



国家自然科学基金环境化学发展规划概况

庄乾坤^{1*}, 史建波², 汪美贞^{1,3}, 云洋^{1,4}

1. 国家自然科学基金委员会化学科学部, 北京 100085

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310018

4. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006

*通讯作者, E-mail: zhuangqk@nsfc.gov.cn

收稿日期: 2021-03-19; 接受日期: 2021-03-24; 网络版发表日期: 2021-04-06

摘要 环境化学是研究化学物质在环境介质中存在、特性、行为、效应及其污染控制原理和方法的科学, 是化学科学的重要分支和环境科学的核心学科. 近年来, 国内环境化学面向学科前沿和国家重大需求, 坚持问题导向, 突出前瞻、创新、交叉、应用, 在污染防治、生态建设和人民健康等方面均取得了长足进步. 为了顺应我国生态文明建设对环境化学提出的新需求, 使环境化学科学研究更加对接“四个面向”, 切实解决我国目前所面临的环境污染问题, 本文简要介绍了国家自然科学基金委员会化学科学部环境化学学科发展规划与学科布局, 供相关人员参考.

关键词 国家自然科学基金, 环境化学, 发展规划, 学科布局

1 引言

环境污染已成为各国政府、学术界、工业界以及普通大众非常关注的热点问题. 为了有效地控制和削减环境污染物, 首先必须了解污染物的产生源头、分布特征、迁移转化规律以及毒性效应, 进而对污染进行治理或修复. 环境化学不仅可以帮助识别污染物的来源、种类、数量和赋存形态, 还可以描述和预测污染物的环境过程及演变趋势, 并为环境污染的预防、控制、治理和修复提供原理、方法与技术.

化学品污染、气候变化、海洋酸化、臭氧层空洞、生物多样性丧失等决定人类能否在地球上生存的

系列生态环境问题^[1], 均与环境化学密切相关. 在导致环境污染和生态破坏的诸多因素中, 化学污染物因素约占85%. 环境化学通过大气、水、土壤以及生物各圈层环境问题的认知、剖析, 进行环境污染的预防、控制、治理和修复, 从而支撑人类社会可持续发展和人类命运共同体建设.

研究表明, 人类70%~90%的疾病风险与环境有关^[2]. 在我国, 与环境污染相关的疾病呈上升趋势, 恶性肿瘤等重大疾病发病率和死亡率逐年增加^[3-6]. 外在环境因素, 包括化学致癌物、紫外辐射、电离辐射和放射辐射等是导致癌症发生的重要原因, 对各种化学污染物环境暴露、生态毒理及健康效应研究, 也是环境化学的核心内容, 可见环境化学对于保护生态安全

引用格式: Zhuang Q, Shi J, Wang M, Yun Y. Overview of development program of environmental chemistry of National Natural Science Foundation of China. *Sci Sin Chim*, 2021, 51: 958–966, doi: 10.1360/SSC-2021-0064

和人体健康的重要性。

当前,我国环境保护与健康研究面临着严峻和复杂的形势。党的十八大将“生态文明建设”提到前所未有的战略高度,将其与经济建设、政治建设、文化建设、社会建设一道,纳入社会主义现代化建设“五位一体”的总体布局。党的十九大报告中更是明确提出建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计,将“实施健康中国战略”作为国家发展基本方略中的重要内容。这些战略目标的实现,都离不开环境化学学科的发展和支撑。经过40多年的快速发展,我国环境化学在学科建设、人才培养、队伍规模、国际影响、服务国家目标等方面均取得了长足进步^[7-10],在解决重大环境问题(如松花江污染事件、大气雾霾成因、环境污染与健康)和实施“水十条”、“气十条”、“土十条”及履行国际环境公约(如斯德哥尔摩公约和水俣公约等)等方面都发挥了不可替代的作用。

国家在“十四五规划”中将基础研究和原始创新放在非常重要的位置,党中央对基础研究提出了更高的要求,要面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康。环境化学的研究工作既具有世界科技前沿和国家需求属性,又有经济建设和人民生命健康特征,是典型的同时满足“四个面向”的学科。“十四五”期间,环境化学应紧密结合建设科技创新强国“三步走”目标,遵循学科发展趋势、合理学科布局、防止盲追热点。在“持久性有机污染物环境化学行为”、“大气雾霾形成机制”、“水体污染深度处理”、“纳米材料环境行为及效应”、“光催化技术及应用”等领域继续强化国际影响力,在“复杂环境原位表征技术”、“高通量污染物鉴定方法”、“环境催化行为与机制”、“多介质污染物界面行为”、“乏燃料后处理新技术与新方法”等方面进一步夯实研究基础,在“霾化学”、“抗生素抗性基因”、“污染物溯源与归趋”、“化学品高通量毒性筛查”、“以精准医学为导向的药物放射化学”等方面培育学科未来生长点。同时,环境化学科学研究要更加注重以“真实环境”为研究对象,关注“介质协同”问题,强化与化学化工的交叉融合,凭此才能更加有利于当前我国环境问题的解决^[11]。基于以上背景,本文简要介绍国家自然科学基金委员会化学科学部环境化学学科发展规划与学科布局,供相关人员参考。

2 环境化学发展规划概况

2.1 环境分析化学

环境分析化学是进行环境科学与技术研究和环境保护必备的耳目和重要手段。环境分析化学的核心任务是针对污染物及其转化、降解产物发展高效、高灵敏、高选择性的定性定量检测方法,揭示环境中污染物的种类、含量、形态和迁移规律,为环境科学与技术其他分支研究提供必要的技术支撑。

我国在环境分析化学领域的研究十分活跃,近年来在采样/样品前处理及分离技术、新污染物分析鉴定、污染物迁移转化规律、大气细颗粒物组成与成因以及微区原位环境分析方法等方面都取得了突出的成绩,在国际上占有举足轻重的地位。未来需要通过鼓励学科交叉,结合粤港澳大湾区、海洋强国建设等国家发展战略需求和国际前沿开展前瞻性、创新性研究工作。一方面,进一步解决目前实际需求中存在的瓶颈问题,包括开发实际环境中污染物的快速、原位、实时在线监测与活体检测技术,高通量、非靶向、多尺度环境分析技术,以及生物标志物与活性中间体检测分析技术等;另一方面,要提前布局,为未来发展寻找新的增长点,如开发基于国家科学平台和大科学装置的分析技术,基于互联网和人工智能的环境分析技术,以及基于新原理、新技术的环境分析装备与器件研制等。

重要研究方向包括:

- (1) 高效、快速分离与定性识别技术;
- (2) 原位、在线、活体及中间体检测分析新技术;
- (3) 复杂基体中超痕量污染物分析方法;
- (4) 非靶向环境分析方法;
- (5) 基于新原理、新技术的环境分析仪器、装置与器件研制;
- (6) 基于互联网、移动平台的环境大数据分析方法和技术。

2.2 污染物界面行为与环境过程

环境是由多个介质组成的复杂体系,污染物进入环境后与各环境介质相互作用,发生多种界面行为,不仅影响污染物在各介质的分布、迁移、转化和累积,还会改变污染物的赋存形态、生物有效性及环境健康风险。在分子水平理解界面过程的化学本质是正

确认识、合理预测以及有效治理环境污染的重要基础和关键。

国内学者对污染物的多介质界面行为研究已取得不少成果, 逐渐由单个环境介质体系中污染物行为研究发展到多介质多界面环境体系的行为研究, 由单个污染物的环境行为研究发展为复合污染物环境行为机制的探讨。然而, 目前对许多复合污染物的多介质多界面行为以及区域环境过程仍不清楚, 导致在实际环境污染防治中往往仅针对单一介质, 难以达到理想的效果。未来环境化学研究仍需继续围绕污染物的多介质界面行为与环境过程, 深入开展环境污染物界面反应化学本质、污染物多介质-多界面-多过程行为机制以及污染物跨介质和跨区域迁移转化过程等方面研究, 为多介质环境污染协同防治提供科学依据。

重要研究方向如下:

- (1) 污染物多介质界面行为表征方法;
- (2) 新污染物界面行为与环境过程;
- (3) 复合污染物环境界面反应及机制;
- (4) 污染物生物有效性及调控原理;
- (5) 污染物在区域多介质的迁移转化和归趋;
- (6) 污染物跨介质、跨区域迁移转化及机制。

2.3 大气污染与控制化学

大气污染与控制化学主要研究大气环境中各种污染物的物理化学特性、化学变化规律和环境化学行为, 从而阐明污染特征、形成过程、发展趋势, 判明污染物的源与汇及其环境影响和生态效应。大气污染与控制化学一方面与大气物理学、环境生物学、环境毒理学相结合, 为制定环境质量标准、进行大气质量综合评价提供数据支撑; 另一方面与工业生产工艺研究、治理技术研究相结合, 为控制大气污染物排放、寻找科学防治方法提供科学依据。

大气环境污染与社会发展阶段和工业水平密切相关, 是一个长期存在的问题。“十三五”期间, 我国科学家在大气雾霾形成的化学机制、关键污染物和污染来源等方面开展了深入研究, 并针对性地开展了超低排放大气污染治理技术研发和控制政策制定, 有效降低了大气雾霾的污染。但是, 当前我国大气污染呈现复合型和压缩性的特征, 秋冬季节灰霾频发, 夏季 O_3 超标, 高 $PM_{2.5}$ 与高 O_3 共存, 这是发达国家未曾经历的新问题, 也是大气环境化学的新挑战。党的十九大报告提

出“持续实施大气污染防治行动, 打赢蓝天保卫战”, 对新时代的大气污染防治工作提出了更高的目标和要求。因此, 迫切需要更加精准地揭示我国大气复合污染成因, 研发先进的污染物控制技术, 实现 $PM_{2.5}/O_3$ 高效、协同、精准控制。同时, 促进大气环境化学学科发展, 引领大气化学研究国际前沿, 并为“一带一路”发展中国家解决大气环境污染问题提供借鉴和参考。

重要研究方向包括:

- (1) 雾霾成因、 O_3 和二次污染形成机制;
- (2) 复合污染的表/界面过程及其对环境空气质量的影响机制;
- (3) 大气中持久性有机污染物迁移、转化机制;
- (4) $PM_{2.5}$ 生物毒性组分形成机理及其健康效应;
- (5) $PM_{2.5}/O_3$ 高效协同控制技术;
- (6) 机动车尾气近零排放、 CO_2 捕集利用及封存技术;
- (7) 氮氧化物、可挥发性有机物(VOCs)、温室气体控制技术。

2.4 水污染与控制化学

水污染与控制化学主要应用化学基本原理和方法研究水体中化学污染物的形态、反应及其归趋。水环境中污染物可通过沉淀溶解、氧化还原、配位络合、胶体形成、吸附解析等作用, 参与和干扰各种环境化学过程及物质循环。推动水污染化学研究可为国家全面控制污染物排放、保护水资源、保障水生态安全提供科学依据, 也为应对全球变化对水环境的影响提供决策支持。

近30年来, 我国水污染控制技术领域研究取得了显著的成绩, 传统水污染指标控制技术水平有较大提高, 已形成系统化、多样化的污水处理技术体系。但在我国生态文明建设快速推进与水污染控制要求显著提高的背景下, 由于相关基础理论探索与应用基础研究明显不足, 导致我国在污废水深度处理与资源化、难降解有毒有机废水处理、新污染物控制、污染水体修复等方面的核心技术创新能力较为薄弱, 缺乏经济实用的水污染控制与治理技术, 亟需开展相关基础研究, 以支撑水污染控制领域技术创新发展的需求。因此, 应根据水中特征污染物的性质、组成、形态及对水质安全的要求, 研究其在现有常规水处理工艺中的转化规律, 研发经济高效的水处理新方法和新技术,

并建立水中特征污染物控制与转化过程安全性评价新方法. 这些研究对解决我国新时期的水环境保护问题具有非常重要的意义.

重点研究方向包括:

- (1) 污水中特征污染物的识别及处理过程中的转化规律;
- (2) 污水中常规污染物强化削减新技术及其原理;
- (3) 工业废水深度处理新技术新方法;
- (4) 新型环境功能材料用于污染物高效去除及资源化的技术原理;
- (5) 多维组学技术和合成生物学在废水生物处理中的应用;
- (6) 污染物降解过程的原位分析技术和方法.

2.5 土壤污染与修复化学

土壤污染与修复化学是指应用化学基本原理和相关方法, 研究污染物在土壤环境介质中的产生、迁移、转化、累积、降解、归宿等化学行为及其生态环境效应. 土壤污染具有滞后性、隐蔽性和长期性等特点. 甄别土壤中污染物来源、研究污染物对土壤环境和生物危害机理, 不仅可从微观水平更深层次上认识土壤环境污染问题, 更可为土壤污染有效预警、防控及修复提供科学依据.

2016年国务院公布《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”), 2019年全国人大制定《中华人民共和国土壤污染防治法》, 土壤污染防治已成为我国污染防治攻坚战的重要组成部分. “十三五”期间, 我国已在土壤污染源-汇机制、土壤环境容量、土壤污染异位表征技术、整体异位物化修复等方面取得显著进展. 然而, 作为复杂系统, 土壤环境具有大环境、微环境、微纳界面、分子反应等多层次结构, 有植物、动物、微生物、矿物等多介质组成, 存在传统污染物、新污染物等多污染共存的现象. 因此, 亟需通过原位表征新技术开发, 掌握土壤环境多介质界面过程及污染物生物地球化学过程, 分析土壤-植物系统协同转化与健康效应, 制定科学合理的土壤环境质量标准, 发展土壤污染控制与修复的新技术原理, 为改善土壤环境质量、保障农产品质量和人居环境安全提供重要支撑.

重点研究方向包括:

- (1) 土壤中污染物的原位表征技术及新污染物分

析检测方法;

- (2) 污染物土壤界面化学行为及其环境效应;
- (3) 污染物土壤-植物系统转化与健康效应;
- (4) 土壤复合污染过程及其调控原理;
- (5) 农用地土壤污染阻控与修复新技术原理;
- (6) 污染场地土壤安全修复新材料及新技术原理.

2.6 固废污染与处置化学

固废污染与处置化学是指以化学原理为重点, 主要围绕固体废弃物在环境中的污染化学行为和效应, 开展固体废弃物减量化、无害化、资源化和高值化研究. 消除或阻断固体废物中有毒有害物质的释放及迁移转化, 分离提取固体废物中重金属和贵金属, 使其脱毒并进行高值化利用, 是解决我国当下环境污染、资源短缺和能源问题的重要手段之一.

我国固体废物产量多年居世界第一, 其引发的污染问题尤为突出和复杂. 固体废物成分复杂且有害物质多, 长期粗放堆存、低值利用或无序处置引发的重大环境污染事故和社会群体性事件频发, 造成严重的“水-气-土”复合污染, 已成为引起全社会高度关注并亟需解决的重大环境问题. “十三五”期间, 我国在生活垃圾填埋、焚烧、堆肥处理处置, 电子垃圾、废旧电器电池拆解, 生物质废物高值化转化等方面取得了一定进展. 然而, 固体废物兼具污染和资源属性, 其处置过程中的污染成因不清、环境行为不明、新技术缺乏等问题凸显. 因此, 需对固体废物减量化、无害化、资源化处置过程中的污染物转化过程及机理、高值化新技术及原理等进行深入研究, 从而为打好污染防治攻坚战、推动绿色循环产业发展和建设美丽中国做好重要保障.

重要研究方向包括:

- (1) 固体废物处理过程二次污染物成因研究;
- (2) 固废源头减量、无害化及资源化利用原理与技术;
- (3) 固废中新污染物控制技术及其机理;
- (4) 典型固废中微生物与污染物的界面交互作用及转化基础科学问题;
- (5) 水/固/土多介质体系的重金属污染高效治理及资源化原理与技术;
- (6) 固体废物热化学处理过程中持久性有机污染物的削减原理.

2.7 纳米环境化学

纳米科技的快速发展,给环境污染治理带来了新的技术发展方向,与此同时纳米材料的毒理与健康效应也受到了广泛的关注。作为新兴的交叉学科,纳米环境化学主要研究纳米尺度材料在污染物吸附、絮凝、过滤、消毒、降解、修复及多种技术复合中的作用机理以及潜在工程应用;微纳米尺度物质的环境转化及过程;微纳尺度物质与生物体的相互作用机理及规律。

纳米技术和纳米材料的生物安全性既是本领域重要的基础研究内容,也是各国前沿科技发展战略与健康安全的重大需求。目前,美国、欧盟、联合国、经济合作与发展组织(OECD)和国际标准化组织(ISO)相继要求科学界及政府部门开展环境纳米毒理与健康系统研究。我国是较早开展在纳米毒理领域开展研究的国家之一,具有一定优势特色。我国正在成为纳米材料研究和生产的大国,应继续加强纳米技术的应用基础研究与技术创新,以及环境纳米行为与毒理研究,保障纳米科技在我国健康发展,提高我国高科技纳米产品的国际竞争力。

重要研究方向包括:

- (1) 不同环境介质中纳米颗粒的存在形态、源汇机制和迁移转化;
- (2) 天然纳米颗粒和人工纳米材料的环境界面化学机制;
- (3) 纳米颗粒在生物体内的药代动力学(ADME)及原位表征方法体系;
- (4) 纳米颗粒的生物学效应、作用机制及影响因素;
- (5) 纳米毒理大数据库及模拟预测研究。

2.8 理论环境化学

理论环境化学属于环境化学与化学信息学(化学计量学)、计算化学(量子力学、分子力学)的交叉学科,主要研究化学污染物的形成机制、源解析、多介质迁移转化归趋、毒性机制及毒性效应预测等。通过污染物环境过程机制的理论模拟和多介质环境模型构建,不仅可以为污染物的环境与健康风险评价奠定基础,更有望成为环境化学攻坚克难的利器。

理论环境化学早期研究主要集中在有机污染物二

维构-效关系和稳态系统多介质模型方面。近年来,随着高性能计算、信息科学、材料物理、生物信息学乃至非线性系统数值模拟等发展,使得从分子水平上揭示污染物环境过程的化学机制日趋成熟。随着大数据及人工智能发展,从区域尺度进行污染物非稳态体系时空分布宏观预测以及环境污染的预警也逐步可行。理论环境化学通过理论模拟预测,有望为环境化学的快速发展、为环境保护实践提供方法与技术支持。

重要研究方向如下:

- (1) 化学物质多介质环境过程及相关行为参数的分子模拟预测方法;
- (2) 外源化学物质毒性通路及网络的模拟、效应参数值的预测方法;
- (3) 有害化学品的高通量计算毒理学筛查与预测方法;
- (4) 多元混合物联合毒性的预测方法学;
- (5) 基于大数据的环境污染预测预警。

2.9 环境毒理与健康

环境毒理与健康主要研究化学污染物及其转化产物在分子、细胞、组织到个体层面的毒理学效应及其可能产生的生态与健康影响,重点聚焦在化学污染物对生态系统和人类健康作用机制、发展基于毒性机理的毒性新方法和新模式以及发现新的生物标志物。

我国环境毒理与健康研究面临诸多挑战,如污染物暴露成分复杂且暴露浓度较低,缺乏准确的分析、筛查与评估体系;在污染物的全生命周期中,由于其复杂性、暴露途径的多样性以及疾病发生机制的复杂性等原因,难以建立污染物与疾病之间的联系;暴露进入人体后的毒性分子机制,必须利用不同水平上的各种相互作用、各种代谢途径、各种调控通路的整合才能全面、系统地阐明复杂的毒性效应。因此,通过环境化学、分子生物学、公共卫生等多学科交叉合作,将环境-健康-分子紧密联系起来,建立污染物高通量精准检测和原位表征平台,寻找并利用代谢组、遗传组和表观遗传生物标志物来解析污染物对机体健康的关键信号路径的扰动作用,将污染物的生物效应与健康建立直接关联,已经成为环境毒理与健康当前迫切需要解决的重大问题。

重要发展方向包括:

(1) 化学物质的高通量毒性测试和环境中毒性因子的高通量甄别;

(2) 低剂量全生命周期暴露的毒性效应方法学;

(3) 复合暴露的健康效应与生物标志物;

(4) 污染物致毒机制研究;

(5) 基于毒性数据库和机器学习的健康风险评价与预测;

(6) 基于污染物效应探针与网络耦合的原位实时监测系统方法.

2.10 环境污染与微生物调控

微生物与污染环境相克相生, 作为生物污染的主体或载体, 微生物的快速繁殖和代谢导致病原微生物、各类毒素物质及抗生素抗性基因等迅速扩散, 污染生态环境、影响食品安全甚至危及人类健康; 而作为污染物累积、降解、转化的主力军, 微生物则发挥着环境净化、物质合成、能量转化等多重功能, 是环境污染绿色控制与治理的基础和关键.

目前我国在环境微生物污染方面, 研发了抗生素抗性基因纳米孔测序技术和气溶胶中新冠病毒快速监测系统, 进行了环境介质-微生物交互作用与微生物耐药传播扩散机制研究, 开展了污染物绿色高效降解/定向转化的微生物电子传递、化学信号调控研究, 并取得了显著进展. 然而, 由于复杂介质中微生物种类繁多、代谢复杂、信号交流错综, 有关微生物污染及治理研究仍缺乏可控性. 未来环境化学研究仍需继续开展生物污染快速监测技术开发、污染物微生物定向转化过程研究、环境污染化学微生物调控原理探索, 为环境污染防控及治理提供基础理论及科学依据.

重要研究方向包括:

(1) 病原微生物及毒素物质的溯源及快速筛查技术与方法;

(2) 土壤微生物耐药传播扩散机制及食物链传递风险;

(3) 微生物-环境介质-修复材料的电子传递机制与界面行为调控;

(4) 废水/废物中污染物高效降解/定向转化的微生物作用原理;

(5) 污染环境微生物交互作用关系及其化学信号调控原理.

2.11 环境污染与食品安全

环境污染与食品安全主要研究环境污染物从环境到食品的转化过程、赋存形态, 阐明其转化规律、污染特征以及危害形成机制. 食品作为环境中物质、能量交换的产物, 其生产、加工、储存、分配和制作都是在一个开放的系统中完成, 研究化学性、生物性以及放射性污染物对食品组分的影响, 分析不同污染物的赋存形态及其生物效应, 将为全面评估环境污染、创新食品生产可持续发展、开展食品安全质量控制提供理论基础.

党的十九大报告提出“实施食品安全战略, 让人民群众吃得放心”. 中共中央、国务院“关于深化改革加强食品安全工作的意见”提出到2035年实现食品安全标准进入发达国家行列, 并要求开展食品安全领域科技创新, 开展基础科学和前沿科学研究. 目前, 我国食品安全形势依然严峻, 土壤、水体污染导致粮食中重金属超标, 细菌耐药基因在环境、养殖动物和食品消费者中扩散, 设施农业和食品包装带来添加剂迁移, 富营养化藻类繁殖导致藻毒素为主的水产生物毒素污染, 环境化学污染物(重金属、农药、持久性有机污染物等)在食品中存在形式、释放效率和毒性机制不明等, 需要开展多学科交叉研究, 发展出基于环境-食品-人体全链条的食品风险评估和安全控制理论体系.

重要研究方向包括:

(1) 化学污染物在动植物食品中的迁移转化机制;

(2) 食品包装材料添加剂在食品中及人体内的迁移规律;

(3) 环境耐药基因在环境-食品-人体中的扩散机制;

(4) 人体环境污染物负荷与内外暴露关联的生物利用率和毒代动力学(PBTK)研究;

(5) 环境富营养化与生物毒素食品安全风险研究;

(6) 纳米技术和微塑料的食品安全风险研究.

2.12 放射化学与辐射化学

放射化学系研究放射性物质及其辐射效应的一门化学分支学科. 现代放射化学主要包括核能化学、环境放射化学、放射性药物化学、放射分析化学、放射性元素化学和核化学等. 放射化学不仅对于人类知识的拓宽起到了积极作用(如将元素周期表扩展了三分

之一), 而且由于人工放射性和核裂变的发现, 开创了核科学技术时代. 辐射化学从本质上是指辐射诱发的各类激发态物种、溶剂化电子、自由基反应的综合效应.

放射化学在基础研究、国家战略和重大需求等方面都具有重要作用, 是一个既有科学意义, 又有社会、经济和国防价值的重要学科领域. 近100年来, 放射化学为我国在国际上重要地位的确立, 为核能利用和核技术的开发应用, 为人类健康、环境保护以及社会和经济的可持续发展做出了重要贡献. 随着我国核电的快速发展, 在未来20年, 核能所产生的放射性废物处理处置以及核素在环境中的化学和迁移问题毫无疑问是我国环境放射化学的主要研究问题. 目前, 我国辐射化学的基础研究受制于先进脉冲辐解等科学实验装置的缺乏, 研究深度不足. 为了适应我国核能发展所带来的新挑战, 需要加强新型核反应堆中循环冷却介质与核事故容错包壳材料等的辐射化学研究及其他相关工作.

重点研究方向包括:

- (1) 乏燃料后处理新技术与新方法;
- (2) 锕系元素化学;
- (3) 基于精准诊断和治疗的放射性靶向药物和锕系促排药物;
- (4) 放射性污染控制技术 & 多模态先进放射分析方法;
- (5) 放射性核素与环境介质和环境材料间作用机制的多尺度模拟;
- (6) 核燃料循环辐射化学及新材料的辐射改性.

2.13 环境化学品与国家安全

我国是世界化学化工市场的领导者, 化学品的安全与和平使用、化学事故及化学安全事件的处理与无害化处置是安全与防护化学的核心要素, 也是国家与行业的重大需求. 危险识别与威胁评价、复合安全事件如化生放核危害的多组分预警监测和溯源、有毒化学品/危险材料的安全利用与防范处理技术是安全与防护化学、环境化学的重要研究方向.

2015年联合国发展峰会通过了2030年可持续发展议程, 强调实现化学品全生命周期的无害化环境管理, 细化了减少化学品排放和尽可能降低对人类健康和环境造成影响的行动计划. 我国约有4.6万种化学品在生产和使用, 每年还有200多种新增的化学品进入市场, 其中大多数化学品没有经过全面的生态风险和健康效应评估. 在安全与防护化学方面, 我国尚处于跟踪模仿、引进、部分应用的层面, 需要和安全科学技术、风险管理、职业健康、环境保护等学科领域进一步交叉融合、深度发展. 安全与防护化学的研究具有实现化学安全威胁因素的全识别、危害对象的全防护、复合安全事件的全处置等发展趋势.

重要研究方向包括:

- (1) 管控化学品筛查技术与方法;
- (2) 有毒化学品替代技术与策略;
- (3) 新型有毒化学品和新型材料的风险评估;
- (4) 化学威胁态势感知、智能预警及对抗关键技术;
- (5) 化生放核危害的检测、暴露评价及生物标志物;
- (6) 智能化毒性和生物活性预测关键技术.

3 总结与展望

环境化学创新是基础, 人才是关键, 服务国家需求是目标. 环境化学是实践性很强的学科, 既是国家重大需求, 更存在瓶颈问题, 这些问题的解决离不开一支高水平的环境化学基础研究队伍. 环境化学需要针对我国乃至全球环境污染与控制中的实际问题, 进一步凝练学科前沿与关键科学问题, 贯彻新时代科学基金确立的“鼓励探索, 突出原创; 聚焦前沿, 独辟蹊径; 需求牵引, 突破瓶颈; 共性导向, 交叉融通”的资助导向^[12], 通过研究污染物的组成与来源、环境过程与微观机制、生态风险与健康效应以及防控原理与方法等, 加强创新研究、强化学科交叉、明确研究导向, 大力推动我国环境化学学科的整体发展, 提升环境化学竞争力.

参考文献

- 1 Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin Iii FS, Lambin EF, Lenton TM, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, de Wit

- CA, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder PK, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley JA. *Nature*, 2009, 461: 472–475
- 2 Rappaport SM, Smith MT. *Science*, 2010, 330: 460–461
- 3 Huang K, Yang T, Xu J, Yang L, Zhao J, Zhang X, Bai C, Kang J, Ran P, Shen H, Wen F, Chen Y, Sun T, Shan G, Lin Y, Xu G, Wu S, Wang C, Wang R, Shi Z, Xu Y, Ye X, Song Y, Wang Q, Zhou Y, Li W, Ding L, Wan C, Yao W, Guo Y, Xiao F, Lu Y, Peng X, Zhang B, Xiao D, Wang Z, Chen Z, Bu X, Zhang H, Zhang X, An L, Zhang S, Zhu J, Cao Z, Zhan Q, Yang Y, Liang L, Tong X, Dai H, Cao B, Wu T, Chung KF, He J, Wang C. *Lancet*, 2019, 394: 407–418
- 4 Wang C, Xu J, Yang L, Xu Y, Zhang X, Bai C, Kang J, Ran P, Shen H, Wen F, Huang K, Yao W, Sun T, Shan G, Yang T, Lin Y, Wu S, Zhu J, Wang R, Shi Z, Zhao J, Ye X, Song Y, Wang Q, Zhou Y, Ding L, Yang T, Chen Y, Guo Y, Xiao F, Lu Y, Peng X, Zhang B, Xiao D, Chen CS, Wang Z, Zhang H, Bu X, Zhang X, An L, Zhang S, Cao Z, Zhan Q, Yang Y, Cao B, Dai H, Liang L, He J. *Lancet*, 2018, 391: 1706–1717
- 5 Jiang GB, Wang CX, Zhang A. *Toxicology and Health Effects of Atmospheric Fine Particulate Matters* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [江桂斌, 王春霞, 张爱茜. 大气细颗粒物的毒理与健康效应. 北京: 科学出版社, 2020]
- 6 Chen W, Zheng R, Baade PD, Zhang S, Zeng H, Bray F, Jemal A, Yu XQ, He J. *CA-A Cancer J Clin*, 2016, 66: 115–132
- 7 Wang CX, Zhu LZ, Jiang GB. *Frontiers and Prospects of Environmental Chemistry* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [王春霞, 朱利中, 江桂斌. 环境化学学科前沿与展望. 北京: 科学出版社, 2011]
- 8 Jiang GB, Liu WP. *Frontiers of Environmental Chemistry* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [江桂斌, 刘维屏. 环境化学前沿. 北京: 科学出版社, 2017]
- 9 Jiang GB, Zheng MH, Sun HW, Cai Y. *Frontiers of Environmental Chemistry (II)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [江桂斌, 郑明辉, 孙红文, 蔡勇. 环境化学前沿(第二辑). 北京: 科学出版社, 2019]
- 10 Jiang GB, Li XD. *A New Paradigm for Environmental Chemistry and Toxicology*. Singapore: Springer, 2020
- 11 Zhuang QK. *Environ Chem*, 2021, 40: 669–670 (in Chinese) [庄乾坤. 环境化学, 2021, 40: 669–670]
- 12 Li JH. *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2020, 34: 529–532 (in Chinese) [李静海. 中国科学基金, 2020, 34: 529–532]

Overview of development program of environmental chemistry of National Natural Science Foundation of China

Qiankun Zhuang^{1*}, Jianbo Shi², Meizhen Wang^{1,3}, Yang Yun^{1,4}

¹ Department of Chemical Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

² Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

³ College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

⁴ College of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

*Corresponding author (email: zhuangqk@nsfc.gov.cn)

Abstract: Environmental chemistry is a subject to research the existence, characteristics, behaviors, effects of chemical substances in environment and the principles and methods of pollution control. It is an important branch of chemical science and the core discipline of environmental science. In recent years, by facing the frontier of the discipline and the national strategic demands, sticking to the problem orientation, and highlighting foresight, innovation, interdisciplinarity and application, environmental chemistry has made great progress in the fields of pollution prevention and control, ecological construction and people's health. In order to meet the new demand for environmental chemistry in promoting Construction of Ecological Civilization, make the research of environmental chemistry more compatible with the direction of the "Four orientations" and effectively solve the problem of environmental pollution in China, the development plan and discipline layout of environmental chemistry discipline in the department of Chemical Science of National Natural Science Foundation of China (NSFC) are overviewed.

Keywords: National Natural Science Foundation of China, environmental chemistry, strategic development, discipline layout

doi: [10.1360/SSC-2021-0064](https://doi.org/10.1360/SSC-2021-0064)