达到 $1 014.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,为七大流域整体浓度水平 ($52.61 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 19 倍. 太湖流域的 $\sum$ OPEs 浓度达到 $499.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,恰好为七大流域整体 $\sum$ OPEs 的 P_{50} 浓度水平值,且为七大流域整体浓度

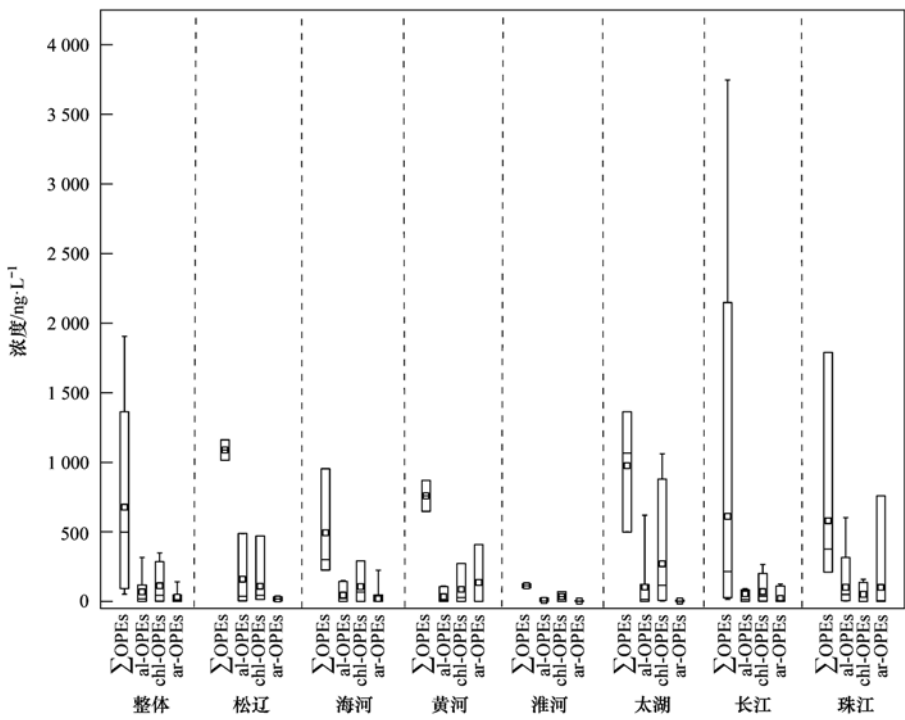


图 1 中国典型流域 OPEs 的浓度水平

Fig. 1 OPEs concentrations in typical river basins in China

水平($52.61 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)的 9.5 倍,表明松辽流域和太湖流域的 OPEs 本底浓度较高. 芳香基磷酸酯中的 TnBP 污染程度在松辽流域中占主导地位,大部分样本的 TnBP 浓度与文献报道的污水处理厂出水的浓度相当^[35],这表明城市污水处理厂的出水可能是地表水中 TnBP 的主要来源. 长期以来,受工业和农业发展影响,松辽流域内工业废水和农田退水量较大^[36],水功能区水质达标率低,重化工产业发达且沿江分布^[37],存在水环境风险隐患. 根据文献^[38]报道,随着流域水污染防治规划的实施,松辽流域省区不断加大松花江和辽河治理力度,流域水质状况持续好转. 太湖流域在七大流域中面积最小,仅是黄河流域的二十分之一,但人口密度为全国平均值 7 倍,是我国人口最集中的地区之一^[39]. 太湖是我国第二大淡水湖泊,地处长三角经济发达区,流域内主导经济是工业,主要有纺织、印染、电镀、医药和化工等企业,均是与 OPEs 相关的重点产业^[40],是太湖流域水资源 OPEs 含量较高的原因.

高等暴露水平(P_{95})下,七大流域整体 $\sum$ OPEs 的 P_{95} 浓度水平为 $1904.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,是中等暴露水平的 3.8 倍. 其中,长江流域 $\sum$ OPEs 浓度是中等暴露水平的 17 倍,由于长江流域在中等暴露水平下, $\sum$ OPEs 浓度($215.26 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)未高于七大流域整体浓度($499.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)水平,同时 P_5 低等暴露水平下 $\sum$ OPEs 浓度($14.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)远低于七大流域整体浓度($52.61 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)水平,所以其高等暴露水平下的 $\sum$ OPEs 浓度并非本底所致,可能是由流域内部分河段受 OPEs 污染所致. 长江流域面积大、覆盖城市多和工业密布是造成流域部分河段污染较严重的原因^[18]. 从七大流域整体来看,氯代磷酸酯的 P_{95} 浓度最高,为 $348.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,中位浓度为 $44.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,这与 TCEP 和 TCPP 是我国常见产品中被广泛使用的物质有关,且它们比非卤代 OPEs 更持久且更难去除^[41].

为分析 OPEs 浓度分布与人类活动的关系,收集了各个河流湖泊所流经城市的社会经济发展的相关参数. 收集的参数包括国内生产总值(GDP)、人均 GDP、人口、人口密度、土地面积、城镇化率和第三产业增加值. 以上数据均来源于益阳、长沙和岳阳等城市统计局.

根据社会经济因素,采用聚类分析方法对城市社会经济发展的相关参数进行识别. 将城市分为 6 类,结果如图 2. 北京、上海和广州分别被划分为第 1 类、第 2 类和第 3 类. 其余城市被划分为第 4 类、

第 5 类和第 6 类. 第 1 类、第 2 类和第 3 类的城市综合实力强于第 4 类、第 5 类和第 6 类. 这一分类与这些地区的社会发展状况相一致.

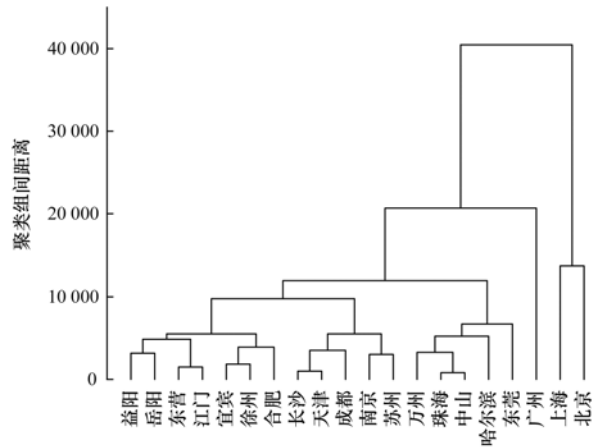


图 2 城市聚类分析

Fig. 2 City cluster analysis diagram

通过一元线性回归分析可知,OPEs 浓度分布与 GDP 之间存在显著正相关关系(如图 3). 说明人类活动对各流域 OPEs 污染的影响很大,经济社会发展水平越高,OPEs 的污染越严重^[42].

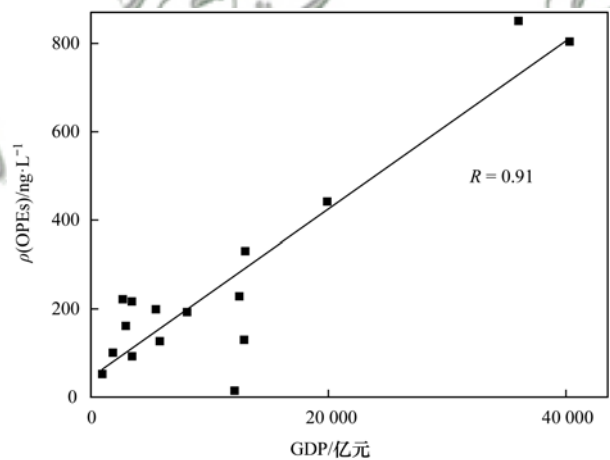


图 3 一元线性回归分析

Fig. 3 Unitary linear regression analysis

统计了七大流域的平均降水量和平均气温,数据分别来自水利部松辽水利委员会、水利部黄河水利委员会、水利部海河水利委员会、水利部淮河水利委员会、长江水利委员会水文局、水利部太湖流域管理局和水利部珠江水利委员会. 综合七大流域平均降水量和平均气温绘制图 4. 从图可知,除松辽流域外,各个流域的降水量和气温的变化趋势相同. 从 $\sum$ OPEs 的中位浓度来看,大小为:松辽流域 > 黄河流域 > 长江流域 > 珠江流域. 从降雨量和平均气温来看,大小为:松辽流域 < 黄河流域 < 长江流域 < 珠江流域. 污染物浓度与降雨量、气温呈负相关,这可能是由于降雨对污染物的稀释效应所致^[43],并

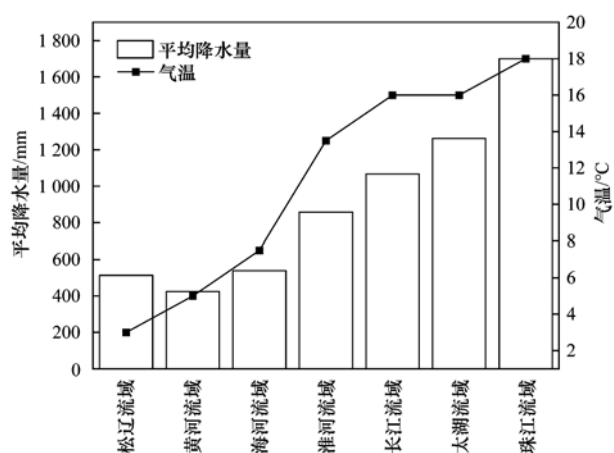


图4 七大流域气候条件

Fig. 4 Climatic conditions of seven river basins

且高温诱导的污染物降解速率增加^[44]。

2.2 饮水暴露 OPEs 健康风险评估

筛选出用于风险评估的 12 种 OPEs 的浓度水平如图 5 所示,根据浓度值计算出中、高等暴露水平下我国居民饮水的 ADD- $\sum$ OPEs 值、HQ 值和 CR 值如表 4 所示。中等暴露水平下,儿童、青少年和成人通过饮水摄入的 ADD- $\sum$ OPEs 分别为 22.15、14.18 和 14.72 $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。其中,TCEP、TEP 和 TCP 的暴露量最大,三者之和占 ADD- $\sum$ OPEs 的 80%。高等暴露水平下,儿童、青少年和成人通过饮水摄入的 ADD- $\sum$ OPEs 分别为 394.89、241.58 和 316.83 $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,是中等暴露水平的 17~22 倍。随着年龄的增长,体重的增加大于饮水量的增加,虽然儿童的饮水量最小,但体重所占权重较大,因此,青少年和成人的暴露量要高于儿童。但在中高等暴露水平下,青少年的饮用水摄入量 ADD- $\sum$ OPEs 值低于成人,表明我国青少年饮水量普遍低于建议量^[45]。

本研究统计了我国不同人群通过饮用水摄入 OPEs 在中等暴露水平和高等暴露水平的非致癌风险。我国居民摄入 OPEs 的 HQ 值($9 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-2}$)远小于 1,因此可以认为七大流域中 OPEs 通过饮水方式暴露对不同人群不具有非致癌风险。OPEs 单体风险商值按以下顺序递减:TCEP > TCP > TnBP > TMP > TDCP > TEP > TBEP > THEP > TPhP。

由于缺乏 SF 值,本研究对 TMP、TiBP、TEHP、TnBP、TCEP 和 TDCP 这 6 种单体 OPEs 进行致癌风险评估。结果表明,这 6 种单体在中等暴露水平下对不同人群的致癌风险($1.72 \times 10^{-10} \sim 2.05 \times 10^{-7}$)均在可接受范围内。但在高等暴露水平下,TMP

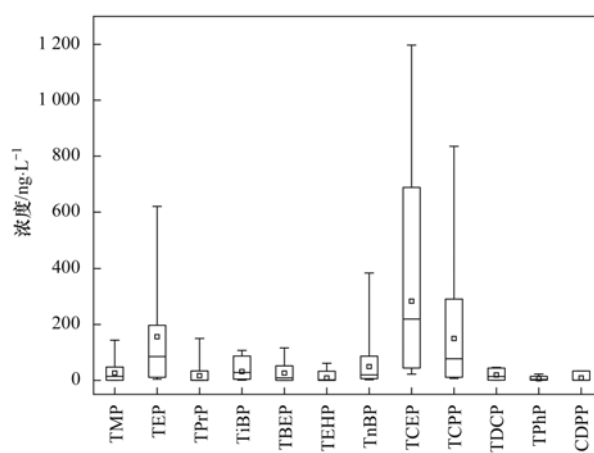


图5 12种OPEs的浓度水平

Fig. 5 Concentrations of 12 OPEs

(1.22×10^{-6}) 和 TiBP(1.03×10^{-6}) 对儿童有潜在的致癌风险。TCEP 对儿童、青少年和成人皆有潜在致癌风险,CR 分别为 2.54×10^{-6} 、 1.56×10^{-6} 和 2.04×10^{-6} 。因此,TMP、TiBP 和 TCEP 是致癌风险的主要贡献者。

2.3 七大流域 OPEs 的生态风险评价

运用 EEC-SSD 软件模拟出 TnBP 和 TPhP 的 SSD 曲线,并得出 HC₅ 值分别为 0.283 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.000 505 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。12 种 OPEs 的生态风险评估结果如表 5 所示。TCEP 在高等暴露水平下,风险商为 0.239,大于 0.1,存在中等生态风险。在中等暴露水平下,TnBP 的风险商为 0.346,存在中等生态风险,而在高等暴露水平下,其风险商为 6.78,有较高生态风险。TPhP 在低中高 3 种暴露水平下的风险商均大于 1,有较高生态风险,需要重点关注。剩余 9 种 OPEs 在低中高 3 种暴露水平下的风险商分别为 $1.43 \times 10^{-9} \sim 7.7 \times 10^{-2}$ 、 $2.05 \times 10^{-6} \sim 4.38 \times 10^{-2}$ 和 $2.05 \times 10^{-5} \sim 6.67 \times 10^{-2}$,均远低于 0.1,生态风险较低。

2.4 蒙特卡洛模拟和敏感性分析

通过蒙特卡洛模拟评估的儿童 $\sum$ HQ 和 $\sum$ CR 结果如图 6 所示。在中等暴露水平下,模拟出儿童的 $\sum$ HQ 为 0.004 47,显著低于 1,在可接受范围内。此外,6 种 OPEs 的 $\sum$ CR 为 7.06E-07,表明致癌健康风险可忽略不计。同时,儿童 $\sum$ HQ 计算值与蒙特卡洛模拟值的相对偏差为 15%, $\sum$ CR 计算值与蒙特卡洛模拟值的相对偏差为 23%,显示模型计算结果在可接受水平。由于七大流域覆盖面积广,数据群的标准偏差较大,每篇检索出的文献中所用的检测方法存在差异,是产生偏差的主要原因^[32]。

表 4 中国居民通过饮用水摄入 OPEs 的暴露量、非致癌风险商和致癌风险

Table 4 Daily exposure, hazard quotient, and carcinogenic risk of OPEs in Chinese people through intake drinking water

健康风险	化合物	儿童		青少年		成人	
		中等暴露情况	高等暴露情况	中等暴露情况	高等暴露情况	中等暴露情况	高等暴露情况
ADD /ng·(kg·d) ⁻¹	TMP	0.67	15.30	0.43	9.36	0.45	12.28
	TEP	3.99	65.88	2.55	40.30	2.65	52.85
	TPrP	0.03	15.39	0.02	9.42	0.02	12.35
	TiBP	1.32	11.41	0.84	6.98	0.88	9.16
	TBEP	0.41	12.33	0.26	7.54	0.27	9.89
	TEHP	0.09	7.02	0.06	4.30	0.06	5.63
	TnBP	0.92	40.79	0.59	24.95	0.61	32.73
	TCEP	10.27	127.19	6.57	77.81	6.82	102.05
	TCPP	3.61	88.72	2.31	54.28	2.40	71.18
	TDCP	0.65	4.92	0.42	3.01	0.43	3.95
	TPhP	0.15	2.40	0.10	1.47	0.10	1.93
	CDPP	0.03	3.54	0.02	2.17	0.02	2.84
	∑ OPEs	22.15	394.89	14.18	241.58	14.72	316.83
HQ	TMP	6.74E-05	1.53E-03	4.31E-05	9.36E-04	4.48E-05	1.23E-03
	TEP	3.19E-05	5.27E-04	2.04E-05	3.22E-04	2.12E-05	4.23E-04
	TBEP	2.70E-05	8.22E-04	1.73E-05	5.03E-04	1.80E-05	6.59E-04
	TEHP	9.00E-06	7.02E-04	5.73E-06	4.30E-04	5.95E-06	5.63E-04
	TnBP	9.19E-05	4.08E-03	5.88E-05	2.50E-03	6.10E-05	3.27E-03
	TCEP	1.47E-03	1.82E-02	9.39E-04	1.11E-02	9.74E-04	1.46E-02
	TCPP	3.61E-04	8.87E-03	2.31E-04	5.43E-03	2.40E-04	7.12E-03
	TDCP	3.26E-05	2.46E-04	2.09E-05	1.50E-04	2.16E-05	1.97E-04
	TPhP	2.21E-06	3.43E-05	1.41E-06	2.10E-05	1.47E-06	2.75E-05
CR	TMP	5.39E-08	1.22E-06	3.45E-08	7.49E-07	3.58E-08	9.82E-07
	TiBP	1.19E-07	1.03E-06	7.60E-08	6.28E-07	7.89E-08	8.24E-07
	TEHP	2.70E-10	2.11E-08	1.72E-10	1.29E-08	1.78E-10	1.69E-08
	TnBP	8.27E-09	3.67E-07	5.29E-09	2.25E-07	5.49E-09	2.95E-07
	TCEP	2.05E-07	2.54E-06	1.31E-07	1.56E-06	1.36E-07	2.04E-06
	TDCP	2.02E-08	1.53E-07	1.29E-08	9.33E-08	1.34E-08	1.22E-07

表 5 11 种 OPEs 的生态风险评估结果

Table 5 Ecological risk assessment results of 11 types of OPEs

目标化合物	毒性效应		生态风险 RQ		
	测试终点	PNEC/ng·L ⁻¹	低等暴露水平	中等暴露水平	高等暴露水平
TMP	LC ₅₀	7 010 000	1.43E-09	2.05E-06	2.05E-05
TEP	LC ₅₀	100 000	4.50E-05	8.52E-04	6.20E-03
TPrP	LC ₅₀	159 100	1.26E-07	4.53E-06	9.10E-04
TiBP	LC ₅₀	5 000	1.80E-04	5.63E-03	2.15E-02
TBEP	LC ₅₀	10 400	6.73E-06	8.32E-04	1.12E-02
TEHP	EC ₅₀	10 000	2.70E-06	1.91E-04	6.61E-03
TnBP	NOEC	56.6	4.19E-02	3.46E-01	6.78E+00
TCEP	LC ₅₀	5 000	4.43E-03	4.38E-02	2.39E-01
TCPP	NOEC	88.73	7.70E-02	8.68E-01	9.41E+00
TDCP	EC ₅₀	909.21	6.49E-04	1.53E-02	5.09E-02
TPhP	NOEC	0.101	6.53E+00	3.27E+01	2.24E+02
CDPP	EC ₅₀	500	8.60E-04	1.42E-03	6.67E-02

此外,进行敏感性分析以阐明不同因素对健康风险的贡献,如图 7 所示.在中等暴露水平下,IR(39.5%)和污染物浓度(21.4%)的增加,是增加水中 OPEs 对儿童 ∑HQ 的最主要因素.相反,BW(-39.2%)对非致癌风险有负面

影响,这意味着 BW 的升高会降低健康风险对 OPEs 的敏感性^[26].在中等暴露水平下,儿童 ∑CR 增加的主要因素是 IR(41.1%)和污染物的浓度(17.2%),同样 BW(-41.7%)起到负面影响.

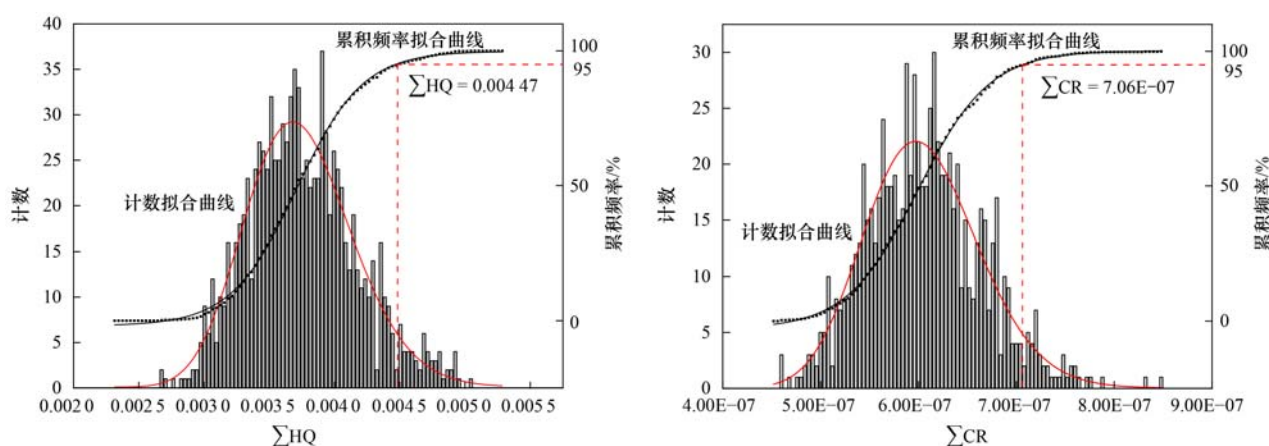


图6 中等暴露水平模拟的儿童饮水的 $\sum$ HQ 和 $\sum$ CR

Fig. 6 Simulated $\sum$ HQ and $\sum$ CR of children via drinking water under the intermediate-exposure scenario

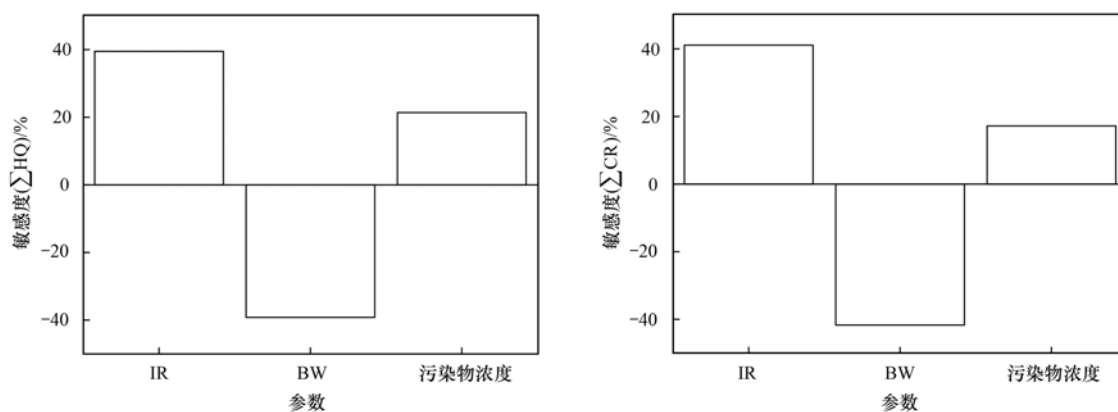


图7 中等暴露水平模拟的儿童饮水总非致癌风险和总致癌风险敏感度

Fig. 7 Sensitivity of simulated total target hazard quotient(HQ) and carcinogenic risk(CR) of children via drinking water under the intermediate-exposure scenario

3 结论

(1) 本文研究了我国七大流域 OPEs 的浓度水平和分布特征. 在低等暴露水平下, 松辽流域的 $\sum$ OPEs 浓度最高; 中等暴露水平下, 七大流域中 TCEP、TEP 和 TCP 为主要污染物; 高等暴露水平下, 七大流域整体 $\sum$ OPEs 是中等暴露水平的 3.8 倍, 长江流域 $\sum$ OPEs 浓度最高.

(2) 中等暴露水平下, 不同人群通过饮用水暴露于 OPEs 的非致癌风险均在可接受范围内. 而在高等暴露水平下, TMP 和 TiBP 对儿童有潜在的致癌风险, TCEP 对儿童、青少年和成人皆有潜在致癌风险.

(3) 生态风险评估结果表明, TCEP 在高等暴露水平下, 存在中等生态风险. TnBP 在中等暴露水平下存在中等生态风险, 在高等暴露水平下有较高生态风险. TPhP 在低、中、高这 3 种暴露水平下的风险商均大于 1, 有较高生态风险, 需要重点关注.

(4) 通过蒙特卡洛模拟中等暴露水平下儿童总的非致癌和致癌风险, 计算值与蒙特卡洛模拟值的相对偏差结果均在可接受水平.

参考文献:

- [1] 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 等. 青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3549-3554.
Liu L Y, Yin H L, Jian L J, et al. Pollution characteristics of organophosphate esters in frozen soil on the eastern edge of Qinghai-Tibet plateau [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3549-3554.
- [2] 张月. 国内外阻燃剂市场分析[J]. 精细与专用化学品, 2014, 22(8): 20-24.
Zhang Y. Global market analysis of flame retardant[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2014, 22(8): 20-24.
- [3] Lai N L S, Kwok K Y, Wang X H, et al. Assessment of organophosphorus flame retardants and plasticizers in aquatic environments of China (Pearl River Delta, South China Sea, Yellow River Estuary) and Japan (Tokyo Bay) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 371: 288-294.
- [4] He J, Wang Z X, Zhao L Y, et al. Gridded emission inventory of organophosphorus flame retardants in China and inventory validation [J]. Environmental Pollution, 2021, 290, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118071.
- [5] Schmidt N, Castro-Jiménez J, Fauvelle V, et al. Occurrence of

- organic plastic additives in surface waters of the Rhone River (France) [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113637.
- [6] Zhu H K, Al-Bazi M M, Kumosani T A, *et al.* Occurrence and profiles of organophosphate esters in infant clothing and raw textiles collected from the United States [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(6): 415-420.
- [7] Rodgers K M, Bennett D, Moran R, *et al.* Do flame retardant concentrations change in dust after older upholstered furniture is replaced? [J]. *Environment International*, 2021, **153**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106513.
- [8] 薛倩倩, 魏扬, 田瑛泽, 等. 2019—2020 年天津市津南区多环芳烃和有机磷阻燃剂气固分配特征及健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(1): 30-39.
- Xue Q Q, Wei Y, Tian Y Z, *et al.* Characteristics, gas-particle partitioning, and health risks of PM_{2.5}-bound PAHs and OPEs from 2019 to 2020 in Jinnan District, Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(1): 30-39.
- [9] Wang X L, Zhu L Y, Zhong W J, *et al.* Partition and source identification of organophosphate esters in the water and sediment of Taihu Lake, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 43-50.
- [10] Xu L, Hu Q P, Liu J, *et al.* Occurrence of organophosphate esters and their diesters degradation products in industrial wastewater treatment plants in China: implication for the usage and potential degradation during production processing [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**: 559-566.
- [11] Fries E, Püttmann W. Monitoring of the three organophosphate esters TBP, TCEP and TBEP in river water and ground water (Oder, Germany) [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2003, **5**(2): 346-352.
- [12] Stackelberg P E, Furlong E T, Meyer M T, *et al.* Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **354**(1): 93-97.
- [13] García-López M, Rodríguez I, Cela R. Development of a dispersive liquid-liquid microextraction method for organophosphorus flame retardants and plasticizers determination in water samples [J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, **1166**(1-2): 9-15.
- [14] Regnery J, Püttmann W. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in rain and snow from middle Germany [J]. *CLEAN*, 2009, **37**(4-5): 334-342.
- [15] Quintana J B, Rodil R, López-Mahía P, *et al.* Optimisation of a selective method for the determination of organophosphorous triesters in outdoor particulate samples by pressurised liquid extraction and large-volume injection gas chromatography-positive chemical ionisation-tandem mass spectrometry [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, **388**(5-6): 1283-1293.
- [16] Marklund A, Andersson B, Haglund P. Traffic as a source of organophosphorus flame retardants and plasticizers in snow [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3555-3562.
- [17] 何明靖, 杨志豪, 魏世强. 5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4604-4610.
- He M J, Yang Z H, Wei S Q, *et al.* Absorption characterization and the identification of factors influencing five organophosphate esters in water-soil system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4604-4610.
- [18] 王鑫璇, 张鸿, 王艳萍, 等. 中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 703-710.
- Wang X X, Zhang H, Wang Y P, *et al.* Contamination levels and exposure risk via drinking water from perfluoroalkyl acids in seven major drainage basins of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 703-710.
- [19] 刘殿甲, 吴宇峰, 张静, 等. 直接进样-LC-MS/MS 测定水中 16 种有机磷酸酯类化合物 [J]. *环境化学*, 2023, **42**(4): 1165-1175.
- Liu D J, Wu Y F, Zhang J, *et al.* Simultaneous determination of 16 organophosphates in waters by direct injection LC-MS/MS [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, **42**(4): 1165-1175.
- [20] 李旭, 刘杨, 吕佳佩, 等. 某城区降雪中 OPEs 污染特征与风险评估 [J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(6): 136-146.
- Li X, Liu Y, Lyu J P, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of organophosphate esters in snow of an urban area [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(6): 136-146.
- [21] WS/T 777-2021, 化学物质环境健康风险评估技术指南 [S].
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [23] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷: 0~5 岁) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [24] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷: 6~17 岁) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [25] 彭碧霞, 洪文俊, 李方方, 等. 浙江杭嘉湖地区水环境中全氟烷基化合物的污染特征及健康风险评估 [J]. *环境化学*, 2021, **40**(10): 3001-3014.
- Peng B X, Hong W J, Li F F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of perfluoroalkyl substances in aquatic environment of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou region in Zhejiang Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(10): 3001-3014.
- [26] Gebbink W A, Berger U, Cousins I T. Estimating human exposure to PFOS isomers and PFCA homologues: the relative importance of direct and indirect (precursor) exposure [J]. *Environment International*, 2015, **74**: 160-169.
- [27] Lv J P, Guo C S, Luo Y, *et al.* Spatial distribution, receptor modelling and risk assessment of organophosphate esters in surface water from the largest freshwater lake in China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **238**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113618.
- [28] Lian M S, Lin C Y, Li Y, *et al.* Distribution, partitioning, and health risk assessment of organophosphate esters in a major tributary of middle Yangtze River using Monte Carlo simulation [J]. *Water Research*, 2022, **219**, doi: 10.1016/j.watres.2022.118559.
- [29] Caldwell D J, Mastrocco F, Hutchinson T H, *et al.* Derivation of an aquatic predicted no-effect concentration for the synthetic hormone, 17 α -ethinyl estradiol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(19): 7046-7054.
- [30] 邢立群, 郑新梅, 刘红玲, 等. 中国主要河流中硝基苯生态风险研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 301-306.
- Xing L Q, Zheng X M, Liu H L, *et al.* Ecological risk assessment of nitrobenzene in main rivers of China [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 301-306.
- [31] Pennington D W. Extrapolating ecotoxicological measures from small data sets [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, **56**(2): 238-250.
- [32] 罗莹, 刘娜, 孙善伟, 等. 我国地表水中典型 DBPs 的暴露水

- 平及生态风险[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(4): 1806-1814.
- Luo Y, Liu N, Sun S W, *et al.* Occurrence and ecological risk of typical DBPs in Chinese surface water[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(4): 1806-1814.
- [33] Jafarzadeh N, Heidari K, Meshkinian A, *et al.* Non-carcinogenic risk assessment of exposure to heavy metals in underground water resources in Saraven, Iran: spatial distribution, monte-carlo simulation, sensitive analysis [J]. Environmental Research, 2022, **204**, doi: 10.1016/j.envres.2021.112002.
- [34] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [35] Martínez-Carballo E, González-Barreiro C, Sitka A, *et al.* Determination of selected organophosphate esters in the aquatic environment of Austria[J]. Science of the Total Environment, 2007, **388**(1-3): 290-299.
- [36] 吴计生, 吕军, 刘洪超, 等. 松辽流域河湖健康评估实践与启示[J]. 中国水利, 2022, (7): 74-76, 81.
- Wu J S, Lyu J, Liu H C, *et al.* Practice and enlightenment of rivers and lakes health assessment in the Songliao River Basin [J]. China Water Resources, 2022, (7): 74-76, 81.
- [37] 王博, 杨志强, 李慧颖, 等. 基于模糊数学和 GIS 的松花江流域水环境质量评价研究[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(6): 124-129.
- Wang B, Yang Z Q, Li H Y, *et al.* Identification of the Songhua River water quality using fuzzy synthetic evaluation and GIS approach[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(6): 124-129.
- [38] 张弛, 王明君, 于冰, 等. 松辽流域水资源综合调控研究进展与四大难题探究[J]. 水利学报, 2021, **52**(11): 1379-1388.
- Zhang C, Wang M J, Yu B, *et al.* Research progress of comprehensive water resources regulation and four major problems in Song-Liao River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, **52**(11): 1379-1388.
- [39] 蔡梅, 陆志华, 王元元, 等. 太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2575-2585.
- Cai M, Lu Z H, Wang Y Y, *et al.* Pollution characteristics of phosphorus in different media in taihu lake and its treatment enlightenment [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2575-2585.
- [40] 唐国平, 陈德超, 周涛, 等. 丹金溧漕河(溧阳段)水质特征分析[J]. 农村经济与科技, 2016, **27**(6): 1-2.
- [41] Xing L Q, Tao M, Zhang Q, *et al.* Occurrence, spatial distribution and risk assessment of organophosphate esters in surface water from the lower Yangtze River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2020, **734**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139380.
- [42] Wu Q Q, Liu S G, Chen P, *et al.* Microplastics in seawater and two sides of the Taiwan Strait: Reflection of the social-economic development[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, **169**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112588.
- [43] Knouft J H, Ficklin D L. The potential impacts of climate change on biodiversity in flowing freshwater systems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2017, **48**: 111-133.
- [44] Chen M, Jin X W, Liu Y, *et al.* Human activities induce potential aquatic threats of micropollutants in Danjiangkou Reservoir, the largest artificial freshwater lake in Asia [J]. Science of the Total Environment, 2022, **850**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157843.
- [45] Edmonds C J, Burford D. Should children drink more water?: the effects of drinking water on cognition in children [J]. Appetite, 2009, **52**(3): 776-779.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)