

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祎, 胡建林 (635)
2006~2021 年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面 O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季 VOCs 特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气 VOCs 污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晚, 张瑞芹 (689)
郑州市 PM _{2.5} 中有机的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晚, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群 PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于 LEAP 模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州河水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中 Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca 改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)
基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd 复合污染土壤中 Cd 释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曹鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展

包亚博^{1,2}, 王成尘^{1,2}, 彭吾光^{1,2}, 依代倩^{1,2}, 向萍^{1,2*}

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 环境修复与健康研究院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学云南省环境污染与食品安全及人体健康创新团队, 昆明 650224)

摘要: 微塑料(MPs)作为一种新型环境污染物已成为当下的研究热点,有关微塑料的人体健康风险和危害效应机制研究受到了广泛关注. 微塑料不断地从环境中迁移并在人体内积累,其对人群暴露的3个主要途径为经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触,主要暴露介质为食品、饮用水、灰尘和个人护理品. 目前已在人体消化系统、呼吸系统、心血管系统和生殖系统的器官、体液及排泄物中检出微塑料,丰度范围为0~1 206.94 n·g⁻¹. 现有的检测分析技术具有不同的适用范围、优势和不足,针对实验过程中可能污染样品的问题列举了实验室质量保证和质量控制的操作方法. 基于动物实验、人体细胞和器官模型的研究阐述了微塑料对人体5大系统造成的潜在健康影响和作用机制,进入人体后,微塑料可能通过诱发细胞毒性、线粒体毒性、DNA损伤和细胞膜损伤等效应过程,进而在人体各系统中引发器官的局部炎症、菌群失调和代谢紊乱等严重后果,来危害各系统及相关器官的正常功能. 最后,提出了现有研究中普遍存在的不足,可为未来微/纳米塑料对人体健康影响的研究提供方向.

关键词: 微塑料(MPs); 污染; 暴露途径; 人体富集; 毒害效应

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1173-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303260

Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review

BAO Ya-bo^{1,2}, WANG Cheng-chen^{1,2}, PENG Wu-guang^{1,2}, NONG Dai-qian^{1,2}, XIANG Ping^{1,2*}

(1. Institute of Environmental Remediation and Human Health, School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Provincial Innovative Team of Environmental Pollution, Food Safety, and Human Health, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: The effect of microplastics on the ecological environment and human health has become a topical issue, and research on the risks and harmful effects of MPs on human health in particular has attracted widespread attention. Due to the characteristics of small size, low degradability, and easy migration, MPs continuously migrate from the environment to the human body, and their main exposure pathways are oral ingestion, inhalation, and dermal contact, with the main exposure media being food, drinking water, dust, personal care products, etc. MPs have been detected in organs, fluids, and excreta of digestive, respiratory, cardiovascular, reproductive systems, etc. The abundance range of MPs in the human body is 0~1 206.94 particles per gram. After entering the human body, MPs can cause cytotoxicity, mitochondrial toxicity, DNA damage, cell membrane damage, and other effects on human cells and organs, leading to serious consequences such as local inflammation, ecological imbalance, metabolic disorders, etc., in various systems. Owing to their small specific surface area, they can also adsorb pollutants such as heavy metals, organic pollutants, antibiotics, pathogens, and harmful microorganisms, causing combined toxicity and immunotoxicity. In the end, we highlighted general deficiencies in existing studies and provided directions for future research on the influence of MPs on human health.

Key words: microplastics(MPs); contaminants; exposure pathways; human accumulation; toxic effects

微塑料(microplastics, MPs)指直径<5 mm的塑料微粒,是近年来受国内外广泛关注的一种新型污染物. 自20世纪50年代大规模生产以来,塑料被广泛应用于建筑、包装、运输、个人护理产品和医药,全球塑料产量在1950~2020年间由150 t增长到3.67亿t,其中2020年我国塑料产量高达1.05亿t^[1]. 据统计,2019年全球塑料制品回收利用率仅9%,按传统模式处理率69%(包括:填埋和焚烧),无人管理而滞留环境的部分占22%^[2]. 塑料制品的滥用和不合理处置是MPs产生的主要原因^[3]. MPs根据成因可以分为原生微塑料和次生微塑料. 原生微塑料指特地生产用于添加到个人护理用品和化妆品中的塑料微粒^[4]. 次生微塑料指环境中原先较大的塑料制品在UV辐射、生物作用和磨损等作用下降解而形成的塑料微粒^[5]. 随着研究发展的需要,将微塑料依据直径大小进一步细分为:大塑料颗粒(>25 mm)、中塑料颗粒(5~25 mm)、微塑料颗粒(1 μm~5 mm)、亚微塑料颗粒(100

nm~1 μm)和纳米塑料颗粒(<100 nm)^[6].

由于粒径小、易迁移和降解等特性^[7],微/纳米塑料(M/NPs)广泛分布于全球海洋、淡水、土地和大气生态系统中. 近年来,伊朗新鲜积雪^[8]、青藏高原河流^[9]、阿尔卑斯山冰川^[10]、北极中央盆地地下水^[11]和中国海底沉积物^[12]中均检测出M/NPs,其潜在的生态风险受到了广泛关注. M/NPs进入生态系统后,不仅会影响其生态系统服务功能,同时对动物、植物和微生物产生有害影响^[13]. 近年来,越来越多的研究发现M/NPs可以通过口摄入和呼吸吸入进入人体,由于M/

收稿日期: 2023-03-31; 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 云南省农业基础研究联合专项重点项目(202101BD0700 01-023); 国家林业和草原局林草科技创新青年拔尖人才项目(2020132613); 国家自然科学基金项目(41967026); 云南省高层次人才引进计划项目(YNQR-QNRC-2018-049); 云南省创新团队项目(202005AE160017)

作者简介: 包亚博(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境健康和污染物毒理检测分析, E-mail: baoyabo2022@126.com

* 通信作者, E-mail: xiangping@swfu.edu.cn

NPs粒径小且比表面积大,能够作为载体吸附其他有毒污染物(如:重金属、持久有机污染物、抗生素、多环芳烃和多氯联苯等)及有害病原体(如:致病细菌和真菌等)并将它们带入人体内,从而产生健康危害^[3].此外,M/NPs在人体内降解后,有毒添加剂(如:增塑剂、合成抗氧化剂、阻燃剂、光稳定剂和染色剂等)随之浸出^[14,15],无疑会加重其毒性.目前,有关M/NPs的人群暴露及其健康危害机制的研究成为了当下的研究热点.鉴于此,本文总结了M/NPs的人群暴露途径,在不同组织器官的富集特征,及暴露后对人体产生的健康效应机制,并提出了该领域现有研究的不足和未来可能的热点方向.

1 微/纳米塑料的人体暴露途径

人体与外界环境时刻进行着物质交换(图1),摄入食物、呼吸空气和皮肤接触的过程伴随着M/NPs暴露.有研究表明,经口摄入和呼吸吸入是M/NPs人体暴露主要的途径,虽然目前缺乏M/NPs穿透皮肤屏障被吸收的直接证据,但理论上直径<100 nm的纳米塑料(NPs)能够穿透皮肤屏障被吸收^[16,17].

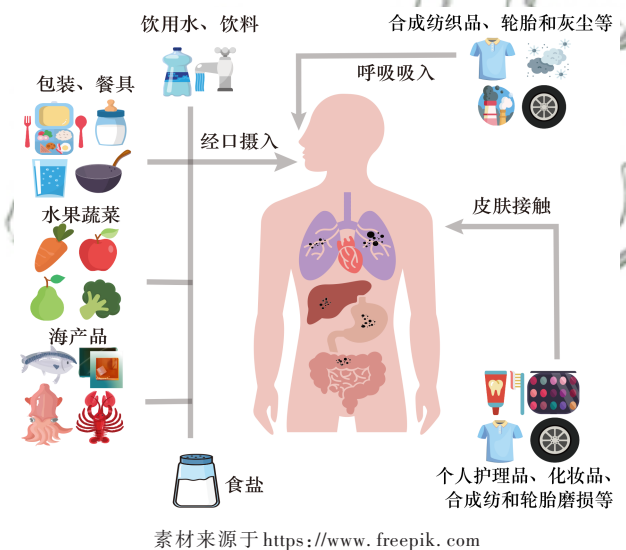


图1 微/纳米塑料的暴露源头与途径

Fig. 1 Exposure pathways and sources of micro/nano-plastics

1.1 伴随食物经口摄入

研究人员在海产品、饮品、食盐、一次性塑料餐具和果蔬中检测到了M/NPs,并指出经口摄入是M/NPs最主要的暴露途径.有研究表明,M/NPs能够沿着食物链向更高营养级转移,最终随着食物转移到人的消化系统中.Nor等^[18]建立了儿童和成人终生暴露模型,估算出一个儿童或成人每天摄入M/NPs的中位数分别为553个与883个.Cox等^[19]汇编了来自盐、海鲜、蜂蜜、饮用水和糖的M/NPs污染数据,并结合饮食习惯估算出美国民众每人每年对M/

NPs的摄入量约 $3.9 \times 10^4 \sim 5.2 \times 10^4$ 个.近年来,食物中M/NPs的污染成为人们关注的焦点.

1.1.1 海产品M/NPs污染

已有研究证实了一些浮游动物和滤食性动物能够直接摄入M/NPs.目前,全球已累计在120多种具有重要渔业价值的物种中发现了M/NPs污染,其中M/NPs在贝类、鱼类、甲壳类和海藻等海产品中被大量检出^[20-22].据统计,消费者每食用100 g贻贝将摄入70种M/NPs.此外,海洋生物消化道和鳃中M/NPs的富集更为丰富,食用完整的或不完全去除内脏的海产品会增加M/NPs对人体的暴露量^[23,24].最近的一项来自韩国的研究也证实,其民众每人每年通过食用4种常售双壳类造成的M/NPs摄入量达212个^[25].

1.1.2 饮用水和饮料M/NPs污染

M/NPs普遍存在于各类饮用水和饮料中.其中,水源污染、处理过程中污染和自来水管管壁脱落是自来水被M/NPs污染的主要原因^[26].Kosuth等^[27]研究发现自来水中M/NPs检出率高达81%,平均丰度为 $5.45 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,每人每年因自来水摄入量约为5800个.因具有易携带性、选择多样性和食品安全性等优点,瓶装水和饮料的消费日益增长,自1940~2015年,法国民众每人每年对瓶装水的消费量从6 L增长至140 L^[28].瓶装水和饮料中M/NPs的主要来源是塑料瓶盖与包装瓶.Kankanige等^[29]对泰国市场常售的一次性塑料瓶装水进行分析,结果表明M/NPs平均丰度为 $(140 \pm 19) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,粒径约 $6.5 \sim 20 \mu\text{m}$,其主要聚合物类型为聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚丙烯(PP)和聚酰胺(PA).相比自来水,饮用瓶装水导致更高的M/NPs摄入,若人群仅通过饮用瓶装水而达到推荐饮水量,则每人每年因此产生的M/NPs额外摄入量将高达 9×10^4 个,若仅饮用自来水,这一数值将减少到 4×10^3 个^[19].可见饮用水M/NPs污染已成为人类摄入M/NPs的重要来源之一,建议减少饮用塑料包装的水或饮料以有效降低M/NPs的摄入量 and 健康风险.

1.1.3 食盐M/NPs污染

食盐能提供人体必需元素,是人类长期的必需品,然而被M/NPs污染的食盐是一个慢性暴露源.商品盐(包括:海盐、井盐、岩盐和湖盐等)被M/NPs污染的问题已在全球各国广泛报告^[30-32].据Lee等^[33]研究证实,全球94%的盐产品中含有M/NPs,包括27种聚合物类型,其中PET、PP和PE占绝大多数.食盐被M/NPs污染是多源的,在采集、风干、加工和运输等过程中,食盐都可能被M/NPs污染.更有研究发现,海盐样本中M/NPs的丰度远高于岩盐及湖盐样本^[30],这可能与食盐产生的天然环境中M/NPs污染程度有关.

1.1.4 水果蔬菜的 M/NPs 污染

2022 年,Conti 等^[34]首次在食用水果(苹果和梨)与蔬菜(胡萝卜、花椰菜、生菜和土豆)中发现 M/NPs. Dong 等^[35]研究发现,1 μm 的聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)能够进入胡萝卜根并积累在细胞间隙中,而 0.2 μm 的 PS-MPs 则能够迁移到叶子上,并且土壤-植物系统中 M/NPs 的迁移受到重金属的影响. As(Ⅲ)能使得细胞壁变形以及 PS-MPs 携带负电荷的面积增加,从而使更大直径的 PS-MPs 得以进入胡萝卜细胞. 此外,Liu 等^[36]还在食用生鸡蛋中检测出 M/NPs,蛋黄中 M/NPs 的平均数量高于蛋白,煮熟操作后的结果不变. 鸡蛋中微塑料可能来自鸡体内,或是包装和运输过程^[37].

1.1.5 塑料包装、餐具和厨具的 M/NPs 污染

食品接触到塑料包装、一次性餐具和厨具而引发 M/NPs 污染的问题广泛存在. Du 等^[38]对中国 5 个城市常用的外卖餐盒进行研究,发现所有餐盒中都存在 M/NPs,它们主要源自塑料餐盒内壁脱落和灰尘沉降. 高温、机械应力和长时间存放食品都能导致塑料餐具产生更多 M/NPs. 假设每人每日消耗 4~5 个一次性塑料水杯,每人每年将因此摄入 $3.7\times10^4\sim8.9\times10^4$ 个 M/NPs^[39]. 使用塑料奶瓶而导致配方奶粉受到 M/NPs 污染的问题值得注意, Li 等^[40]研究发现,聚丙烯(PP)奶瓶一次性释放的 M/NPs 的丰度高达 $1.62\times10^7\text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能对婴儿健康构成风险. 此外,不粘锅涂层通常以聚四氟乙烯(PTFE)作为主要材料,涂层破损能导致 2.3×10^6 个微粒脱落^[41].

1.2 呼吸与皮肤接触暴露

M/NPs 在室内外环境空气中普遍存在,其主要来源是合成纺织品的磨损与洗涤、合成橡胶轮胎及建

材的磨损、灰尘的悬浮与扩散、以及空气中悬浮的 M/NPs 能够直接地和持续地被吸入人体呼吸道及肺部^[42,43]. M/NPs 进入上呼吸道后,大部分能够通过咳嗽、打喷嚏以及擤鼻涕等方式排出,或随黏液一起吞咽,其余进入肺部的 M/NPs 中大部分能通过吞噬作用和淋巴运输清除,余下的则会积累在肺部^[42]. 有研究者使用人体模型进行空气采样,估算出一个轻度活动的男性每天能吸入 272 个 M/NPs^[44].

个人护理用品(包括:牙膏和洁面乳)、化妆品(眼影)、合成纺织品和灰尘是皮肤接触 M/NPs 的主要源头^[42,45]. 作为人体的物理屏障,皮肤能够防止环境微粒的渗透,直径 < 100 nm 的微粒才能穿透横纹肌角质层^[16],因此普通的皮肤接触难以使 M/NPs 进入人体. 有研究表明直径 < 40 nm 的金属银纳米粒子可以穿透皮肤,19 nm 的氧化锌纳米粒子可以透过皮肤进入循环系统^[46]. Vogt 等^[47]研究发现,当毛鞘被拔出时,40 nm 的纳米颗粒可以穿透毛囊进入表皮细胞. 可能与其他纳米粒子一样,老化的皮肤、患伤处和毛孔处对 NPs 有更强的渗透能力^[48]. 然而目前有关 M/NPs 皮肤接触暴露的研究较少,并且缺乏关于 M/NPs 穿透皮肤屏障和产生毒性效应的直接证据,但不能排除 M/NPs 能够穿越皮肤屏障并诱发氧化应激、局部炎症和异物反应的推论.

2 微塑料在人体内的富集情况与检测分析技术

2.1 微塑料在人体内的富集状况及影响因素

由于人体实验涉及到生命健康和人伦道德等问题,目前关于 M/NPs 的人体富集证据较为匮乏,有限的证据主要源于对人体体液、排泄物、人体器官废弃物和尸体的检测. 现将目前为止在人体中检测出 M/NPs 富集情况总结为表 1.

表 1 人体中微/纳米塑料的富集情况
Table 1 Accumulation of micro/nano-plastics in the human body

位置	形状	尺寸	丰度	聚合物类型 ¹⁾	检测方法	文献
结肠组织	细丝和纤维	(1.1 ±0.3) mm	(28.1±15.4) $\text{n}\cdot\text{g}^{-1}$	PC、PA 和 PP	傅里叶变换红外光谱法和体式显微镜	[49]
结直肠腺癌肿瘤组织	没有提及	1 ~ 613 μm	(702.68±504.26) $\text{n}\cdot\text{g}^{-1}$	PE、PMMA 和 PA	衰减全反射-傅里叶变换红外光谱法、拉曼光谱法和光学显微镜	[50]
结直肠腺癌正常组织	没有提及	1 ~ 743 μm	(207.78±154.12) $\text{n}\cdot\text{g}^{-1}$	PE、PMMA 和 PA	衰减全反射-傅里叶变换红外光谱法、拉曼光谱法和光学显微镜	[50]
结肠组织	没有提及	1 ~ 1 299 μm	(207.78±154.12) $\text{n}\cdot\text{g}^{-1}$	PE、PMMA 和 PA	衰减全反射-傅里叶变换红外光谱法、拉曼光谱和光学显微镜	[50]
肝硬化肝组织	没有提及	4 ~ 30 μm	$3.2\text{ n}\cdot\text{g}^{-1}$	PS、PET 和 PVC	尼罗红染色后荧光显微镜观察和拉曼光谱法	[51]
粪便	大多呈碎片和薄膜状,少量呈球形或纤维状	50 ~ 500 μm	$2\text{ n}\cdot\text{g}^{-1}$	PP、PET、PS 和 PE	傅里叶变换红外光谱法	[52]

续表 1

位置	形状	尺寸	丰度	聚合物类型 ¹⁾	检测方法	文献
肺组织	碎片和纤维	碎片平均尺寸:(3.92±0.67) μm;纤维平均长度:(11.23±1.96) μm	没有提及	PP 和 PE	光学显微镜和拉曼光谱法	[53]
肺组织	微珠(49%)、碎片(43%)和薄膜(8%)	长度:0~2 500 μm,宽度:0~90 μm	(0.69±0.84) n·g ⁻¹	PP、PET 和树脂	微傅里叶变换红外光谱	[54]
口痰	没有提及	中值:75.43 μm;四分位值:44.67~210.64 μm	没有提及	共识别 21 种,主要为 PU、聚酯、CPE 和醇酸清漆	激光直接红外成像、傅里叶变换红外光谱和光学显微镜	[55]
办公室人员鼻腔冲洗液	纤维(87%)和其他(13%)	没有提及	没有提及	PVC 和 PA	偏振光显微镜和激光直接红外成像	[56]
快递员鼻腔冲洗液	纤维(83.8%)和其他(16.3%)	没有提及	没有提及	PA 和 PE	偏振光显微镜和直接红外激光化学成像	[56]
办公室人员口痰	纤维(83.3%)和其他(16.7%)	没有提及	没有提及	PVC 和 PA	偏振光显微镜和激光直接红外成像	[56]
快递员口痰	纤维(94.3%)和其他(5.7%)	没有提及	没有提及	PC、PVC	偏振光显微镜和激光直接红外成像	[56]
血液	没有提及	直径≥700 nm	1.6 μg·ml ⁻¹	PET、PE、PS、EPS、ABS 和 PMMA	裂解-气相色谱/质谱联用	[57]
血栓	块状	1~6 μm	26 个血栓中,发现 1 个 MPs	低密度聚乙烯	拉曼光谱	[58]
隐静脉组织	不规则形状(90%)	平均长度:(119.59±226.82) μm,平均宽度:(41.27±62.80) μm	(14.99±17.18) n·g ⁻¹	醇酸树脂、PU、PVA 和尼龙-EVA20%	微傅里叶变换红外光谱	[59]
胎盘组织	没有提及	5~10 μm	4 个胎盘组织中,发现 12 个 MPs	3 颗为 PP,9 颗无法确定聚合物类型	拉曼光谱法和光学显微镜	[60]
胎盘组织	碎片、纤维和薄膜	20.34~307.29 μm	(2.70±2.65) n·g ⁻¹	PVC(43.27%)、PP(14.55%)和 PBS(10.90%)	激光直接红外成像	[61]
胎盘组织	没有提及	没有提及	18 n·g ⁻¹	PA(50.09%)、PU(28.75%)和 PE(11.01%)等	激光直接红外成像	[62]
母乳	碎片(91%)和微球(9%)	≤3 μm(29%)、4~9 μm(47%)和≥10 μm(24%)	没有提及	PE(38%)、PVC(21%)和 PP(17%)等	体式显微镜和拉曼光谱法	[63]
母乳	没有提及	没有提及	20.2 n·g ⁻¹	PU(53.18%)、PA(24.46%)、PE(9.33%)和 PMMA(6.84%)	激光直接红外成像	[62]
胎粪	没有提及	没有提及	54.1 n·g ⁻¹	PA(60.22%)和 PU(22.58%)	激光直接红外成像	[62]

1) 聚合物类型中字母为不同种类塑料名称的缩写,其中,PS 表示苯乙烯、PET 表示聚对苯二甲酸乙二醇酯、PVC 表示聚氯乙烯、PP 表示聚丙烯、PE 表示聚乙烯、PA 表示聚酰胺也表示尼龙、PC 表示聚碳酸酯、PMMA 表示聚甲基丙烯酸甲酯、PU 表示聚氨酯、CPE 表示氯化聚乙烯、PVA 表示聚乙烯醇、尼龙-EVA20% 表示尼龙和 20% 乙烯醋酸乙烯共聚物混合物、PBS 表示聚丁二酸丁二醇酯、EPS 表示聚苯乙烯泡沫、ABS 表示丙烯-苯乙烯-丁二烯共聚物

自 2019 年首次 在人类粪便中检测出 M/NPs 以来,至今已在人体的消化系统、呼吸系统、心血管系统和生殖系统的器官、体液和排泄物中检测出 M/NPs,这表明 M/NPs 在人体内普遍存在. 其中,血液、血栓和隐静脉血管中的检测结果支撑了 M/NPs 能够随着血液在血管中迁移的假设. 此外,在人类母乳、胎盘、胎粪和婴儿粪便中检测到 M/NPs 的存在,发现粪便中出现的 MPs 随着婴儿母乳摄入量而增加,说明婴儿粪便中 M/NPs 的主要来源可能是受污染的母乳和奶粉等^[62]. 胎粪是婴儿在出生后的首次排泄

物,主要为母体内由胎盘供给的营养物质代谢而来,证实了经人类胎盘离体模型的 M/NPs 转运,在动物实验中发现 MPs 能够代际传递^[64~67]. 以上结果提示了 M/NPs 通过母体传递到胎儿或新生儿体内的可能性,包括 M/NPs 可能会通过乳汁传递和胎盘转运,然而,婴儿胎粪与母体胎盘中的 M/NPs 物质构成存在差异,提示了部分 M/NPs 可能源自母体宫内暴露源^[62].

有研究表明,M/NPs 普遍在食品 and 人类消化道组织中的富集,并且具有穿越人体细胞和组织屏障的

能力,以上证据支撑了M/NPs能够从消化道内转移并积累到消化道组织中的推测,这一过程可能受到多种因素影响,包括M/NPs的尺寸、形状、表面形态、聚合物类型、暴露途径、暴露时间和暴露浓度、人体组织特异性和健康状况。其中,粒径是影响M/NPs被细胞内化的主要因素^[68~71]。较大粒径的M/NPs可能无法穿透细胞屏障进入细胞内,但会对细胞膜造成物理损伤;在进入细胞的M/NPs中,稍大的颗粒主要通过吞噬作用进入细胞中,较小的微粒则通过胞饮作用、网格蛋白和小泡介导进入细胞,它们最终都会在细胞质中积累^[70]。聚苯乙烯纳米塑料(PS-NPs)比PS-MPs更容易进入细胞,并且细胞对M/NPs的摄取量与暴露时间成正比^[72]。此外,人体疾病可能是驱动M/NPs富集的关键因素之一。Cetin等^[50]研究发现,正常人结肠组织中的M/NPs数量远低于直肠癌患者结肠肿瘤组织中M/NPs的数量。Horvatits等^[51]研究发现,相比无潜在肝病患者,肝硬化患者的肝组织中M/NPs丰度更高。Chen等^[73]对肺组织中的M/NPs进行检测,其中2/3的M/NPs存在于肿瘤组织中。但不能排除M/NPs可能是诱发疾病的原因,它们的因果关系还需要进一步深入研究。此外,职业条件(包括:工作时长和工作环境等)和人群年龄也会影响M/NPs在呼吸系统上的积累量^[73,74]。其中,室内工作人员鼻腔冲洗液中的M/NPs丰度高于快递员,这可能是由于室内灰尘样本中的M/NPs丰度比室外的灰尘样本高而导致的。另外,组织特异性是影响M/NPs富集的可能因素之一,结肠作为营养物质吸收的器官可能有更高的M/NPs渗透性,同时,消化过程导致M/NPs进一步碎

裂和降解,使得结肠能够接触到更高丰度和更小粒径的M/NPs,以上因素导致了结肠中M/NPs的积累量明显高于其他器官。虽然M/NPs在人体内的存在已经被证实,但其在各系统中的积累、转移、最终归宿和影响因素仍然存在许多知识空白,需要更多探索性和验证性的研究,以为人体健康风险评估提供完整和可靠的数据。

2.2 人体中M/NPs的样本处理及检测技术

根据表1可知,目前在人体富集的M/NPs的检测分析研究中,需要先后经过取样、预处理(包括:消解、过滤和分离)以及微塑料的表征。微塑料的表征技术是核心,通常分为物理特性分析视觉检测和化学特性检测技术。视觉观察是通过直接使用人眼或者借助光学显微镜对M/NPs进行大致分类和计数的检测技术。由表1可知,研究中使用到了光学显微镜(包括:体式显微镜、荧光显微镜和偏振光显微镜),主要用于物理特性检测(包括:滤膜上M/NPs的物质识别、计数、尺寸、形态和颜色)。然而,观察结果常受到实验人员主观选择、显微镜质量以及M/NPs自身物理特性影响,导致较大误差的产生,故不建议单独使用^[75,76]。

根据表1可知,先前的研究中主要采用的化学检测技术为拉曼光谱法(Raman)、傅里叶变换红外光谱法(FT-IR)、热裂解-气相色谱/质谱联用法(Pyr-GC-MS)和激光直接红外光谱法(LD-IR)等技术对人体内M/NPs的化学特性(包括:聚合物类型、化学键和官能团等)进行检测,现将人体内M/NPs的化学特性检测技术总结为表2。

表2 人体中微/纳米塑料的主要检测方法

Table 2 Main detection methods for micro/nano-plastics in the human body

检测分析方法	原理	优点	缺点
拉曼光谱法(Raman)	通过单色激光激活分子振动,测量分子结构	①能够检测尺寸较小微粒; ②不受样品厚度和湿度的影响; ③非破坏性	样品纯度要求高,塑料添加剂和颜料的强荧光会干扰聚合物识别
傅里叶变换红外光谱法(FT-IR)	通过检测化学键和官能团对不同频率下红外光吸收的能力,分析样品类型	①扫描速度快、分辨率高、光谱范围广和精度高; ②非破坏性	①只能检测尺寸较大微粒; ②容易受到样本中微小液体的影响
热裂解-气相色谱/质谱联用法(Pyr-GC-MS)	通过高温加热以热裂样品,进行气相色谱分离后用质谱进行分析鉴定	①同时检测微塑料和塑料添加剂; ②对样品的预处理要求相对较低; ③检测精度和灵敏度高,能够检测纳米塑料	①仅用于化学检测,无法分析微塑料的尺寸、形状和数量; ②破坏性强,样品损失大,几乎无法回收
激光直接红外光谱分析法(LD-IR)	使用红外激光束直接照射样品,通过测量物质对不同波长红外光的吸收光谱来研究样品的结构和化学成分	①高精度、高分辨率和高灵敏度等优点,适用于样品丰度较低以及吸收强度较弱的分析应用; ②非破坏性	①成本高; ②样本要求高,样品表面不够光滑和平坦可能会影响结果; ③受环境温度和湿度影响

上述不同检测分析方法在识别和量化M/NPs方面具有各自的优劣。然而,组合技术利用了技术之间相互补充的特点,弥补了技术单独使用时的不足。例如,微拉曼(μ Raman)和微傅里叶(μ FTIR)是现在主

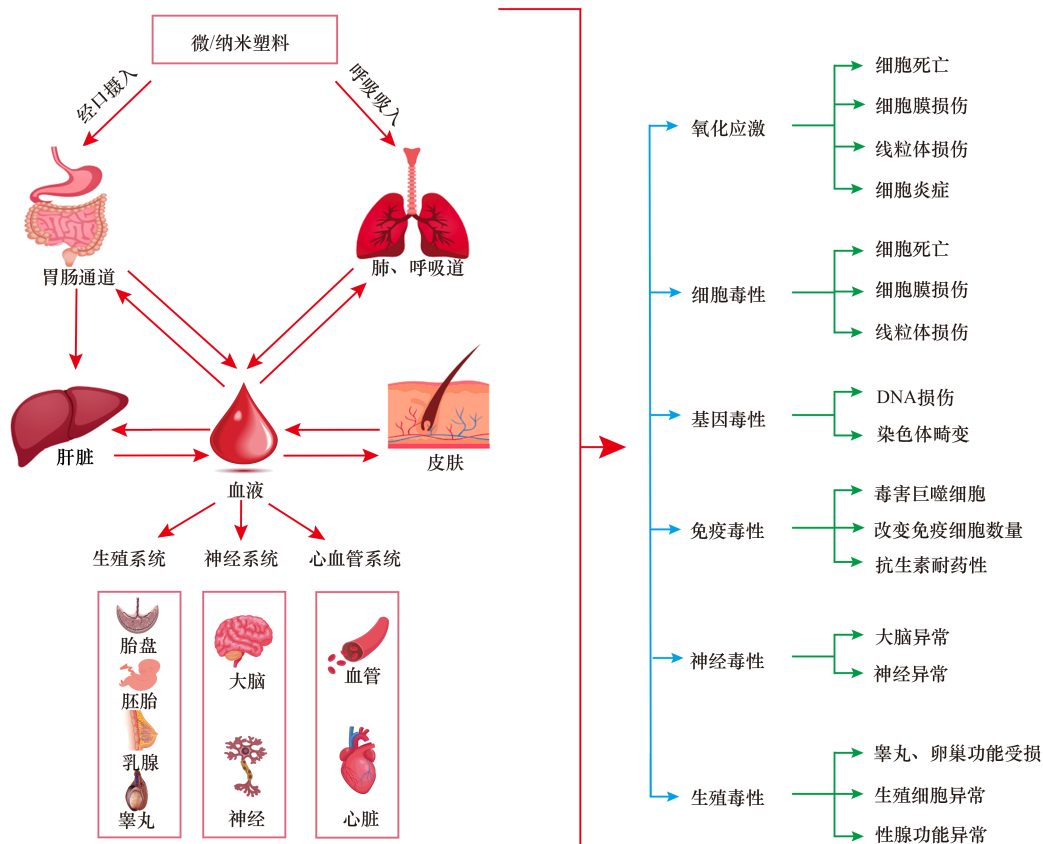
流的检测分析方法,它们分别为拉曼光谱法和傅里叶变换红外光谱法与光学显微镜相融合的组合技术,能够同时检测到M/NPs的物理化学特性指标,扩大微粒的检测范围并降低漏检率。

此外,取样和预处理过程中也存在许多不足之处.首先,人体 M/NPs 取样的非标准化会导致样品存在被污染的风险,从而降低结果的准确性.为了实验室质量保证和质量控制,研究人员采取一些措施,例如:①减少塑料制品使用,包括使用棉制实验服与手套、玻璃或金属器皿盛装样品和金属滤网过滤.②减少样品、试剂和设备的污染,包括取样后尽快用纯水或过氧化氢冲洗后迅速封闭保存,所有试剂和设备用锡箔覆盖,用超纯水和乙醇清洁器皿等.③建立“空白对照组”用以对实验过程中产生的 M/NPs 污染的样本进行校正.④在无窗和无风的超净工作台操作实验,避免 M/NPs 因气流再悬浮污染样品.⑤每个样品单独处理,避免相互污染.其次,人体样本中 M/NPs 的提取多采用化学消解法,即使用酸性或碱性的化学溶液对样品进行消解,旨在减少其他背景杂质的干扰.然而,化学消解效果受消解试剂类型、消解温度和时间的影响,不当或过度消解则可能会破坏 M/NPs 聚合物宏观结构从而使检测结果出现误差.针对上述不足之处,应该根据适用条件和检测目的选择合适的技术进行检测分析,改良并制定 M/NPs

取样和提取的统一标准,鼓励业界内积极开发成本低以及检测结果全面的检测分析技术,以促进该领域研究的发展.

3 微塑料暴露对人体健康影响的机制研究

M/NPs 能穿越组织屏障转移至血液,随后到达全身各系统并在其组织和体液中不断积累,最终产生毒性效应^[77]. M/NPs 进入细胞后,能引发多种毒性效应,包括氧化应激、细胞毒性和基因毒性,具体表现为细胞死亡、线粒体毒性、细胞膜损伤、DNA 损伤和染色体畸变等,进而在人体各系统中引发器官的局部炎症、菌群失调以及代谢紊乱等严重后果,增加了相关疾病的发病风险,甚至会引起肿瘤和癌症的发生(图 2).此外,由于鼠类在一定程度上与人具有生理相关性,常将鼠类用于研究 M/NPs 对有机体健康影响.然而动物模型实验存在成本高、周期长、不易操作和有违伦理等问题,研究人员也尝试运用人体细胞和体外器官模型来研究 M/NPs 对人体健康风险.基于此,下文综述了 M/NPs 对人体各个系统的潜在健康影响及其内在机制.



素材来源于 <https://www.freepik.com>

图 2 摄入和吸入微/纳米塑料对人类健康造成的潜在风险

Fig. 2 Potential risks of ingestion and inhalation of micro/nano-plastics to human health

3.1 消化系统

M/NPs 首先影响消化系统.当食物依次通过口

腔、食道、胃和肠道时, M/NPs 会随之迁移, 其中一部分被排出体外, 另一部分则在体内积累, 以上 M/NPs

可能引发消化道炎症、屏障通透性增强和微生物失调等。Zhang 等^[72]推测 PS-MPs 可能通过破坏人类结肠上皮细胞线粒体电子传递链(ETC)以诱导线粒体去极化,从而导致早期细胞凋亡。Luo 等^[78]研究发现摄入 PS-MPs 能够加重小鼠结肠炎症,具体表现为结肠长度缩短、炎症加重、粘液分泌减少和结肠通透性增加。Fournier 等^[79]研究表明,M/NPs 影响婴儿肠道菌群种类组成,减少有益菌群丰度、增加有害菌群丰度,并且菌群变化幅度受到 M/NPs 的尺寸、丰度和种类的影响。Tong 等^[80]研究发现,幽门螺杆菌(*H. pylori*)在聚乙烯微塑料(PE-MPs)表面形成生物膜,这加快了 *H. pylori* 在小鼠胃中的定居速度,从而加剧胃部损伤和炎症。此外,随着 PS-MPs 浓度和表面粗糙程度的增加,人类结肠腺癌细胞(Caco-2 细胞)的细胞膜完整性遭到破坏,细胞存活率逐渐下降^[81]。小鼠摄入高浓度 PE-MPs 后出现明显的肠道炎症,其与炎症相关跨膜受体蛋白和转录因子表达也随之升高^[82]。

肝脏作为人体内最大的代谢器官,影响着脂肪的消化分解和脂溶性维生素的吸收。M/NPs 可能对肝脏产生多种毒性,包括氧化应激、细胞膜损伤、细胞纤维化、脂肪代谢混乱和能量代谢混乱^[83-85]。M/NPs 通过诱导人类正常肝细胞(HL7702 细胞)中细胞核 DNA 和 mtDNA 损伤,以及激活 cGAS/STING 信号通路,从而导致肝纤维化^[83]。斑马鱼经过 M/NPs 长期暴露,其脂肪代谢混乱,体重下降,并且其脂肪酸代谢相关的基因表达水平出现降低趋势^[86]。此外,M/NPs 的毒性受多种因素的影响,包括 M/NPs 的物理化学特性、M/NPs 与其他污染物之间的相互作用。Wang 等^[87]研究发现,人工胃液能增强 PS-MPs 对肝细胞的毒害,包括肝细胞的形态学改变、细胞膜损伤和氧化应激引起的细胞凋亡增加。Banerjee 等^[88]研究发现,较小的微粒更容易被人肝癌细胞(HepG2 细胞)内化,相比羧基化或非功能化 PS-M/NPs,胺化 PS-M/NPs 对 HepG2 细胞毒性更大。此外,PS-MPs 与双酚 A(BPA)的联合暴露能干扰脂肪代谢、加剧肝毒性,并且干扰与多种脂质代谢过程相关的基因等,导致脂肪变性^[89]。

3.2 呼吸系统

肺是呼吸系统最重要的器官,目前关于 M/NPs 对呼吸系统影响的研究主要是基于肺细胞开展的。M/NPs 能够诱导肺细胞活性氧(ROS)增加和线粒体膜电位下降,改变细胞正常结构,从而提高急性慢性呼吸系统疾病的发病风险。Zhang 等^[90]研究发现,聚对苯二甲酸乙二醇酯纳米塑料(PET-NPs)诱导肺癌人类肺泡细胞(A549 细胞)发生氧化应激和线粒体膜电位下降。Goodman 等^[91]研究发现,PS-MPs 能诱发 A549

细胞形态改变,使其细胞质突起增加和细胞接触丧失,PS-MPs 通过影响人正常肺支气管上皮细胞(BEAS-2B 细胞)间连接蛋白,导致肺屏障功能障碍,增加了慢性阻塞性肺疾病的风险^[92]。此外,M/NPs 的尺寸影响其内化速度和肺部的微生物调节。相比 20 nm 和 100 nm 的 PS-NPs,A549 细胞对 40 nm 的 PS-NPs 的内化速度更快。这表明 M/NPs 可能存在内化速度相对较快的粒径范围^[71]。Zha 等^[93]研究发现,MPs 与 NPs 均可诱发小鼠鼻腔和肺部微生物菌群失调,但 NPs 比 MPs 对肺部微生物区系的影响更大。此外,环境中 M/NPs 的丰度与暴露时间影响着肺部患病风险。例如,合成纺织业和植绒业的工人长时间接触高丰度的 M/NPs,其患肺炎和慢性支气管炎风险远高于普通人^[94]。

3.3 生殖系统

不孕不育率的持续增长促使人们关注污染物对生殖系统的影响。M/NPs 可能会引发细胞氧化应激、抗氧化活性降低和线粒体功能障碍,进而引发生殖系统能量代谢失衡、激素紊乱和性器官损伤,最终影响生殖能力下降,造成不孕不育。M/NPs 造成的雄性生殖毒性包括:睾丸质量下降、睾酮分泌减少、血睾屏障(BTB)遭受破坏和生精小管损伤,从而导致生精功能障碍和精子畸形率上升,以及精子活性和数量的下降^[95-97]。Jin 等^[98]研究证实,< 10 μm 的 MPs 能进入睾丸细胞,并在小鼠睾丸中积累。进入睾丸后,PS-MPs 通过 Hippo 信号通路诱导幼鼠睾丸发育障碍^[99],通过氧化应激激活 MAPK-Nrf2 通路,从而破坏大鼠 BTB 的完整性^[97]。此外,常用的塑化剂邻苯二甲酸盐不仅会影响性激素分泌,还能够增加 PS-MPs 导致的睾丸转录组改变,诱导氧化应激^[100]。

M/NPs 诱发的雌性生殖毒性包括卵巢毒性、发情期缩短和影响后代的发育与健康。其中,卵巢毒性包括卵巢炎症、卵泡数量减少、卵巢细胞纤维化及细胞凋亡和颗粒细胞脱落^[101-103]。此外,由于孕期和婴儿期是环境暴露的窗口期,环境污染物容易影响胎儿的健康与发育。PS-NPs 通过影响肌肉和脂质的代谢延缓小鼠胎儿生长,导致其体重下降^[104]。PS-NPs 能在小鼠间存在代际传递现象,并能在子代大脑中积累,导致子代神经干细胞功能、神经细胞组成变化和神经发育异常,从而增加其神经发育缺陷和大脑功能障碍的风险^[105]。胎盘的主要功能是将营养物质从母体转运至胎儿,提供胆固醇和类固醇激素以维持妊娠和胎儿发育。先前关于胎盘模型的研究表明,M/NPs 的尺寸、表面特性、官能团和蛋白冠的不同组成能够影响胎盘对 M/NPs 的摄取和转运^[66]。人血白蛋白是提升 M/NPs 的转运的关键因素^[106]。此外,一些

塑料添加剂被视为内分泌干扰物,需关注妊娠期暴露塑料添加剂对相关激素的干扰,及其与胎盘功能相关基因之间存在的潜在相关性^[107]。

3.4 免疫系统

M/NPs 对免疫系统的毒性主要包括免疫毒性、提高有害微生物和病原体的感染能力。其中,巨噬细胞和淋巴细胞是 M/NPs 免疫毒性的主要对象。食品包装释放的 N/NPs 能够直接被小鼠巨噬细胞吸收和积累^[108]。PS-NPs 进入人类 THP-1 巨噬细胞后,能诱导 ROS 增加,导致核损伤与线粒体膜电位下降,从而降低细胞生存力。其中,由不同结构和粒径组成的 PS-NPs 混合物能产生更高的细胞毒性,甚至改变 THP-1 巨噬细胞形态^[109]。Çobanoğlu 等^[110]发现 PE-MPs 对体外人外周血淋巴细胞产生基因毒性,增加其微核(MN)、核质桥(NPB)和核芽(NBUD)形成的频率。此外,M/NPs 可能通过干扰免疫相关的基因和蛋白质影响免疫调节。PE-MPs 暴露增加了小鼠血液内中性粒细胞数量及免疫球蛋白 A(IgA)水平,并改变脾脏内的淋巴细胞亚群结构^[111]。

受污染的 M/NPs 作为载体,提高了病原体和有害微生物对人体的感染能力,这对免疫系统健康造成了严重威胁。Wang 等^[112]研究发现,大量甲型流感病毒(IAV)能够富集在 PS-MPs 上,并通过内吞作用进入 A549 细胞中,这促进了 IAV 对 A549 细胞的感染。Kampf 等^[113]研究发现,冠状病毒能连续 9 d 在塑料表面保持传染性。紫外线辐射下老化的 M/NPs 对病毒有更强的吸附能力,这能延长病毒存活期,增加病毒传染性^[114]。此外,M/NPs 能够在各种环境和生物之间传递抗生素抗性基因^[115],可能会增加有害微生物的抗生素耐药性。

3.5 心血管系统

有研究提示 M/NPs 可能会导致血液毒性和血管毒性,并受 M/NPs 自身的物理化学特性影响。其中,血液毒性包括 M/NPs 引发溶血、血栓和凝血。Barshtein 等^[116]研究表明,PS-NPs 引发溶血受微粒的尺寸和丰度影响,但人血白蛋白是最关键的影响因素,可以阻止溶血发生。Wu 等^[58]研究推断,环境微粒可能是血栓形成的核心,初始血栓会持续吸引血液中的微粒,以增大血栓的体积。Oslakovic 等^[117]研究发现,胺基改性 NPs 与凝血相关因子 VII 和 IX 与结合能够减少凝血酶的形成。此外,M/NPs 能够产生血管毒性。100 nm 的 NPs 能在人脐静脉内皮细胞的细胞质中积累,诱导自噬启动和自噬体形成,这可能会引发细胞自噬过度和细胞坏死,从而影响血管形成能力^[68,118]。此外,M/NPs 可能会导致心率异常和心脏功能受损。Chen 等^[119]研究发现,在水环境暴露 PS-M/

NPs 后,海洋小鳞胚胎的血红蛋白和心脏发育相关基因表达受到影响。Pitt 等^[67]研究发现,PS-NPs 在斑马鱼中出现代际传递现象,并在子代中观察到心率过慢。Roshanzadeh 等^[120]研究发现,胺化羧酸盐 PS-NPs 导致新生大鼠心肌细胞(NRVMs)收缩力降低,影响方式随时间而变化。前期,由细胞内 Ca^{2+} 水平和电生理活动的降低导致 NRVMs 收缩力降低;晚期则由于线粒体膜电位和细胞代谢的下降导致 NRVMs 收缩力进一步下降。

4 展望

研究重点逐渐从最初探究 M/NPs 的环境分布状况与生态环境影响,转移到评估 M/NPs 造成的人类健康的影响且研究成果颇多,但目前仍存在许多知识空白:

(1)关于 M/NPs 人体暴露状况的研究,大多针对环境介质进行检测分析,关于综合暴露源头导致的暴露量评估极其匮乏。应结合不同暴露途径与暴露源,以及地域、年龄、性别、职业和生活习惯等因素,建立相关模型,从而更为精确且全面地评估人体暴露量。

(2)以往研究的样本量较少,实验数据受个体差异与检测方法影响较大。需要更多资源的支持以开展大规模的 M/NPs 人体富集状况的检测。

(3)小粒径和高浓度下 M/NPs 的富集和毒性有所增加。但毒理实验多选用粒径统一的 PS 微球作为暴露试剂。要考虑 M/NPs 在实际环境中的复杂性(如:尺寸、形状、聚合物组成、表面形态和风化程度等)。特别是 M/NPs 作为载体,与其他环境污染物和有害微生物病原体之间存在相互作用及联合毒性需要更多地关注。

(4)毒理研究集中于 M/NPs 高浓度急性暴露对人体健康的负面影响,尚不清楚长期暴露的后果。然而实际环境状况中暴露浓度低且 M/NPs 的生物积累和降解程度会随着时间的推移而增加,影响着 M/NPs 的生物毒性。因此,基于低浓度和生命周期的 M/NPs 暴露对人体毒性的评估也是未来重要的研究方向。

5 结论

经口摄入是环境中的 M/NPs 最主要的暴露渠道,食物、水和空气是最主要的环境介质,应重视。M/NPs 在人体中的积累较为普遍,但丰度较低,除结肠腺癌肿瘤组织外,约 $(702.68 \pm 504.26) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ M/NPs 突破组织屏障后随着血液循环至全身各系统,粒径较大的 M/NPs 虽然无法进入细胞,但会损坏细胞膜,较小的 M/NPs 能够进入细胞内并在细胞质中积累。

M/NPs 毒性受到其尺寸、形状、表面形态、聚合物类型、暴露途径、暴露时间和暴露浓度的影响,此外 M/NPs 在体内降解中会释放有毒塑料添加剂,并且 M/NPs 能将环境中其他有害污染物、微生物和病原体带入体内,以上因素能够在细胞层面诱发氧化应激、细胞毒性、线粒体毒性和基因毒性等,进而导致各系统炎症反应、屏障受损、代谢紊乱、内分泌紊乱以及菌群失调,增加了各系统相关疾病的发病风险,甚至会引起肿瘤和癌症的发生。然而,M/NPs 对人体的毒害机制研究尚处于初步阶段,动物和人对污染物的毒性反应有所差异,细胞和器官模型不能模拟真实的人体内部状况,其实验结果用于评估 M/NPs 对人体健康风险存在不足之处。

参考文献:

- [1] 刘微,李宇欣,荣飒爽,等. 土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 6267-6278.
- Liu W, Li Y X, Rong S S, *et al.* Research progress on toxicity of microplastics in soil to terrestrial plants and their degradation mechanism[J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 6267-6278.
- [2] 张龙飞,刘玉环,阮榕生,等. 微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4728-4741.
- Zhang L F, Liu Y H, Ruan R S, *et al.* Research progress on distribution characteristics and formation mechanisms of microplastics in the environment[J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4728-4741.
- [3] Wang J, Liu X H, Li Y, *et al.* Microplastics as contaminants in the soil environment: a mini-review[J]. Science of the Total Environment, 2019, **691**: 848-857.
- [4] Cole M, Lindeque P, Halsband C, *et al.* Microplastics as contaminants in the marine environment: a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(12): 2588-2597.
- [5] Zhang K, Hamidian A H, Tubić A, *et al.* Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: a review[J]. Environmental Pollution, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
- [6] Caldwell J, Taladriz-Blanco P, Lehner R, *et al.* The micro-, submicron-, and nanoplastic hunt: a review of detection methods for plastic particles[J]. Chemosphere, 2022, **293**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133514.
- [7] 任欣伟,唐景春,于宸,等. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(6): 1045-1058.
- Ren X W, Tang J C, Yu C, *et al.* Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(6): 1045-1058.
- [8] Abbasi S, Alirezazadeh M, Razeghi N, *et al.* Microplastics captured by snowfall: a study in Northern Iran[J]. Science of the Total Environment, 2022, **822**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153451.
- [9] Jiang C B, Yin L S, Li Z W, *et al.* Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau[J]. Environmental Pollution, 2019, **249**: 91-98.
- [10] Crosta A, De Felice B, Antonioli D, *et al.* Microplastic contamination of supraglacial debris differs among glaciers with different anthropic pressures[J]. Science of the Total Environment, 2022, **851**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158301.
- [11] Kanhai L D K, Gårdfeldt K, Lyashevskaya O, *et al.* Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **130**: 8-18.
- [12] Zhao J M, Ran W, Teng J, *et al.* Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **640-641**: 637-645.
- [13] Beaumont N J, Aanesen M, Austen M C, *et al.* Global ecological, social and economic impacts of marine plastic[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **142**: 189-195.
- [14] Do A T N, Ha Y, Kwon J H. Leaching of microplastic-associated additives in aquatic environments: a critical review[J]. Environmental Pollution, 2022, **305**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119258.
- [15] Gulizia A M, Patel K, Philippa B, *et al.* Understanding plasticiser leaching from polystyrene microplastics[J]. Science of the Total Environment, 2023, **857**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159099.
- [16] Revel M, Châtel A, Mouneyrac C. Micro(nano)plastics: a threat to human health?[J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2018, **1**: 17-23.
- [17] Yu L Y, Li R L, Zhang Z, *et al.* Distribution, characteristics, and human exposure to microplastics in mangroves within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, **175**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113395.
- [18] Nor N H M, Kooi M, Diepens N J, *et al.* Lifetime accumulation of microplastic in children and adults[J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(8): 5084-5096.
- [19] Cox K D, Covernton G A, Davies H L, *et al.* Human consumption of microplastics[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(12): 7068-7074.
- [20] 张士春,庞美霞,赵洪雅,等. 海产食品微纳塑料污染现状与危害[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, **10**(9): 2689-2696.
- Zhang S C, Pang M X, Zhao H Y, *et al.* Situation and harm of micro-nano plastic pollution in seafood[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, **10**(9): 2689-2696.
- [21] Piyawardhana N, Weerathunga V, Chen H S, *et al.* Occurrence of microplastics in commercial marine dried fish in Asian countries[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127093.
- [22] Diaz-Basantes M F, Nacimba-Aguirre D, Conesa J A, *et al.* Presence of microplastics in commercial canned tuna[J]. Food Chemistry, 2022, **385**, doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132721.
- [23] Kılıç E, Yücel N. Microplastic occurrence in the gastrointestinal tract and gill of bioindicator fish species in the northeastern Mediterranean[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, **177**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113556.
- [24] Debbarma N, Gurjar U R, Ramteke K K, *et al.* Abundance and characteristics of microplastics in gastrointestinal tracts and gills of croaker fish (*Johnius dussumieri*) from off Mumbai coastal waters of India[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, **176**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113473.
- [25] Cho Y, Shim W J, Jang M, *et al.* Abundance and characteristics of microplastics in market bivalves from South Korea[J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 1107-1116.
- [26] Muhib M I, Uddin M K, Rahman M M, *et al.* Occurrence of microplastics in tap and bottled water, and food packaging: a narrative review on current knowledge[J]. Science of the Total Environment, 2023, **865**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.

- 161274.
- [27] Kosuth M, Mason S A, Wattenberg E V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt [J]. *PLoS One*, 2018, **13**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0194970.
- [28] Brei V A. How is a bottled water market created? [J]. *WIREs Water*, 2018, **5**(1), doi: 10.1002/wat2.1220.
- [29] Kankanige D, Babel S. Smaller-sized micro-plastics (MPs) contamination in single-use PET-bottled water in Thailand [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137232.
- [30] Yang D Q, Shi H H, Li L, *et al.* Microplastic pollution in table salts from China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(22): 13622-13627.
- [31] Kuttykatil A, Raju S, Vanka K S, *et al.* Consuming microplastics? Investigation of commercial salts as a source of microplastics (MPs) in diet [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(1): 930-942.
- [32] Iñiguez M E, Conesa J A, Fullana A. Microplastics in Spanish table salt [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-09128-x.
- [33] Lee H, Kunz A, Shim W J, *et al.* Microplastic contamination of table salts from Taiwan, including a global review [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-46417-z.
- [34] Conti G O, Ferrante M, Banni M, *et al.* Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population [J]. *Environmental Research*, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109677.
- [35] Dong Y M, Gao M-L, Qiu W W, *et al.* Uptake of microplastics by carrots in presence of As (III): combined toxic effects [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **411**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125055.
- [36] Liu Q R, Chen Z, Chen Y L, *et al.* Microplastics contamination in eggs: detection, occurrence and status [J]. *Food Chemistry*, 2022, **397**, doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133771.
- [37] Chen J H, Chen G H, Peng H Q, *et al.* Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **882**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163305.
- [38] Du F N, Cai H W, Zhang Q, *et al.* Microplastics in take-out food containers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **399**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122969.
- [39] Zhou G Y, Wu Q D, Tang P, *et al.* How many microplastics do we ingest when using disposable drink cups? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **441**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129982.
- [40] Li D Z, Shi Y H, Yang L M, *et al.* Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation [J]. *Nature Food*, 2020, **1**(11): 746-754.
- [41] Luo Y L, Gibson C T, Chuah C, *et al.* Raman imaging for the identification of Teflon microplastics and nanoplastics released from non-stick cookware [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **851**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158293.
- [42] Yang X, Man Y B, Wong M H, *et al.* Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **825**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154025.
- [43] Sridharan S, Kumar M, Singh L, *et al.* Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: a critical review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126245.
- [44] Vianello A, Jensen R L, Liu L, *et al.* Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-45054-w.
- [45] Yurtsever M. Tiny, shiny, and colorful microplastics: are regular glitters a significant source of microplastics? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **146**: 678-682.
- [46] Saweres-Argüelles C, Ramírez-Novillo I, Vergara-Barberán M, *et al.* Skin absorption of inorganic nanoparticles and their toxicity: a review [J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2023, **182**: 128-140.
- [47] Vogt A, Combadiere B, Hadam S, *et al.* 40nm, but not 750 or 1, 500nm, nanoparticles enter epidermal CD1a+ cells after transcutaneous application on human skin [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 2006, **126**(6): 1316-1322.
- [48] Prow T W, Grice J E, Lin L L, *et al.* Nanoparticles and microparticles for skin drug delivery [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2011, **63**(6): 470-491.
- [49] Ibrahim Y S, Anuar S T, Azmi A A, *et al.* Detection of microplastics in human colectomy specimens [J]. *JGH Open*, 2021, **5**(1): 116-121.
- [50] Cetin M, Miloglu F D, Baygatalp N K, *et al.* Higher number of microplastics in tumoral colon tissues from patients with colorectal adenocarcinoma [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, **21**(2): 639-646.
- [51] Horvatis T, Tamminga M, Liu B B, *et al.* Microplastics detected in cirrhotic liver tissue [J]. *eBioMedicine*, 2022, **82**, doi: 10.1016/j.ebiom.2022.104147.
- [52] Schwabl P, Köppel S, Königshofer P, *et al.* Detection of various microplastics in human stool [J]. *Annals of Internal Medicine*, 2019, **171**(7): 453-457.
- [53] Amato-Lourenço L F, Carvalho-Oliveira R, Júnior G R, *et al.* Presence of airborne microplastics in human lung tissue [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126124.
- [54] Jenner L C, Rotchell J M, Bennett R T, *et al.* Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **831**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154907.
- [55] Huang S M, Huang X X, Bi R, *et al.* Detection and analysis of microplastics in human sputum [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(4): 2476-2486.
- [56] Jiang Y, Han J C, Na J, *et al.* Exposure to microplastics in the upper respiratory tract of indoor and outdoor workers [J]. *Chemosphere*, 2022, **307**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136067.
- [57] Leslie H A, Van Velzen M J M, Brandsma S H, *et al.* Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood [J]. *Environment International*, 2022, **163**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107199.
- [58] Wu D, Feng Y D, Wang R, *et al.* Pigment microparticles and microplastics found in human thrombi based on Raman spectral evidence [J]. *Journal of Advanced Research*, 2022, doi: 10.1016/j.jare.2022.09.004.
- [59] Rotchell J M, Jenner L C, Chapman E, *et al.* Detection of microplastics in human saphenous vein tissue using μ FTIR: a pilot study [J]. *PLoS One*, 2023, **18**(2), doi: 10.1371/journal.pone.0280594.
- [60] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, *et al.* Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta [J]. *Environment International*, 2021, **146**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.
- [61] Zhu L, Zhu J Y, Zuo R, *et al.* Identification of microplastics in

- human placenta using laser direct infrared spectroscopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **856**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159060.
- [62] Liu S J, Guo J L, Liu X Y, *et al.* Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: a pilot prospective study [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **854**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158699.
- [63] Ragusa A, Notarstefano V, Svelato A, *et al.* Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk [J]. *Polymers*, 2022, **14**(13), doi: 10.3390/polym14132700.
- [64] Fournier S B, D'Errico J N, Adler D S, *et al.* Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy [J]. *Particle and Fibre Toxicology*, 2020, **17**(1), doi: 10.1186/s12989-020-00385-9.
- [65] Medley E A, Spratlen M J, Yan B Z, *et al.* A systematic review of the placental translocation of micro- and nanoplastics [J]. *Current Environmental Health Reports*, 2023, doi: 10.1007/s40572-023-00391-x.
- [66] Duszka H M, van Boxel J, van Duursen M B M, *et al.* Experimental human placental models for studying uptake, transport and toxicity of micro- and nanoplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **860**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160403.
- [67] Pitt J A, Trevisan R, Massarsky A, *et al.* Maternal transfer of nanoplastics to offspring in zebrafish (*Danio rerio*): a case study with nanopolystyrene [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 324-334, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.186.
- [68] Lu Y Y, Li H Y, Ren H Y, *et al.* Size-dependent effects of polystyrene nanoplastics on autophagy response in human umbilical vein endothelial cells [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **421**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126770.
- [69] Ramsperger A F R M, Narayana V K B, Gross W, *et al.* Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells [J]. *Science Advances*, 2020, **6**(50), doi: 10.1126/sciadv.abd1211.
- [70] Lu Y Y, Cao M Y, Tian M P, *et al.* Internalization and cytotoxicity of polystyrene microplastics in human umbilical vein endothelial cells [J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2023, **43**(2): 262-271.
- [71] Varela J A, Bexiga M G, Åberg C, *et al.* Quantifying size-dependent interactions between fluorescently labeled polystyrene nanoparticles and mammalian cells [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2012, **10**, doi: 10.1186/1477-3155-10-39.
- [72] Zhang Y T, Wang S L, Olga V, *et al.* The potential effects of microplastic pollution on human digestive tract cells [J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132714.
- [73] Chen Q Q, Gao J N, Yu H R, *et al.* An emerging role of microplastics in the etiology of lung ground glass nodules [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2022, **34**(1), doi: 10.1186/s12302-022-00605-3.
- [74] Ouyang Z Z, Mao R F, Hu E D, *et al.* The indoor exposure of microplastics in different environments [J]. *Gondwana Research*, 2022, **108**: 193-199, doi: 10.1016/j.gr.2021.10.023.
- [75] 艾鑫宇, 田洪钰, 岳鹏, 等. 大气环境中微塑料的检测技术研究进展 [J]. *应用化工*, 2023, **52**(4): 1276-1282.
- Ai X Y, Tian H Y, Yue P, *et al.* Research progress on detection technology of microplastics in the atmospheric environment [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, **52**(4): 1276-1282.
- [76] 李臻阳, 杨书申, 徐亮, 等. 大气环境中微塑料污染及其分析技术的研究进展 [J]. *环境化学*, 2022, **41**(4): 1114-1123.
- Li Z Y, Yang S S, Xu L, *et al.* Progress on microplastics pollution and its analysis methods in the atmosphere [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(4): 1114-1123.
- [77] Tsou T Y, Lee S H, Kuo T H, *et al.* Distribution and toxicity of submicron plastic particles in mice [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2023, **97**, doi: 10.1016/j.etap.2022.104038.
- [78] Luo T, Wang D, Zhao Y, *et al.* Polystyrene microplastics exacerbate experimental colitis in mice tightly associated with the occurrence of hepatic inflammation [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **844**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156884.
- [79] Fournier E, Ratel J, Denis S, *et al.* Exposure to polyethylene microplastics alters immature gut microbiome in an infant *in vitro* gut model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **443**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130383.
- [80] Tong X H, Li B Q, Li J, *et al.* Polyethylene microplastics cooperate with *Helicobacter pylori* to promote gastric injury and inflammation in mice [J]. *Chemosphere*, 2022, **288**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132579.
- [81] Yu X Q, Lang M F, Huang D F, *et al.* Photo-transformation of microplastics and its toxicity to Caco-2 cells [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150954.
- [82] Li B Q, Ding Y F, Cheng X, *et al.* Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice [J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125492.
- [83] Shen R, Yang K R, Cheng X, *et al.* Accumulation of polystyrene microplastics induces liver fibrosis by activating cGAS/STING pathway [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **300**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118986.
- [84] Goodman K E, Hua T, Sang Q X A. Effects of polystyrene microplastics on human kidney and liver cell morphology, cellular proliferation, and metabolism [J]. *ACS Omega*, 2022, **7**(38): 34136-34153.
- [85] Cheng W, Li X L, Zhou Y, *et al.* Polystyrene microplastics induce hepatotoxicity and disrupt lipid metabolism in the liver organoids [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150328.
- [86] Zhao Y, Bao Z W, Wan Z Q, *et al.* Polystyrene microplastic exposure disturbs hepatic glycolipid metabolism at the physiological, biochemical, and transcriptomic levels in adult zebrafish [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136279.
- [87] Wang L X, Wang Y X, Xu M, *et al.* Enhanced hepatic cytotoxicity of chemically transformed polystyrene microplastics by simulated gastric fluid [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **410**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124536.
- [88] Banerjee A, Billel L O, McGarvey A M, *et al.* Effects of polystyrene micro/nanoplastics on liver cells based on particle size, surface functionalization, concentration and exposure period [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **836**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155621.
- [89] Cheng W, Zhou Y, Xie Y C, *et al.* Combined effect of polystyrene microplastics and bisphenol A on the human embryonic stem cells-derived liver organoids: the hepatotoxicity and lipid accumulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **854**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158585.
- [90] Zhang H J, Zhang S Y, Duan Z H, *et al.* Pulmonary toxicology assessment of polyethylene terephthalate nanoplastic particles *in*

- vitro* [J]. *Environment International*, 2022, **162**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107177.
- [91] Goodman K E, Hare J T, Khamis Z I, *et al.* Exposure of human lung cells to polystyrene microplastics significantly retards cell proliferation and triggers morphological changes [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2021, **34**(4): 1069-1081.
- [92] Dong C D, Chen C W, Chen Y C, *et al.* Polystyrene microplastic particles: in vitro pulmonary toxicity assessment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **385**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121575.
- [93] Zha H, Xia J F, Li S J, *et al.* Airborne polystyrene microplastics and nanoplastics induce nasal and lung microbial dysbiosis in mice [J]. *Chemosphere*, 2023, **310**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136764.
- [94] Prata J C. Airborne microplastics: consequences to human health? [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 115-126.
- [95] D' Angelo S, Meccariello R. Microplastics: a threat for male fertility [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(5), doi: 10.3390/ijerph18052392.
- [96] Deng Y F, Chen H X, Huang Y C, *et al.* Polystyrene microplastics affect the reproductive performance of male mice and lipid homeostasis in their offspring [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2022, **9**(9): 752-757.
- [97] Li S D, Wang Q M, Yu H, *et al.* Polystyrene microplastics induce blood - testis barrier disruption regulated by the MAPK-Nrf2 signaling pathway in rats [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(35): 47921-47931.
- [98] Jin H B, Ma T, Sha X X, *et al.* Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity in mice [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123430.
- [99] Zhao T X, Shen L J, Ye X, *et al.* Prenatal and postnatal exposure to polystyrene microplastics induces testis developmental disorder and affects male fertility in mice [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **445**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130544.
- [100] Deng Y F, Yan Z H, Shen R Q, *et al.* Enhanced reproductive toxicities induced by phthalates contaminated microplastics in male mice (*Mus musculus*) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **406**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124644.
- [101] Liu Z Q, Zhuan Q, Zhang L Y, *et al.* Polystyrene microplastics induced female reproductive toxicity in mice [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **42**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127629.
- [102] Huang J, Zou L P, Bao M, *et al.* Toxicity of polystyrene nanoparticles for mouse ovary and cultured human granulosa cells [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, **249**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114371.
- [103] Hou J Y, Lei Z M, Cui L L, *et al.* Polystyrene microplastics lead to pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells via NLRP3/Caspase-1 signaling pathway in rats [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **212**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112012.
- [104] Chen G Q, Xiong S Y, Jing Q, *et al.* Maternal exposure to polystyrene nanoparticles retarded fetal growth and triggered metabolic disorders of placenta and fetus in mice [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **854**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158666.
- [105] Jeong B, Baek J Y, Koo J, *et al.* Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **426**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127815.
- [106] Gruber M M, Hirschmugl B, Berger N, *et al.* Plasma proteins facilitates placental transfer of polystyrene particles [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2020, **18**(1), doi: 10.1186/s12951-020-00676-5.
- [107] Li J, Zeng X W, Liang X L, *et al.* Gestational exposure to plastic additives and associations with placental function-related genes [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, **10**(1): 86-92.
- [108] Deng J Y, Ibrahim M S, Tan L Y, *et al.* Microplastics released from food containers can suppress lysosomal activity in mouse macrophages [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **435**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128980.
- [109] Koner S, Florance I, Mukherjee A, *et al.* Cellular response of THP-1 macrophages to polystyrene microplastics exposure [J]. *Toxicology*, 2023, **483**, doi: 10.1016/j.tox.2022.153385.
- [110] Çobanoğlu H, Belivermiş M, Sıkdokur E, *et al.* Genotoxic and cytotoxic effects of polyethylene microplastics on human peripheral blood lymphocytes [J]. *Chemosphere*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129805.
- [111] Park E J, Han J S, Park E J, *et al.* Repeated-oral dose toxicity of polyethylene microplastics and the possible implications on reproduction and development of the next generation [J]. *Toxicology Letters*, 2020, **324**: 75-85.
- [112] Wang C, Wu W J, Pang Z F, *et al.* Polystyrene microplastics significantly facilitate influenza A virus infection of host cells [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **446**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130617.
- [113] Kampf G, Todt D, Pfaender S, *et al.* Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2020, **104**(3): 246-251.
- [114] Lu J, Yu Z G, Ngiam L, *et al.* Microplastics as potential carriers of viruses could prolong virus survival and infectivity [J]. *Water Research*, 2022, **225**, doi: 10.1016/j.watres.2022.119115.
- [115] Liu Y, Liu W Z, Yang X M, *et al.* Microplastics are a hotspot for antibiotic resistance genes: progress and perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145643.
- [116] Barshtein G, Arbell D, Yedgar S. Hemolytic effect of polymeric nanoparticles: role of albumin [J]. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2011, **10**(4): 259-261.
- [117] Oslakovic C, Cedervall T, Linse S, *et al.* Polystyrene nanoparticles affecting blood coagulation [J]. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 2012, **8**(6): 981-986.
- [118] Lee H S, Amarakoon D, Wei C i, *et al.* Adverse effect of polystyrene microplastics (PS-MPs) on tube formation and viability of human umbilical vein endothelial cells [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, **154**, doi: 10.1016/j.fct.2021.112356.
- [119] Chen J C, Chen M Y, Fang C, *et al.* Microplastics negatively impact embryogenesis and modulate the immune response of the marine medaka *Oryzias melastigma* [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111349.
- [120] Roshanzadeh A, Oyunbaatar N E, Ganjbakhsh S E, *et al.* Exposure to nanoplastics impairs collective contractility of neonatal cardiomyocytes under electrical synchronization [J]. *Biomaterials*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.121175.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)