

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃疏铁矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙仡, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展

刘浩然¹, 邢静怡², 任文杰^{3*}

(1. 伦敦大学学院市政环境与岩土工程系, 伦敦 WC1E 6BT; 2. 西安市生态环境局长安分局, 西安 710199; 3. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

摘要: 全氟和多氟烷基物质(PFAS)是近年来备受关注的持久性有机污染物,具有种类多、难降解、远距离迁移和易生物蓄积等特点。其在水体和生物体内的分布及其富集性和潜在毒性已在全球范围内受到广泛关注,但在土壤中的分布和迁移规律仍处于初步研究阶段。我国土壤PFAS污染调查主要集中在东部经济发达地区,土壤中PFAS的种类和含量与调查区域工业类型、大气沉降和人为活动存在直接关联,并且与国外土壤调查规律类似。传统的全氟烷基羧酸(PFCAs)和全氟烷基磺酸(PFSAs)是我国土壤中最主要的PFAS类型。通过综述我国土壤中PFAS的分布特征、迁移途径及影响因素以及国内外关于PFAS污染的管控政策,指出目前针对土壤中PFAS分布及管控研究的不足,以期为我国土壤PFAS污染调查研究及管控提供参考。

关键词: 全氟和多氟烷基物质(PFAS); 土壤; 污染分布; 迁移; 管控政策

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0376-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301055

Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils

LIU Hao-ran¹, XING Jing-yi², REN Wen-jie^{3*}

(1. Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, London WC1E 6BT, United Kingdom; 2. Chang'an Branch of Xi'an Ecological Environment Bureau, Xi'an 710199, China; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are a class of persistent organic pollutants that have attracted much attention in recent years, which has the characteristics of diverse species, refractory degradation, long-distance transportation, easy bioaccumulation, etc. The distribution, accumulation, and potential toxicity of PFAS in water and organisms have received extensive attention worldwide. However, studies on PFAS distribution and transportation in soil are still hovering at a preliminary stage. The PFAS pollution surveys in Chinese soils are mainly concentrated in the economically developed eastern regions. The types and concentrations of PFAS in soils are directly related to the industrial types, atmospheric deposition, and human activities in these surveyed areas, which are similar to foreign soil surveys. Traditional perfluoro carboxylic acid (PFCAs) and perfluoro octane sulfonate (PFSAs) are the most important types of PFAS in Chinese soils. This study reviewed the distribution characteristics, transportation pathways, and influencing factors of PFAS in Chinese soils, as well as domestic and foreign control policies on PFAS pollution. Meanwhile, this study further pointed out the shortcomings of the current research on the distribution and control of PFAS in soil in order to provide a reference for the investigation, research, and control of PFAS pollution in Chinese soils.

Key words: per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS); soil; pollution distribution; transportation; control policy

全氟和多氟烷基物质(per-and polyfluoroalkyl substances, PFAS)是指脂肪烃碳链上的氢原子全部或部分被氟原子取代的一类有机氟化合物^[1],由于具有高稳定性、表面活性、疏水疏油性和难降解性等独特的理化性质,被广泛应用于工业生产和日常生活等众多领域^[2]。PFAS的广泛应用和持久性使得它们在自然环境中无处不在,已在不同环境介质中(如地表水、地下水、海水、土壤、沉积物和大气等)被广泛检出^[3,4],成为公认的全球性有机污染物。目前全氟辛烷磺酸(perfluorooctanesulfonic acid, PFOS)及其盐类以及全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)已被联合国环境规划署列入持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)优先名单。中国是全球最大的PFAS生产国,全面了解我国环境中PFAS的分布特征及迁移途径,对于准确评估PFAS的生态环境效应和人体健康风险,实现PFAS的精准管控具有重要

的现实意义。

在多种环境介质中,土壤是POPs的主要归趋场所,并在POPs的迁移和富集过程中发挥重要作用,是POPs进入生态循环的重要媒介^[5]。从本世纪开始,PFAS在土壤中的时空动态分布和迁移便引起国外的关注^[6],尤其在一些大量使用消防泡沫导致PFAS富集的区域,如瑞典斯德哥尔摩机场周边林地^[7]、澳大利亚军事基地周边山地和林地以及民用污水排放源周边居民区^[8,9]等,目前已形成以政府为主导、由企业负责的系统性、产业化PFAS定时调查、定时公布和监管控制体系^[10]。相比于国外,我国对土壤PFAS污染状况的调查研究尚处于起步阶段,土壤PFAS污

收稿日期: 2023-01-08; 修订日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41991335, 41877139)

作者简介: 刘浩然(1999~),男,博士研究生,主要研究方向为土壤中新污染物的污染过程与修复, E-mail: uceshl7@ucl.ac.uk

* 通信作者, E-mail: wjren@issas.ac.cn

染分布和迁移规律调查结果较为分散,且针对 PFAS 污染管控和受污染土壤的修复仍处于探索阶段,因此亟待归纳总结我国已有土壤 PFAS 污染状况调查研究。

本文主要从当前国内土壤 PFAS 污染调查现状、PFAS 在以土壤为主的生态循环中的潜在迁移规律以及国内外 PFAS 调查方案和管控法案等方面进行了综述,以期为我国土壤 PFAS 污染调查研究及管控提供参考。

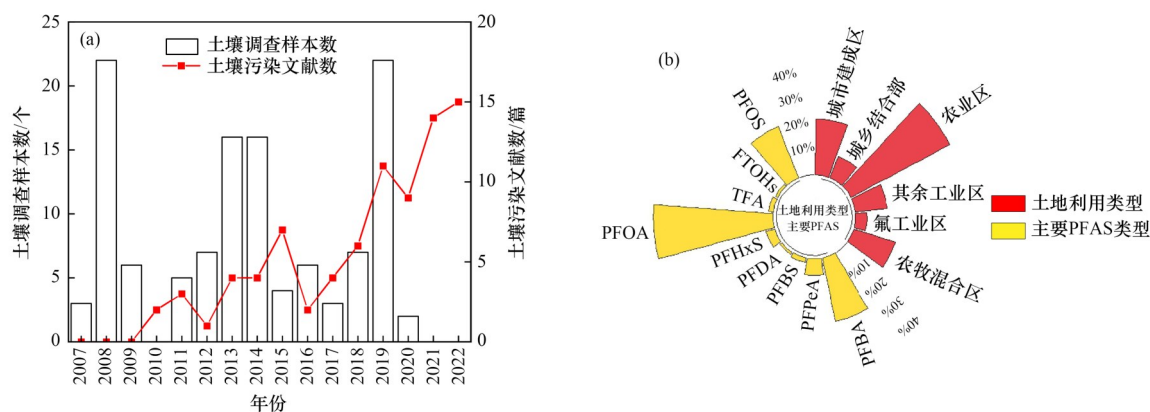
1 我国土壤 PFAS 污染的调查现状和分布特征

通过检索国内外常用数据库 Web of Science 和中国知网(CNKI),收集建库至 2022 年 12 月 31 日发表的有关我国土壤中 PFAS 分布特征的相关研究^[11]。中英文数据库检索采用主题检索的方式,英文数据库检索主题为““perfluoroalkyl substances” or “polyfluoroalkyl substances” or “perfluorinated compounds” or PFAS” and “Soil” and “China”,中文关键词为“全氟及多氟烷基物质”或“全氟及多氟化合物”或“全氟化合物”或“PFAS”和“土壤”。检索到的文献剔除综述、会议文章和报刊文章^[12],共有 692 篇文献待二次筛选。随后通过对标题、摘要或全文进行进一步筛选,最终筛选到 82 篇文献,包括 46 篇英文文献和 36 篇中文文献。在数据整理分析过程中,去除未以中位数、众数或含量范围形式提供土壤中 PFAS

含量及采样时间和地点的文献^[12]。由于文献中采样点众多,因此对同一文献中相同地区(以县/区/旗为单位)且相同土壤类型的采样点数据整合并求均值,归纳为一个样本。记录各样本的经纬度、土壤类型、PFAS 主要类型和含量平均值及其污染源等,共计 121 个采样点,用于后续数据分析。

1.1 我国土壤 PFAS 污染调查现状

图 1(a)展示了我国土壤中 PFAS 污染调查相关研究不同年份发表的文献数量与样本数,前者 and 后者分别采用发表时间和取样时间进行统计。从中可知,我国土壤中 PFAS 污染调查起步较晚,2010 年才开始有文章发表,但近几年相关文章数量急剧增加,结合较早的采样时间可知,发表文章中相关调查研究结果具有一定的滞后性,一些土壤样本甚至是发表文章 10 年前采集的,只能反映 10 年前的分布情况。图 1(b)基于已搜集的样本数据对我国现阶段已调查 PFAS 污染的土地利用类型进行了归纳,农业区的调查样本最多,占调查样本总数的 40.49%,其次是城市建成区(19.83%)和农牧混合区(15.70%),这表明研究人员目前已注意到农业和城市土壤中的 PFAS 具有极高的再富集和迁移风险^[13,14],所以优先关注这些区域。而工业区的调查样本数虽少,但发现该类区域土壤中 PFAS 含量高[湖北省某工业园, $\omega(\text{PFAS})$ 最大值可达到 $2\,076\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$],且迁移规律复杂^[15],已表现出从工业区向周边农田迁移的趋势^[16-18]。



(a) 相关文献数与样本数;(b) 调查土地利用类型和主要 PFAS 类型;FTOHs 为含氟调聚物醇类(fluorotelomer alcohols),TFA 为三氟乙酸(trifluoroacetic acid),PFHxS 为全氟己烷磺酸(perfluorohexanesulfonic acid),PFDA 为全氟癸酸(perfluorodecanoic acid),PFBS 为全氟辛烷磺酸(perfluorobutanesulfonic acid),PFPeA 为全氟戊酸(perfluoropentanoic acid),PFBA 为七氟丁酸(perfluorobutanoic acid)

图 1 我国土壤 PFAS 污染状况调查总体分布

Fig. 1 Distribution of PFAS pollution surveys in Chinese soils

图 1(b)还基于已搜集的样本数据对我国现阶段已调查土壤样本中 PFAS 的主要类型(样本中含量最高的 PFAS 种类)进行了归纳。在大部分区域土壤中,传统的全氟烷基羧酸(perfluorocarboxylic acid, PFCAs)和全氟烷基磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFSA)是最常见的 PFAS 类型,其中 PFOA 占据最高

比例(43.44%),其样本主要来源于东部沿海地区^[19,20]。而 PFBA 占比第二,为 22.95%,其样本来源则集中于青藏高原地区^[21]和淮河流域^[22]。这两种污染物都属于 PFCAs 类型。属于 PFSA 类型的 PFOS 则仅占 19.67%,其样本来源集中于安徽省^[23]和湖北省^[24]。这说明以 PFOA 为典型代表的多种类、传统

PFCA_s是我国土壤中PFAS的主要污染类型,不过具体的污染物种类与采样调查区域的工业类型、地理环境以及人为活动可能都存在密切的联系^[23, 25]. 在个别区域土壤中存在非我国传统常见PFAS占据首位的现象,如FTOH_s和6:2含氟调聚物醇(6:2 FTOH),但该样本来自于施用生物改良肥料的试验田,因此受人为因素影响大,应归类于个别案例^[26].

1.2 我国土壤PFAS污染分布特征

图2直观展示了我国土壤中PFAS的分布特征,土壤中 $\omega(\text{PFAS})$ 为 $0.043\sim 2\,952.71\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 结合图1(b)调查土地利用类型来看,我国已调查土壤中的PFAS多来源于工业企业,且不同来源导致PFAS的含量分布存在明显差异. 高含量、大范围的PFAS区域分布主要是由于这些地区存在直接排放PFAS的规模性工业企业,其中产生PFAS的种类最多、含量最高以及关注度也最高的是氟化工业园,分别位于山东省德州市桓台县[厂区 $\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $641\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[27]、江苏省常熟市[厂区周边农田 $\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $19.9\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[19]和辽宁省阜新市[厂区 $\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $240\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[16, 17],另外福建省三明市近年建设的氟化工业园也检测到了高含量PFAS[厂区 $\omega(\text{PFOS})$ 最大值为 $1\,199\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$],但变化范围较大^[28]. 除此之外,其余易导致厂区和周边农田PFAS污染的工业企业还包括涉及到氟制品的纺织、皮革、电子等工业^[20, 29]以及一些地方特色产业,如杭州湾电镀厂[$\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $2\,952.71\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[30]、天津市滨海新区印染厂[$\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $61.3\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[31]、南京市六合区包装厂[$\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $216\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[32]、珠三角地区皮革厂^[29]和电子厂^[33]以及安徽省宣城市的宣纸造纸厂^[23]等. 与工业区相比,城市和城乡结合部以及农牧业区土壤中PFAS的含量明显低了很多, $\omega(\text{PFAS})$ 一般在 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,但工业园区周边农田以及城镇建成区土壤,已然受到工业区PFAS污染影响,逐渐成为我国土壤PFAS污染调查关注的重点^[34, 35]. 另外,随着消防泡沫在火灾扑灭过程中的广泛应用^[36],其释放的PFAS也已成为我国土壤PFAS污染不可忽视的新源头,最新研究表明上海消防站土壤PFAS含量高出工业区土壤约7倍^[37].

除了工业区和城市与城乡结合部等人类活动影响较大的区域外,一些缺乏人类活动的区域调查发现其土壤样本中同样检测到了PFAS的分布,如河北省张家口市的三北防护林[$\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $0.48\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[38]. 值得关注的是,在青藏高原地区土壤中依然可以检测到PFAS,含量为 $1.57\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21],个别点位土壤中PFAS的含量甚至超过深圳城区^[33]和淮

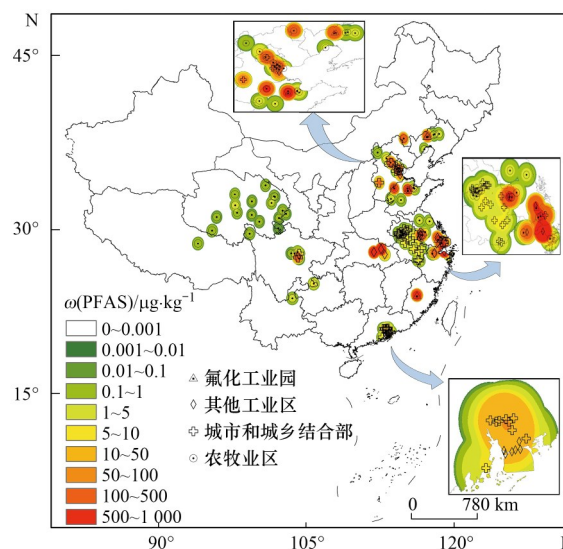


图2 我国土壤中PFAS的分布现状

Fig. 2 Distribution of PFAS in Chinese soils

河流域农田^[22]. 而在全球范围内很多人迹罕至的地区也检测到了PFAS的分布,如加拿大哈德逊湾^[39]和丹麦格陵兰群岛^[40]的生物体内,导致该效应或类似效应的原因则可能归结于区域性或全球范围内的大气流动^[41]和人类的长期运输活动^[21],即自然和人类共同推动的物质迁移. 这种分布现象可以说明PFAS具有较高的环境迁移性,且可能在迁移过程中借助多种介质,从而涉及整个生态循环.

为了比较国内外土壤中PFAS分布特征及污染来源的差异性,本文也总结了部分国家土壤调查样本中PFAS的含量和来源(表1). 在其他国家土壤中,PFOA和PFBA也是主要的PFAS种类. 除氟化工业园外,我国土壤高含量PFAS污染还来源于其它工业园区(图2),但在欧美国家,污泥堆肥也是土壤中PFAS的重要来源,这归因于污水厂产生的污泥经堆肥后在农田中的长期和大规模应用^[42, 43],我国山东省德州市生物固体施用土壤同样呈现出较高含量的PFAS污染($429.5\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26]. 此外,国内外土壤PFAS污染调查数据均表明大气沉降和交通运输也能促进PFAS的迁移,导致特定区域土壤中PFAS污染含量较其他区域更高,例如受降雨影响的日本大阪^[44]、受城市建设影响的美国明尼苏达州^[45]、受机场运行影响的瑞典斯德哥尔摩^[36]以及我国海港周边农田[天津市, $\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $9.40\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;宁波市, $\omega(\text{PFAS})$ 最大值为 $25.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]^[46, 47]等.

总体而言,目前我国PFAS污染状况调查主要集中在以海河流域、淮河流域、长江三角洲和珠江三角洲为代表的华北、华东和华南沿海相对发达地区,调查样本数、含量平均值和最高含量都明显高于中西部地区,而东北(辽宁省)、华中(湖北省)和东南

表 1 部分国家土壤调查样本中 PFAS 的含量和来源
Table 1 Concentration and source of PFAS in some national soil survey samples

大洲	国家	地点	土地利用类型	采样年份	$\omega(\text{PFAS})$ $/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	主要 PFAS	主要来源	文献
北美洲	加拿大	安大略省	农田	2013	0.12	PFOA	污泥堆肥	[48]
	美国	俄亥俄州	农田	2009	150.00	PFOA 和 PFDoDA ¹⁾	氟化工业园	[49]
	美国	阿拉巴马州	农田	2009	370.00	PFOA 和 PFOS	污泥堆肥	[50]
	美国	明尼苏达州	城市建成区	2010	548.00	PFOA 和 PFOS	垃圾填埋场	[45]
亚洲	日本	大阪	农田	2017	0.98	PFNA 和 PFBA	降雨	[44]
	韩国	牙山湖	农田	2018	12.90	PFOA 和 PFOS	工业园	[51]
	韩国	全国范围	农田	2016	1.92	PFOA 和 PFDA	工业园	[52]
	约旦	扎尔卡河	农田	— ²⁾	0.97	PFDA 和 PFPeA	工业园	[53]
欧洲	瑞典	斯德哥尔摩	林地	2016	160.00	PFOS 和 PFHxS	机场	[36]
	德国	巴登-符腾堡州	农田	2014	8 440.00	PFBA 和 PFDA	污泥堆肥	[42]
	荷兰	多德雷赫特	林地	2016	88.70	PFOA 和 GenX	氟化工业园	[54]
非洲	乌干达	维多利亚湖	湿地	2015	7.90	PFOS	工业园	[55]

1) PFDoDA 为全氟十二烷酸(perfluorododecanoic acid); 2) “—”表示该研究未提供年份

(福建省)存在个别高含量样本,因为其取自本地的氟化工业园或长期污染的其他工业区,还无法全面反映本区域的污染状况.同时,由于缺乏足够的调查数据,图 2 并不能完整反映全国范围内 PFAS 的真实分布情况,比如陕甘宁地区、内蒙古地区、新疆地区和南方多省均未见调查数据报道.而青藏高原土壤中 PFAS 的存在值得引起无 PFAS 排放区域的高度重视,亟需加强对这些地区 PFAS 污染状况的调查.综上,我国已开展的土壤 PFAS 污染状况调查多为零星或局部调查,有关区域或流域尺度上土壤 PFAS 污染的时空分布特征仍不清楚,重点区域长期持续观测尚处空白.

2 我国土壤中 PFAS 的迁移途径及影响因素

2.1 我国土壤中 PFAS 的迁移途径

PFAS 进入土壤,并经由土壤向其它介质迁移的途径十分复杂(图 3).直接排放到土壤中的固体废弃物,是土壤中 PFAS 的直接来源(图 3 中①),但一般集中在固定的污染场地,迁移速率较慢^[15].大气和水体(包括地表水和地下水)则是 PFAS 从排放源迁移到土壤中的重要媒介和推动力(图 3 中②和③),受其影响的迁移速率远高于直接以土壤为载体的迁移.如深圳市 PFAS 污染调查发现,高含量 PFAS 点位只存在于排放源(电子企业)周边 500 m 范围内和西部城区,其中排放源周边污染归因于 PFAS 在土壤中的直接迁移,而城区污染分布则同该地区风向以及河流走向吻合^[33],通常在下风向地带土壤中 PFAS 含量更高,该分布规律在山谷地带更加明显^[56].同时,直接和间接的迁移过程都可能受到自然气候变化和人为活动的促进影响,尤其是两者的共同作用^[14].在亚洲范围内,大气是土壤中 PFOA 和 PFOS 的重要来源且

受季节影响明显^[57].而在我国华东区域(包括山东、江苏和浙江)的相关调查也充分证明了降雨对该地区 PFAS 大气沉降的促进作用^[19].同时,以灌溉为典型代表的人为活动,对 PFAS 在土壤中的分布扰动极大,并已成为 PFAS 进入天津、安徽和四川等地农田土壤的主要途径之一^[14, 22, 46].PFAS 还可借助公路运输这种易被忽略的迁移方式“跳”入人迹罕至的区域,如青藏高原和四川的山区^[14, 21].PFAS 可以在土壤、孔隙水、水体以及大气间双向自由迁移(图 3 中④和⑤)^[29, 58],由于具有较高的生物有效性在生物体内不断富集(图 3 中⑥和⑦)^[59, 60],并且在距离污染源越近的植物体内富集含量越高^[56].如在三北防护林^[38]、辽宁阜新^[17]和山东寿光^[18]等地都发现了 PFAS 经水体和土壤以及大气沉降等多种途径向周边林木、作物和温室蔬菜中迁移和积累的案例,最终在土壤中的积累量为 $0.71 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在植物叶片中积累量高于土壤,为 $0.99 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与在德国检测到的土壤中 PFAS 向燕麦和萝卜中迁移和富集的潜在规律相似^[61](图 3 中⑦).此外,已有研究发现地表土和地面积尘中的 PFAS 经大气进入呼吸道后,可以直接在人体内积累并存在潜在毒性^[13, 33, 62].不同 PFAS 的结构差异也可能会影响其在生态循环中的分布,如长链 PFAS 会倾向于向高有机质含量的土壤和水体中迁移^[25, 29],而 PFBA 特有的结构使其相比于其它短链 PFAS 更易从土壤中渗入水体^[63].这说明环境介质的差异和排放源的种类差异会直接导致不同种类的 PFAS 在生态环境中的迁移和富集具有复杂性和差异性.因此,不同种类的 PFAS 在不同排放源影响下,从多种介质迁移到土壤以及从土壤向多种介质迁移和富集的路径仍然需要进一步调查和研究.

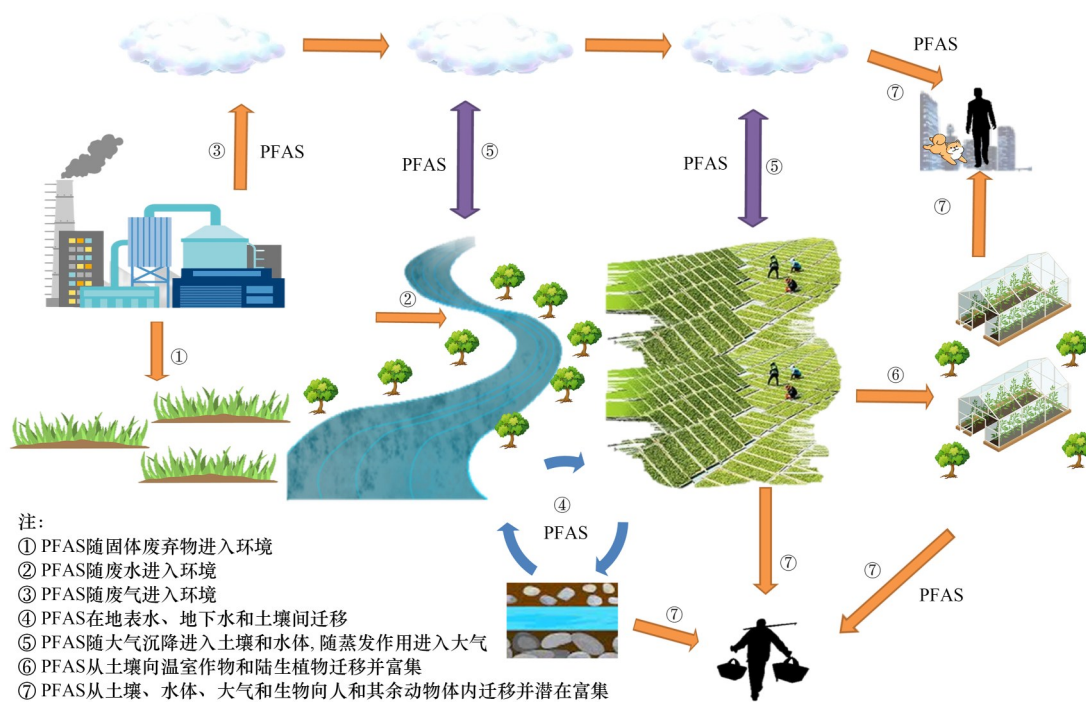


图3 PFAS在土壤与其它环境介质间的迁移途径

Fig. 3 Migration pathways of PFAS between soil and other environmental media

2.2 土壤中PFAS污染分布的影响因素

PFAS在土壤中的分布和迁移规律由于易受土壤理化性质、有机质种类以及PFAS自身性质的影响, 复杂且不明确. 殷佳丽等^[64]的研究表明磷肥在四川茶园(黄壤)中的应用导致氟化物易在0~20 cm酸性土层中聚集. 有研究也表明深圳红壤在pH 3.0~5.0条件下对PFAS(主要是中长链的PFOS和PFOA)的吸附能力明显强于其它pH条件下^[33]. 土壤中各种有机质, 包括胡敏素、富里酸和胡敏酸, 都会显著促进土壤吸附中长链PFAS(含碳数 $C > 6$), 特别是PFCA, 但对短链PFAS(含碳数 $C \leq 6$)影响不显著^[65, 66], 与前文所述PFAS受有机质影响的迁移规律契合. 吸附于土壤中的PFAS(以PFOS和PFOA为主)则会增加土壤可萃取有机氟(extractable organofluorine, EOF), 并通过关联土壤有机质影响土壤的疏水性和团聚性等^[33].

此外, 土壤中PFAS的种类和含量会随时间和空间动态发生显著改变, 尤其在受到自然和人为环境的影响时. 实验室模拟污染土壤中, 挥发后的PFAS仅有约1%与投加源相同^[6]. 而从污染源周边到边远地区的实际污染土壤调查中, 该现象同样明显. 在湖北某长期排放PFAS的典型企业周边土壤采样调查中, 许静等^[15]发现以PFOS为代表的PFAS种类和构成不受采样点和排放源之间距离的影响, 在特殊地形(如山谷)中, 存在该潜在规律的污染土壤面积可能会进一步扩大^[56], 但在新污染源周边扩散范围则

十分有限^[30]. 在受工业和人类活动影响较大的淮河流域调查发现, 由于排放源分布区域的交叠, PFAS在较近区域内的种类和含量都存在极大差异^[22, 23]. 在缺少PFAS污染源的青藏高原冻土采样调查中, 研究人员推测长链PFAS的前体类物质在长距离迁移过程中降解产生短链PFAS, 从而导致该地区土壤中短链新型PFAS和长链传统PFAS含量接近^[21]. 由近及远的不同采样点所呈现的复杂分布规律, 说明PFAS在土壤中的分布规律与其在外界环境中的迁移路径存在关联. 目前关于PFAS在土壤中的分布影响因素仍不明确, 特别是PFAS在土壤中的环境行为还有待进一步深入研究, 以更好地解析土壤中PFAS污染分布的主要驱动因子.

3 土壤PFAS污染的风险管控

相比于其它有机污染物, 土壤中PFAS种类复杂, 短链和长链PFAS的结构和理化性质存在显著差异^[65]. 目前我国土壤环境质量监测仍主要集中在重金属和部分挥发性和半挥发性有机污染物上, 并且以污染物总量作为监测的主要指标, 而对PFAS等新污染物的监测管理尚存在不足, 有关土壤中PFAS监测评估也暂无质量标准^[67].

《斯德哥尔摩公约》第九次缔约方大会已批准“关于列入全氟辛酸、其盐类及其相关化合物的附件A修正案”和“关于全氟辛基磺酸及其盐类和全氟辛基磺酰氟的附件B修正案”, 但这些修正案目前还未

在我国生效。自 2022 年 3 月至今,我国生态环境部仍在持续征集社会面对该修正案的意见以及 PFAS 相关物质在我国境内生产、进出口和替代技术等相关信息,以制定针对我国国情的管控标准。而在世界范围内,在《斯德哥尔摩公约》的框架下,各国对 PFAS 的关注和管控策略同样不尽相同。

如表 2 所示,目前已采取国家级别调查行动的国家主要集中在欧美,只有澳大利亚和欧洲部分国家

已具备完善的管理计划和管控法案,并在近期有持续的政策跟进。在俄罗斯、韩国和泰国环保部门的网站上尚未检索到 PFAS 相关政策,但可以关注到在韩国环保学界已开展了对 PFAS 在本国水体、土壤和生物(包括农作物和鱼类)中分布的调查(表 1)^[51, 52]。同时,可以检索到关于亚非拉国家的 PFAS 分布调查,这些包括土壤、水体和生物体样本在内的系统性调查旨在帮助监测涉及多邻国的重要生态系统中

表 2 既有的 PFAS 污染治理方法和管理法案¹⁾

Table 2 Existing control methods and management acts for PFAS pollution

国别	调查机构	调查行动	管控法案和政策	近期政策	信息来源
美国	美国国家环保署 (USEPA)	国家 PFAS 测试战略 (National PFAS Testing Strategy),旨在调查 PFAS 对环境和人体健康的潜在影响	暂无,正通过各调查行动和清单对 PFAS 进行分级	在场地风险筛选值列表中增加了 5 种新型 PFAS 的阈值标准 (2022-05);加强对饮用水中 PFAS 的关注 (2022-06)	https://www.epa.gov
澳大利亚 ²⁾	澳大利亚农业与水资源部 (Department of Agriculture, Water and the Environment)	《关于应对 PFAS 污染的政府间国家框架协议》(The Intergovernmental Agreement on a National Framework for Responding to PFAS Contamination),为 PFAS 污染场地的调查行动提供了具体指导	国家 PFAS 环境管理计划 (NEMP),旨在为各级政府提供管理框架	澳大利亚工业化学品引进计划 (AICIS)负责评估任何在本国境内使用的新型 PFAS (2021 年);国家管理层面持续关注水体和生物体内的 PFAS 分布 (2021-05);各州政府委托第三方公司对本州属地内的 PFAS 分布,特别是军用机场周边环境 PFAS 分布进行持续调查 (2022 年)	https://www.pfas.gov.au
新西兰	新西兰环境部 (Ministry for Environment, New Zealand)	政府全权项目 (all-of-government programme),旨在监督和协调本国 PFAS 的响应	基于《PFAS 调查响应和资助指南》(PFAS investigation response and funding guidance)和政府全权项目完成对 PFAS 的管控	已完成对主要军用机场周边 PFAS 污染的调查 (2019-02)	https://environment.govt.nz/
欧盟 ³⁾	欧盟化学委员会 (European Chemicals Agency)	欧盟波罗的海战略 (EU Strategy for the Baltic Sea Region),旨在调查 PFAS 在水体和生物内的分布	REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) 法案,旨在为欧盟境内化学物质管控提供管理框架	各国持续完善 REACH 法案,如德国和瑞典提交的对碳链长度为 9~14 的 PFAS 的限制议案 (2023-01)	https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas
英国	英国环境协会 (Environment Agency, UK)	2021 年 PFAS 分布专项调查: Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS): sources, pathways and environmental data	持续遵循欧盟 REACH 法案	持续关注 PFAS 在英国各水体中的分布和迁移	https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency
加拿大	加拿大环境和气候变化部 (Environment and Climate Change, Canada)	《2019~2020 年联邦污染场地行动计划》(Federal Contaminated Sites Action Plan),旨在调查包括 PFAS 在内的污染物分布	《禁止特定有害物质法规》(The Prohibition of Certain Toxic Substances Regulations),在 2012 和 2018 年修正案中强调对 PFAS 的管控	通报 PFAS 经吸入暴露的可能性 (2021-03)	https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/
日本	日本环境省 (日本國環境省)	《令和四年 PFAS 相关国际趋势调查工作》(《令和 4 年度 PFAS に係る国際動向等調査業務》),旨在调查 PFAS 的全球分布趋势	修订中	已完成 PFOS 和 PFOA 两种 PFAS 的全国分布调查 (2020-06)	https://www.env.go.jp/

1) 收录的各国部门名称系各国官方翻译,以官方语言名称备注;法规政策和项目名称系作者翻译,以官方语言名称备注;2) 基于澳大利亚和新西兰的独特地理位置和历史传统,两国在政策上会相互遵守和参考;3) 欧盟各国,包括德国、瑞典和法国等,遵循相同的管控法案;基于目前英国仍在完成脱欧进程,英国仍在遵循欧盟的环境标准

PFAS的分布,如作为非洲多国水源命脉的维多利亚湖(表1)^[55],但这些调查都是由他国主导的科研调查,本国政府和科研机构参与度低。

各国对于PFAS的关注根据国情的不同有所侧重,如澳大利亚和新西兰作为农牧业国家,涉及PFAS的工业生产活动较少,但军事航空活动频繁且远离其它大陆,本地生态系统脆弱,因此格外关注机场消防泡沫使用导致的周边环境PFAS污染问题,并由第三方检测公司每年监测该地区的PFAS分布状况^[9,68],瑞典也持续关注机场周边土壤和植被中的PFAS污染(表1)^[36]。部分国家则持续关注PFAS在水体和生物体内的分布并付诸行动,如瑞典生态环境局在欧盟框架约束之内,仍独立完成本国水体和生物体内PFAS分布普查的官方报告^[69]。而美国和加拿大两国的官方网站公开发布的相关报告和政策文件则基本侧重于对场地污染的调查。这意味着即使在这些官方监管举措较多的国家土壤中PFAS分布的官方关注度和宣传力度也较低,说明在全球范围内,土壤中PFAS分布调查和管控工作仍需要投入更多的精力。

我国目前正在持续推进PFAS在土壤中的分布调查,并已通过种种举措着手制定PFAS管控标准,如已开始应用网格排放清单等方法持续关注 and 量化环渤海地区PFAS的污染^[70]。结合该情况,同时考虑到我国较为复杂的土壤PFAS污染状况以及高于以澳、新为代表的农牧业发达国家的工业生产需求,我国仍然需要在继续完善水体和生物体等介质中PFAS污染调查的同时,持续推进对土壤PFAS污染的监测和PFAS工业生产应用的管控,做到“开源节流”,并结合我国国情制定出合理的土壤PFAS污染管控方案和法规。另外,随着全球对PFAS关注度的提升,有关传统PFAS的禁令也在增多,一些新型PFAS正被用作替代物^[54],但其潜在毒性和富集性仍然未知,因此应及时关注和调查新种类PFAS污染分布、环境行为和生态毒性。

4 展望

目前,我国土壤PFAS污染调查研究仍集中于局部地区,缺乏流域和区域尺度上的系统性认识,有关土壤中PFAS的多介质界面迁移过程和机制仍不明晰,土壤PFAS污染管控标准和法律法规仍较为缺乏。针对上述问题,建议今后重点开展以下研究:

(1)加强土壤PFAS污染的排放源调查研究,构建我国土壤PFAS污染管控的源排放清单;开展区域和流域尺度土壤中PFAS污染分布调查,针对重点地区开展土壤PFAS污染的长期持续监测,探明典型区

域和流域土壤中PFAS污染的时空演变规律,明确我国土壤PFAS污染的优先控制类型和组分,形成我国土壤PFAS污染分布数据库。

(2)研究PFAS在土壤-地表水、土壤-地下水、土壤-生物、土壤-大气等多介质界面的迁移转化过程,明确影响PFAS在我国重点和典型区域土壤中污染分布的主控因子及其驱动机制,提出我国土壤PFAS污染的精准管控策略。

(3)加强土壤PFAS污染的基准与标准研究,制定土壤PFAS污染监管的法律法规,研发土壤PFAS污染的高效阻控与修复技术,为我国土壤PFAS污染管控与修复提供政策支撑和技术支持。

参考文献:

- [1] 王佩,黄欣怡,曹致纬,等.新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战[J].环境科学,2022,43(11):4801-4809.
Wang P, Huang X Y, Cao Z W, et al. Challenges regarding the co-emission of emerging pollutants to eco-environmental monitoring and management [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 4801-4809.
- [2] Jin H B, Shan G Q, Zhu L Y, et al. Perfluoroalkyl acids including isomers in tree barks from a Chinese fluorochemical manufacturing park: implication for airborne transportation [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 2016-2024.
- [3] Lyu X Y, Xiao F, Shen C Y, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in subsurface environments: occurrence, fate, transport, and research prospect [J]. Reviews of Geophysics, 2022, 60(3), doi: 10.1029/2021RG000765.
- [4] 王世亮,曹雪雅.山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险[J].环境科学,2020,41(12):5428-5437.
Wang S L, Cao X Z. Contamination characteristics and potential ecological risks of typical perfluoroalkyl substances in the water and sediment of coastal tourism resorts in Shandong province [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5428-5437.
- [5] 张鸿,赵亮,何龙,等.不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析[J].环境科学,2014,35(7):2698-2704.
Zhang H, Zhao L, He L, et al. Pollution fingerprints and sources of perfluorinated compounds in surface soil of different functional areas [J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2698-2704.
- [6] Duchesne A L, Brown J K, Patch D J, et al. Remediation of PFAS-contaminated soil and granular activated carbon by smoldering combustion [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(19): 12631-12640.
- [7] Koch A, Jonsson M, Yeung L W Y, et al. Per- and polyfluoroalkyl-contaminated freshwater impacts adjacent riparian food webs [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(19): 11951-11960.
- [8] Taylor M D, Bowles K C, Johnson D D, et al. Depuration of perfluoroalkyl substances from the edible tissues of wild-caught invertebrate species [J]. Science of the Total Environment, 2017, 581-582: 258-267.
- [9] Coffey. RAAF Base Darwin PFAS supplementary DSII soil analytical results - PFAS [R]. Darwin, Australia: Department of Defence, 2019. 41-59.
- [10] Aurecon Australasia Pty Ltd. Investigation of per- and polyfluoroalkyl substances at HMAS Cairns [R]. Cairns, Australia:

- Department of Defence, 2019. 339-341.
- [11] 王晴, 杨宗帅, 尹立普, 等. 有机污染土壤和地下水生物修复研究热点和趋势——基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析[J]. 生物工程学报, 2021, **37**(10): 3549-3564.
Wang Q, Yang Z S, Yin L P, *et al.* Bibliometric analysis on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater based on Web of Science database[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, **37**(10): 3549-3564.
- [12] Zhang J R, Ren S Y, Xu W, *et al.* Effects of plastic residues and microplastics on soil ecosystems: a global meta-analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **435**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129065.
- [13] 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 等. 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5265-5271.
Fang S H, Zhu H X, Ye Z X, *et al.* Pollution characteristics and exposure risk assessment of perfluoroalkyl substances in road dust, Chengdu [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5265-5271.
- [14] Gan C D, Peng M Y, Liu H B, *et al.* Concentration and distribution of metals, total fluorine, per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in vertical soil profiles in industrialized areas [J]. Chemosphere, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134855.
- [15] 许静, 翦敏林, 蔡印莹, 等. 生产企业及周边环境中全氟化合物的污染特征[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(3): 496-505.
Xu J, Jian M L, Cai Y Y, *et al.* Pollution characteristics of perfluorinated compounds in environment in production enterprise and surrounding area[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(3): 496-505.
- [16] Bao J, Li C L, Liu Y, *et al.* Bioaccumulation of perfluoroalkyl substances in greenhouse vegetables with long-term groundwater irrigation near fluorochemical plants in Fuxin, China [J]. Environmental Research, 2020, **188**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109751.
- [17] Chen H, Yao Y M, Zhao Z, *et al.* Multimedia distribution and transfer of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) surrounding two fluorochemical manufacturing facilities in Fuxin, China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(15): 8263-8271.
- [18] Zhang M, Wang P, Lu Y L, *et al.* Bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in vegetables from the largest vegetable production base of China [J]. Environment International, 2020, **135**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105347.
- [19] 陈舒, 焦杏春, 盖楠, 等. 中国东部农村地区土壤及水环境中全氟化合物的组成特征和来源初探[J]. 岩矿测试, 2015, **34**(5): 579-585.
Chen S, Jiao X C, Gai N, *et al.* Composition and source of perfluorinated compounds in soil and waters from the rural areas in eastern China [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, **34**(5): 579-585.
- [20] 胡国成, 郑海, 张丽娟, 等. 珠江三角洲土壤中全氟化合物污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 37-42.
Hu G C, Zheng H, Zhang L J, *et al.* Contamination characteristics of perfluorinated compounds in soil from Pearl River Delta, South China[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 37-42.
- [21] 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 等. 青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3253-3261.
Wen X J, Chen Z H, Xu W X, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of perfluoroalkyl substances in surface soils of the northeast Tibetan plateau [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3253-3261.
- [22] 孟晶, 王铁宇, 王佩, 等. 淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3188-3194.
Meng J, Wang T Y, Wang P, *et al.* Spatial distribution and composition of perfluorinated compounds in soils around the Huaihe River[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3188-3194.
- [23] 高燕, 傅建捷, 王亚韡, 等. 全氟化工厂土芯中全氟化合物的分布规律[J]. 环境化学, 2014, **33**(10): 1686-1691.
Gao Y, Fu J J, Wang Y W, *et al.* Spatial and vertical distribution of perfluoroalkyl substances in soil cores around manufacturing facilities in China[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(10): 1686-1691.
- [24] 李法松, 倪卉, 黄涵宇, 等. 安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 327-332.
Li F S, Ni H, Huang H Y, *et al.* Spatial distribution and source of perfluorinated compounds in urban soil from part of cities in Anhui Province, China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 327-332.
- [25] 曾士宜, 杨鸿波, 彭洁, 等. 贵州草海湖泊表层水与沉积物中全氟化合物的污染特征及风险评估[J]. 环境化学, 2021, **40**(4): 1193-1205.
Zeng S Y, Yang H B, Peng J, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of perfluorinated compounds in surface water and sediments of Caohai Lake of Guizhou Province [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(4): 1193-1205.
- [26] Zhang H N, Wen B, Hu X Y, *et al.* Determination of fluorotelomer alcohols and their degradation products in biosolids-amended soils and plants using ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2015, **1404**: 72-80.
- [27] Liu Z Y, Lu Y L, Shi Y J, *et al.* Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China [J]. Environment International, 2017, **106**: 37-47.
- [28] 王益凡. 全氟化工厂土芯中全氟化合物的分布规律研究[J]. 当代化工研究, 2020, (20): 47-48.
Wang Y F. Study on the distribution law of perfluorinated compounds in the soil core of perfluorinated factories [J]. Modern Chemical Research, 2020, (20): 47-48.
- [29] 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 等. 东江流域表层土中全氟化合物的空间分布及来源解析[J]. 地球与环境, 2015, **43**(3): 302-307.
Liu B L, Zhang H, Xie L W, *et al.* Spatial distribution and source of perfluorinated compounds in surface soils around the Dongjiang River [J]. Earth and Environment, 2015, **43**(3): 302-307.
- [30] 曲映溪, 姜新舒, 刘立全, 等. 典型电镀厂土壤中全/多氟烷基化合物的污染特征及风险评估[J]. 能源环境保护, 2020, **34**(1): 88-91.
Qu Y X, Jiang X S, Liu L Q, *et al.* Poly- and perfluoroalkyl substances in soil in a typical electroplating plant of China: contamination characteristic and risk assessment [J]. Energy Environmental Protection, 2020, **34**(1): 88-91.
- [31] 武倩倩, 吴强, 宋帅, 等. 天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3682-3694.
Wu Q Q, Wu Q, Song S, *et al.* Distribution, sources, and risk assessment of polyfluoroalkyl substances in main rivers and soils of

- Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3682-3694.
- [32] 丁达, 宋昕, 刘朝阳, 等. 某化工园区周边土壤中传统和新兴全氟化合物的赋存特征及潜在来源[J]. *土壤*, 2021, **53**(4): 779-787.
- Ding D, Song X, Liu Z Y, *et al.* Occurrence and possible source of legacy and emerging perfluoroalkyl substances in soil near a chemical industrial park[J]. *Soils*, 2021, **53**(4): 779-787.
- [33] 刘晓涛, 赵亮, 张鸿, 等. 深圳市表层土中氟化物组成及分布[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 499-505.
- Liu X W, Zhao L, Zhang H, *et al.* Composition and distribution of the fluoride compounds in topsoil samples of Shenzhen[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 499-505.
- [34] Zhang Y W, Tan D F, Geng Y, *et al.* Perfluorinated compounds in greenhouse and open agricultural producing areas of three provinces of China: levels, sources and risk assessment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(12), doi: 10.3390/ijerph13121224.
- [35] Wen B, Li L F, Zhang H N, *et al.* Field study on the uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) by wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in biosolids-amended soils[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 547-554.
- [36] Gobelius L, Lewis J, Ahrens L. Plant uptake of per- and polyfluoroalkyl substances at a contaminated fire training facility to evaluate the phytoremediation potential of various plant species[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12602-12610.
- [37] Zhu Q H, Qian J H, Huang S F, *et al.* Occurrence, distribution, and input pathways of per- and polyfluoroalkyl substances in soils near different sources in Shanghai[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **308**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119620.
- [38] Wang Q, Ryan Y F, Zhao Z, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Three-North Shelter Forest in northern China: first survey on the effects of forests on the behavior of PFAS[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **427**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.128157.
- [39] Morris A D, Letcher R J, Dyck M, *et al.* Concentrations of legacy and new contaminants are related to metabolite profiles in Hudson Bay polar bears[J]. *Environmental Research*, 2019, **168**: 364-374.
- [40] Gebbink W A, Bossi R, Rig  t F F, *et al.* Observation of emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in Greenland marine mammals[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 2384-2391.
- [41] Zhao Z, Tang J H, Mi L J, *et al.* Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the lower atmosphere and surface waters of the Chinese Bohai Sea, Yellow Sea, and Yangtze River estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 114-123.
- [42] Kotthoff M, Fl  dner A, R  del H, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment - Levels and patterns in different matrices[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140116.
- [43] Johnson G R. PFAS in soil and groundwater following historical land application of biosolids[J]. *Water Research*, 2022, **211**, doi: 10.1016/j.watres.2021.118035.
- [44] Eun H, Yamazaki E, Taniyasu S, *et al.* Evaluation of perfluoroalkyl substances in field-cultivated vegetables[J]. *Chemosphere*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124750.
- [45] Scher D P, Kelly J E, Huset C A, *et al.* Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFAS) in garden produce at homes with a history of PFAS-contaminated drinking water[J]. *Chemosphere*, 2018, **196**: 548-555.
- [46] Pan Y Y, Shi Y L, Wang J M, *et al.* Pilot investigation of perfluorinated compounds in river water, sediment, soil and fish in Tianjin, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(2): 152-157.
- [47] Tang L, Liu X R, Yang G J, *et al.* Spatial distribution, sources and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface soils of a representative densely urbanized and industrialized city of China[J]. *CATENA*, 2021, **198**, doi: 10.1016/j.catena.2020.105059.
- [48] Gottschall N, Topp E, Edwards M, *et al.* Brominated flame retardants and perfluoroalkyl acids in groundwater, tile drainage, soil, and crop grain following a high application of municipal biosolids to a field[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1345-1359.
- [49] Zhu H K, Kannan K. Distribution and partitioning of perfluoroalkyl carboxylic acids in surface soil, plants, and earthworms at a contaminated site[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 954-961.
- [50] Yoo H, Washington J W, Jenkins T M, *et al.* Quantitative determination of perfluorochemicals and fluorotelomer alcohols in plants from biosolid-amended fields using LC/MS/MS and GC/MS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 7985-7990.
- [51] Lee Y M, Lee J Y, Kim M K, *et al.* Concentration and distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Asan Lake area of South Korea[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **381**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120909.
- [52] Kim H, Ekpe O D, Lee J H, *et al.* Field-scale evaluation of the uptake of Perfluoroalkyl substances from soil by rice in paddy fields in South Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **671**: 714-721.
- [53] Shigei M, Ahrens L, Hazaymeh A, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances in water and soil in wastewater-irrigated farmland in Jordan[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137057.
- [54] Brandsma S H, Koekkoek J C, van Velzen M J M, *et al.* The PFOA substitute GenX detected in the environment near a fluoropolymer manufacturing plant in the Netherlands[J]. *Chemosphere*, 2019, **220**: 493-500.
- [55] Dalahmeh S, Tirgani S, Komakech A J, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in water, soil and plants in wetlands and agricultural areas in Kampala, Uganda[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 660-667.
- [56] Xu C, Song X, Liu Z Y, *et al.* Occurrence, source apportionment, plant bioaccumulation and human exposure of legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances in soil and plant leaves near a landfill in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145731.
- [57] Lin H J, Taniyasu S, Yamazaki E, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances in the air particles of Asia: levels, seasonality, and size-dependent distribution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(22): 14182-14191.
- [58] Brusseau M L, Guo B. PFAS concentrations in soil versus soil porewater: mass distributions and the impact of adsorption at air-water interfaces[J]. *Chemosphere*, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134938.
- [59] 伍兆诚, 王少锐, 江龙飞, 等. 全氟羧酸化合物在氟化工园区

- 土壤-植物中的分布及组成特征[J]. 地球化学, 2021, **50**(5): 525-535.
- Wu Z C, Wang S R, Jiang L F, *et al.* Distribution and composition of perfluorocarboxylic acid substances in the soil-plant system around a fluorochemical manufacturing park [J]. *Geochimica*, 2021, **50**(5): 525-535.
- [60] Juhasz A L, Kastury F, Herde C, *et al.* Application of soil amendments for reducing PFAS leachability and bioavailability[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **307**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119498.
- [61] Melo T M, Schauerte M, Bluhm A, *et al.* Ecotoxicological effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and of a new PFAS adsorbing organoclay to immobilize PFAS in soils on earthworms and plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **433**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128771.
- [62] Wang Y, Li X T, Zheng Z, *et al.* Chlorinated polyfluoroalkyl ether sulfonic acids in fish, dust, drinking water and human serum: from external exposure to internal doses[J]. *Environment International*, 2021, **157**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106820.
- [63] Rayner J L, Slee D, Falvey S, *et al.* Laboratory batch representation of PFAS leaching from aged field soils: intercomparison across new and standard approaches[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **838**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156562.
- [64] 殷佳丽, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体全氟和水溶态氟的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(9): 1754-1760.
- Yin J L, Zheng Z C, Li T X. Distribution of total fluoride and water-soluble fluoride in soil aggregates under tea plantation of different years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(9): 1754-1760.
- [65] 于路伟, 李飞, 杨志敏, 等. 土壤性质对其吸附短链全氟羧酸的影响[J]. 中国科学: 化学, 2019, **49**(6): 906-916.
- Yu L W, Li F, Yang Z M, *et al.* Influence of soil properties on the adsorption of short-chain perfluorocarboxylates onto soil [J]. *SCIENTIA SINICA Chimica*, 2019, **49**(6): 906-916.
- [66] Ma D H, Zhong H F, Lv J T, *et al.* Levels, distributions, and sources of legacy and novel per- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in the topsoil of Tianjin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **112**: 71-81.
- [67] 王鑫格, 李娜, 许宜平, 等. 基于有机污染物生物有效性的土壤环境质量基准的探讨[J]. 生态毒理学报, 2022, **17**(1): 32-46.
- Wang X G, Li N, Xu Y P, *et al.* Discussion on soil environmental quality benchmark based on bioavailability of organic pollutants [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, **17**(1): 32-46.
- [68] Miljöinstitutet I S. Data från den nationella och regionala miljöövervakningen av miljögifter i biota[R]. Stockholm, Sweden: IVL Svenska Miljöinstitutet, 2016. 1-3.
- [69] Clements L, Gooley L, Nandy S. Holsworthy PFAS investigations-detailed site investigation report [R]. Holsworthy, Australia: Department of Defence, 2018. 230-232.
- [70] 吴颜岐, 刘莹, 宋帅, 等. 环黄渤海地区土壤介质中PFOS网格排放清单估算及不确定性分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 396-408.
- Wu Y Q, Liu Y, Song S, *et al.* Estimating grid emission inventory and uncertainty analysis of perfluorooctane sulfonate in soils in the Yellow-Bohai Sea region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(2): 396-408.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)