• 科学论坛 •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0062

系统性生态环境风险控制基础科学问题与对策*

杨 静[1**] 吴 劲[2] 王 桥[2] 王国强[2] 刘 凯[3] 霍守亮[4]

1. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部,北京 100085
2. 北京师范大学 卫星应用前沿交叉研究院,北京 100875
3. 北京师范大学 国家安全与应急管理学院,北京 100875
4. 北京师范大学 环境学院,北京 100875

[**摘 要**] 系统性生态环境风险发生发展机制复杂、防控难度大,是国家生态环境安全领域的重大需求,也是当前国际环境科学与工程研究的前沿挑战。在此背景下,国家自然科学基金委员会组织召开了第395期双清论坛“系统性生态环境风险控制基础科学问题与对策”,围绕系统性生态环境风险的发生发展机理与耦合驱动机制、系统性生态环境风险即时识别和精准预警理论方法、多介质多过程生态环境风险协同防控关键技术等主题开展战略研讨。基于此次论坛,本文系统梳理了当前系统性生态环境风险面临的复杂特征表征、多阶段即时预警、高效协同阻控等挑战,凝练了系统性生态环境风险表征—预警—阻控亟需解决的关键科学问题,并据此提出了以关键节点和瓶颈清单为抓手的全链条协同治理技术路径,助力推动我国环境风险系统治理能力提升,为保障国家生态环境安全发挥基础性和先导性作用。

[**关键词**] 系统性生态环境风险;风险传导;风险识别;风险感知;风险阻控

生态环境安全是国家安全的重要组成部分,是社会经济持续健康发展的重要保障。当前,我国环境事件仍呈多发、频发的高风险态势,生态环境安全所面临的结构性、根源性、趋势性等压力总体上尚未根本缓解,防范与化解生态环境风险已成为维护国家生态安全的重要任务。党的二十大报告中明确提出要“严密防控环境风险”,对全面构建以风险控制为核心的生态环境安全体系提出了新要求。《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》等一系列国家政策文件中,进一步提出在全球气候变化背景下,须加强环境风险的系统防治工作。

系统性生态环境风险是近年来全球备受关注的世界性风险之一[1],是指在人类活动增强的背景下,生态环境系统与社会、经济系统以前所未有的方式高度关联,局部发生的环境损害通过“环境—社会—经济”复杂网络进行传导、交互、扩散、演变,形成影响范围广、持续时间长、破坏力大的环境事件[2]。与传统生态环境风险相比,系统性生态环境风险具有多因素诱发、多介质传导、多要素交互、跨系统级联影响等复杂特征(图1)。在当前气候变化加剧、新污染物涌现、生物多样性丧失等背景下,传统以线性、单一、局部为特征的环境风险分析范式已难以适用于系统性风险防控的多维度需求,亟需开展系统性生态环境风险控制基础科学问题研究,筑牢国家生态环境安全屏障[3]。

国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)第395期“双清论坛”聚焦系统性生态环境风险控制基础科学问题与关键技术方法,围绕系统性生态环境风险的发生发展机理与耦合驱动机制、系统性生态环境风险即时识别和精准预警理论方法、多介质多过程生态

收稿日期:2025-09-17; 修回日期:2025-10-22

* 本文根据国家自然科学基金委员会第395期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:yangjing@nsfc.gov.cn

引用格式: 杨静,吴劲,王桥,等. 系统性生态环境风险控制基础科学问题与对策. 中国科学基金,2026,40(1):157-163.
Yang J,Wu J,Wang Q,et al. Basic scientific issues and countermeasures for systemic ecological and environmental risk control. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2026,40(1):157-163.(in Chinese)

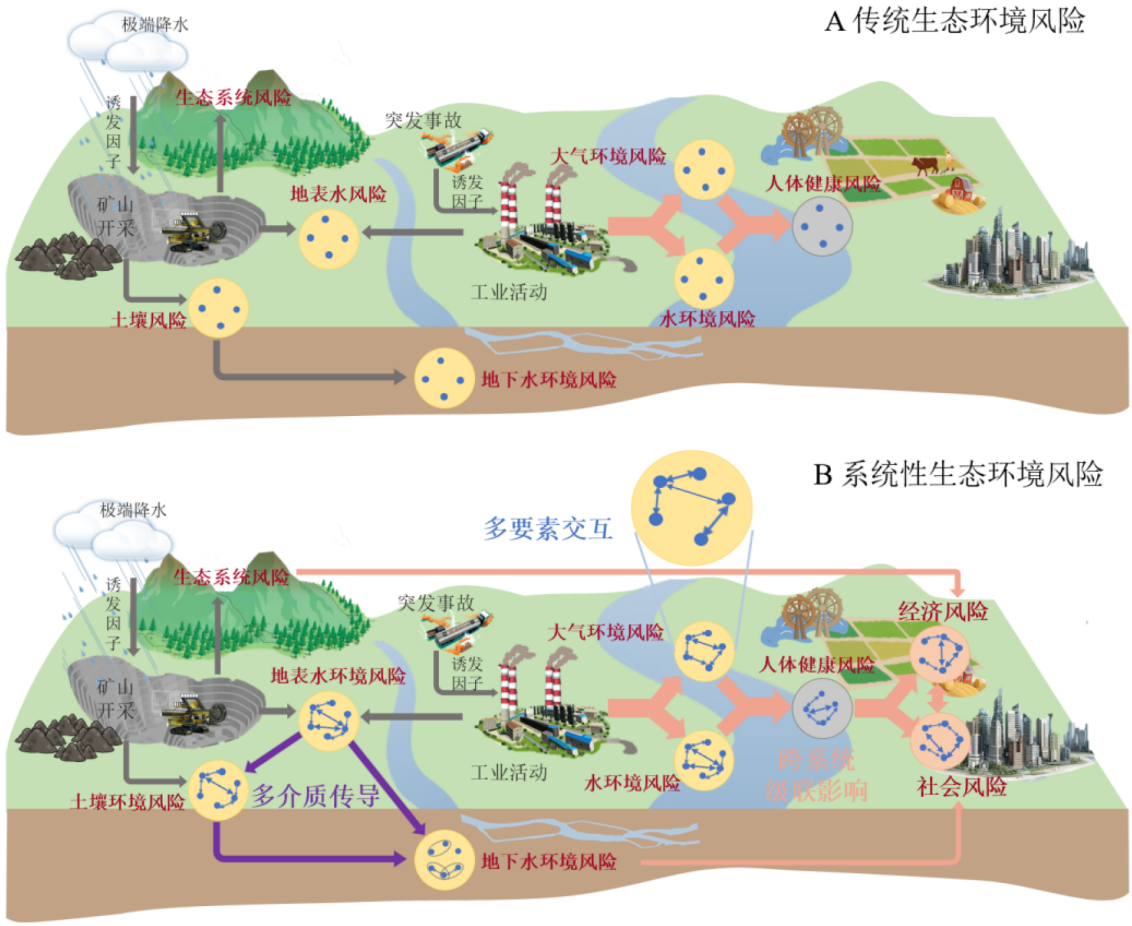


图1 传统生态环境风险与系统性生态环境风险的异同

Fig.1 Differences and Similarities between Traditional and Systemic Eco-environmental Risks

环境风险协同防控关键技术等三个主题开展战略研讨。基于此次论坛,本文深入剖析了当前系统性生态环境风险研究的现状与挑战,凝练了该领域亟需突破的关键科学问题与未来重点研究方向,为环境工程学科支撑国家生态环境安全保障提供科学建议。

1 系统性生态环境风险控制的研究现状与发展趋势

系统性生态环境风险的基础理论与防控技术方法研究尚处于起步阶段。以下分别从系统性生态环境风险的发生机理与传导机制、快速感知技术与方法、动态评估技术与方法、协同阻控关键技术等方面进行概述。

1.1 风险发生机理与传导机制

目前国内外已开展了大量单一类型环境风险发生条件相关研究,形成了相对完善的环境风险发生分析理论和技术方法体系[4]。例如,国内学者提出了流域突发环境风险发生表征技术方法[5],阐明了典型区域行业重金属、多环芳烃、阻燃剂等常规/新污染物的环境风险发生机理。然而,到目前为止还没有专门针对系统性生态环境风险发生机理的技术方法研究。在风险传导方面,现有研究大多聚焦污染物在环境系统内部的传导过程,通过将污染迁移模型与水文模型耦合,模拟流域污染物的迁移转化过程。在流域尺度上的代表性模型包括BASIN模型、SWAT模型和E-HYPESOLUTIONS模型等。近年来,部分学者从理论层面对气候变化条件下系统性生态环境风险传导过程进行了初步研究[6],相关研究结果表明,温室气体排放的累积效应通过全球碳循环网络与区域性社会经济系统进行交互耦合,在粮食安全、能源供应、人口迁移等多个领域产生级联效应[7,8](图2)。与此同时,国内外学者尝试建立系统性生态环境风险驱动机制的理论分析框架。南京大学以长江流域为例,构建了环境风险—经济风险—社会风险复杂交互理论框架,阐明了系统性生态环境风险演变的多尺度、非线性过程[2];特拉华大学提出了环境风险变化传导理论框架构建方法,阐明了诸如藻华等环境风险的驱动机制[9]。

1.2 风险快速感知技术与方法

随着卫星遥感科学与技术的迅速发展,基于多源遥感数据的风险识别技术已成为环境风险感知领域的热

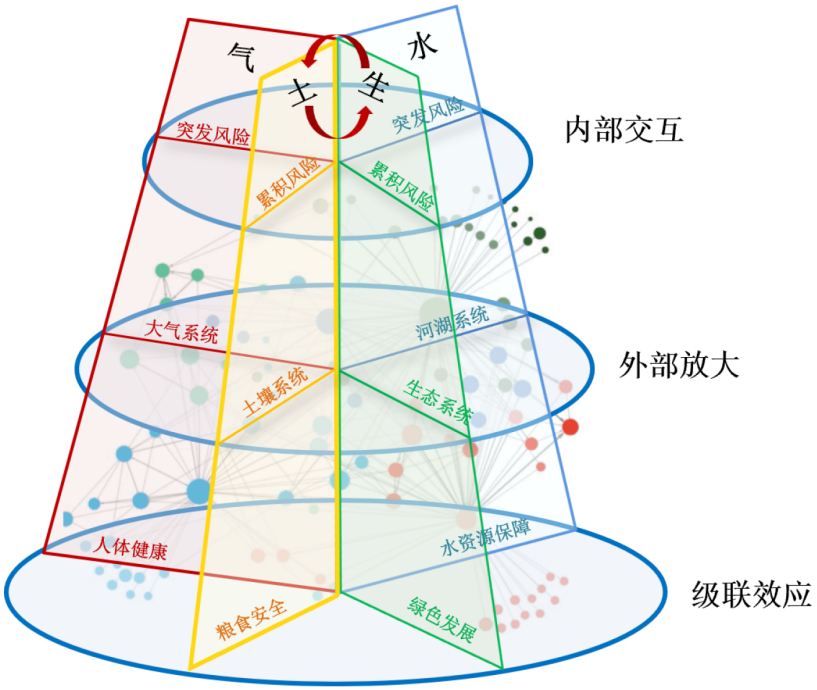


图2　系统性生态环境风险级联影响

Fig.2　Cascading Effects of Systemic Ecological and Environmental Risk

点。例如,在土壤环境风险领域,通过分析卫星多光谱遥感数据实现了土壤重金属污染高风险区的精准识别[10];在大气环境风险领域,通过气象雷达卫星数据、地面监测数据、卫星气溶胶光学厚度,利用随机森林与时空克里金耦合模型,实现了区域$PM_{2.5}$、NO_2环境风险的高时空分辨率识别[11];在水环境风险领域,基于地球静止海洋水色成像数据的空间加权神经网络模型,结合高光谱影像与卷积神经网络,实现了重点湖泊富营养化风险的快速识别[12]。多源遥感数据的融合与应用使得环境风险监测数据的维度、精度、时效性、可获取性显著提升,推动了环境风险识别由静态分析向动态监控转变。与此同时,环境风险预警智能化研究日益深入,国内外具有代表性的方法包括基于动力学的环境质量预报模型、基于卫星遥感的风险监控与预警框架、基于大数据分析的预警平台等[13]。其中,基于动力学模拟的预警技术最为成熟,率先在湘江、莱茵河与多瑙河等多个重要流域环境风险管控中得到业务化应用;而基于卫星遥感的环境风险监控技术和基于大数据的预警平台由于其范围广、高动态和全覆盖的特点,能够实现大尺度常态化监测和突发事件应对,也逐渐在国内外得到了广泛应用。

1.3　风险动态评估技术与方法

由于系统性生态环境风险涉及环境、社会与经济等多个维度,现有评估方法难以精准刻画系统内部要素之间动态交互关系。针对环境系统、社会系统、经济系统等进行跨系统的集成分析已成为解决复杂影响的主要方式[14]。这类模型以外部风险冲击为输入,模拟生态环境胁迫、社会经济损失和人员安全,涵盖生态系统服务、社会供应链及公共卫生等方面,并运用近期观测数据验证级联影响[15]。例如,概率健康风险模型可整合土壤—作物—人体的暴露路径,模拟量化重金属污染的系统性健康损失[16]。有学者提出利用复杂网络模型评价系统性生态环境风险[17],用复杂网络节点表征不同组成部分,用网络边缘表征不同组成部分之间的相互作用关系。例如,多层网络模型将产业链、企业单元与工艺环节的风险要素进行多维度耦合,建立了工业活动的系统性风险指数[18];全球气候风险互联网络模型实现了从局地极端事件到全球经济系统的多尺度风险效应模拟[19]。

1.4　风险协同阻控关键技术

现有环境风险阻控措施以源头防控、过程阻隔、末端治理为主,集中在局地重金属、有机污染物等环境风险阻控。在水生态环境领域,其风险阻控技术已从末端的点源治理向全过程、多尺度的系统性防控转变,重点聚焦于流域协同治理、工业园区水污染防控以及饮用水安全保障三个核心维度,形成了“源头控制—过程阻断—末端治理”的一体化技术体系。在土壤与固废领域,其风险阻控技术已形成从污染阻隔到资源化利用的完

整技术链条,重点关注污染场地安全管控、固废资源化环境风险防控和生态修复技术创新,体现“减量化—资源化—无害化”的综合治理思路。在大气环境领域,其风险阻控技术正向多污染物协同控制和全生命周期管理方向演进,重点关注复合污染协同治理、新污染物防控及环境健康风险管控,构建覆盖污染源至健康效应的全过程防控体系。在生态系统领域,其风险阻控技术已从单一技术向技术—管理—政策的综合解决方案转变,强调基于自然的解决方案与技术创新的有机结合。近年来,国内学者开展了面向环境经济效益的优化防控研究。浙江大学开发了耦合人类与自然系统碳氮循环模型,分析了不同情景下中国碳氮协同管理的系统性环境效应[20]。国外学者从环境、社会、经济多主体视角探讨了环境风险受体的综合防控策略。例如,Druckenmiller等[21]发现当移除高风险地区的开发政策激励,可有效减少人类活动对这些关键带的进一步破坏,降低当地居民作为风险受体的暴露剂量;Salazar-Miranda等[22]提出通过增加绿化、改善基础设施等方式,提升低发展区域和低收入群体的环境适应性和韧性。总体而言,生态环境风险阻控技术正经历从单一介质治理向系统调控、从被动应对向主动防控、从传统工程向智慧精准的深刻变革。这种变革不仅体现在技术本身的进步,更体现在治理理念的系统性转变,即认识到生态环境问题的复杂性和互联性,必须采取多维度、全过程的综合治理策略。

综上,国际上对系统性生态环境风险的认识仍在巩固和完善中。美国、欧洲等发达国家较早在生态领域开展了气候变化下的全球生态环境风险级联效应研究,初步构建了系统性生态环境风险的基础概念和研究方法。中国系统性生态环境风险研究虽起步晚但发展迅速,在能源金属行业领域开展了全生命周期系统性环境风险等研究;但仍存在发生传导理论原创性不足、高质量国产卫星数据少、跨系统影响动态评估模型缺失等挑战。从系统科学与技术的新视角,立足冶金、化工、石化等重污染行业,开展跨学科交叉协同创新的应用研究,有望引领国际系统性生态环境风险研究新高度。

2 阻控系统性生态环境风险面临的挑战

2.1 现有风险发生发展理论难以表征系统性生态环境风险的复杂特征

系统性生态环境风险的发生涉及风险源、诱发因子、传输路径、受体等多要素在时空上的相互作用,其驱动和演变过程具有时空尺度上的广泛性与复杂性。现有环境风险驱动因素大多聚焦单一类型驱动因素,较少探讨环境、社会与经济耦合驱动机制研究,缺乏基于系统科学理论与技术的关键驱动力识别方法。当前,系统性生态环境风险发生发展机制研究主要面临以下挑战:一是如何利用一体化感知、大数据采集和实验仿真模拟等技术手段,识别典型系统性生态环境风险源;二是如何准确识别气候变化与人类活动等重大诱发因子,并深入解析其驱动机制;三是如何在多因素交互作用下,科学判定系统性生态环境风险的触发条件与临界阈值;四是如何构建表征系统性生态环境风险复杂多变特征的模型。

2.2 现有风险感知技术无法满足系统性生态环境风险多阶段预警的需求

当前环境风险感知技术主要以中小区域、单一类型为主,难以有效支撑系统性生态环境风险对大范围、高动态和全覆盖风险的快速识别与智能预警需求,亟需借助多学科交叉手段对系统性生态环境风险的关键要素进行全域即时感知,解决预警响应滞后的问题,推动以动态、实时、主动为特征的风险预警技术发展。环境风险感知领域主要面临三大技术挑战:一是环境风险要素的天—空—地一体化监测技术欠缺,关键环境要素监测数据存在时空不同步、覆盖不连续等问题;二是如何融合环境机理驱动和大数据驱动模型,基于模型模拟和数据挖掘实现系统性环境风险多阶段预警阈值的快速识别;三是现有环境风险预警技术聚焦单一过程,缺乏从风险源、传输路径到受体的多阶段预警技术,难以实现从发生、传导直至演变的全过程动态追踪。

2.3 现有风险阻控技术无法满足系统性生态环境风险高效协同阻控的需求

现有环境风险阻控技术缺少针对多要素、多主体、多过程环境风险的优化措施,难以满足系统性生态环境风险高效协同阻控需求。实现高效协同阻控系统性环境风险,需要在更大空间尺度和时间范围内开展源头防控、过程阻隔、末端治理的多过程动态协同优化研究,构建考虑环境、社会和经济级联影响的多主体协调目标,制定系统性生态环境风险阻控的最优化方案。环境风险阻控领域主要面临三大技术挑战:一是构建耦合多要素、多过程的风险阻控理论框架,系统度量源头防控、过程阻隔与末端治理的综合环境效应;二是识别系统性环境风险的关键阻控节点,降低系统性环境风险阻控的时滞效应和经济成本;三是研发管控修复、工程治理、资源回收相结合的绿色阻控技术,实现风险阻控的减污降碳和协同增效。

总之,传统线性、单一、局部的生态环境风险理论方法难以满足系统性生态环境风险的全面解析。如何从系统性理论与技术解决复杂问题的新视角,构建贯穿发

生—传导—预警—评估的全链条环境风险阻控理论、技术与方法体系,是环境风险领域面临的重大挑战。

3　关键科学问题与重点研究方向

目前对系统性生态环境风险的认识尚处于起步阶段,已知生态环境风险治理方法与技术难以解决系统性环境风险阻控的需求。为应对国家生态环境安全面临的新挑战,促进生态环境风险研究范式革新,与会专家一致认为,推进系统性生态环境风险研究势在必行,并在讨论中提出了以下三个方面的关键科学问题及重点研究方向。

3.1　系统性生态环境风险的发生发展机理与耦合驱动机制

受人类活动与极端气候等诱发因素交织叠加的影响,系统性生态环境风险的形成条件具有极大的不确定性,风险发展过程的多路径传播特征和非线性传导机制进一步增加了风险的复杂度,而“四步法”(危害识别、剂量效应评估、暴露评估和风险表征四个步骤)等经典环境风险表征理论难以准确描述这些过程,严重制约环境风险的早期诊断和源头防控。亟需利用人工智能、大数据、复杂网络等手段回答诱发系统性生态环境风险关键因子及其作用机理、自然与社会耦合驱动下系统性环境风险发生动力学、跨层级系统性环境风险传导及其放大/衰减过程等关键科学问题,为系统性生态环境风险源头防控和过程模拟提供关键理论支撑。

为更好的应对系统性生态环境风险发生发展不确定性,推动环境风险表征理论创新,建议重点研究方向包括:系统性生态环境风险的诱发因素及形成条件、系统性生态环境风险的传导路径及耦合驱动机制、跨尺度跨介质污染时空迁移转化与生态自净耦联机制、新污染物多界面相互作用机制、生态环境风险危害—暴露—受体协同作用机制、生态环境风险与社会经济风险交互传导机制、城市/区域生态环境风险耦合驱动机制及级联效应、极端灾害下生态环境风险触发—传导—放大机制。

3.2　系统性生态环境风险即时识别和精准预警理论方法

环境风险识别和预警是典型的多时空尺度风险防控问题,尤其在应对重大突发性环境风险事件时,风险识别和预警对响应时间和空间精度需求高。传统以地基监测为核心的环境数据难以支撑流域/区域跨尺度、高精度、低延时的风险即时识别和精准预警需求。目前,无论是高时空分辨率环境监测数据还是多尺度环境风险识别与预警技术,都缺乏“天—空—地”一体化的跨尺度关联。亟需融合卫星、无人机等风险感知新手段,突破局部风险识别模式,回答系统性生态环境风险多时空尺度特征解析、系统性生态环境风险“天—空—地/海”立体监测体系、系统性生态环境风险发生与发展全过程动态识别、系统性生态环境风险动态模拟及智能预警等关键科学问题,为系统性生态环境风险监控和评估提供关键理论支撑。

为更好支撑系统性生态环境风险实时感知和快速响应,推动系统性环境风险识别与预警的方法与技术路径创新,建议重点研究方向包括:系统性生态环境风险的跨尺度特征解析、系统性生态环境风险即时遥感识别、系统性生态环境风险生物感知方法、深海生态环境新型智能观测与风险诊断、源体力视角下城市生态环境安全风险谱系构建、系统性生态环境风险指标筛选与阈值量化、基于复杂网络与智能主体的系统性生态环境风险评估、多介质系统性生态环境风险模拟器、数据—模型耦合的系统性生态环境风险智能模拟与预警。

3.3　多介质多过程生态环境风险协同防控关键技术

不同环境风险类型、演变过程、影响范围、防控措施具有显著的差异性,从而影响环境风险阻控技术路径的选择,尤其在防控系统性环境风险时,多介质、多要素、多过程的交织叠加极大增加了环境风险防控决策的难度。既有环境风险治理理论及技术集中在局部、单一风险,缺乏面向系统性环境风险阻控的协同增效原理,制约高效风险阻控技术的研发。亟需创新多主体协同、全过程联动的系统性防控模式,回答系统性生态环境风险多主体协同防控机制、源头—过程—受体全过程生态与健康风险协同阻控路径、系统性生态环境风险减缓关键节点识别机制、社会经济统筹的系统性环境风险防控决策原理等关键科学问题,为有效阻控系统性生态环境风险提供理论支撑。

为更好支撑系统性生态环境风险阻控的科学决策,推动各行业系统性环境风险阻控模式升级,建议重点研究方向包括:极端灾害下的系统性生态环境风险多主体协同阻控、陆海油气开发系统性生态环境风险防控、工业行业全生命周期系统性生态环境风险防控、战略性金属资源开发中多污染物协同治理与风险控制、固废处理处置中系统性生态环境风险防控、新污染物系统性生态环境风险评估与防控、全球变化下生源要素循环失衡与系统性风险阻控、城市群复合生态系统物质能量代谢紊乱机制与风险防控、大数据AI赋能的系统性生态环境风险智能防控、产业绿色转型过程中新型生态环境风险系统性管控。

4　结 语

系统性生态环境风险是具有多因素驱动、多介质交

互、跨系统传导等特征的复杂环境风险，防控难度极大。防范和化解系统性生态环境风险事关国家安全，同时也是环境科学与工程领域的国际前沿挑战。本文在全面梳理系统性生态环境风险研究现状和发展趋势的基础上，凝练了当前系统性生态环境风险的关键技术挑战、基础性科学问题、重点研究方向，为国家自然科学基金委员会在系统性生态环境风险领域的顶层设计和前瞻布局提供科学理论支撑。针对当前在系统性生态环境风险基础理论构建、关键技术攻关与方法体系创新等方面缺乏总体布局的问题，建议积极推动国家自然科学基金重大研究计划或重点研发专项计划等项目的立项和实施，力求形成若干突破性的原始创新成果，引领国际环境风险领域科研范式变革；同时在人才项目中应侧重选拔系统性生态环境风险领域有潜质的青年学者，推动环境工程科技进步和创新发展。在具体落地上，建议采用“1(理论中心)+N(场景化联合攻关)”的组织模式，建设“天—空—地”一体化观测与数据—模型耦合平台和开源模型库，打造若干国家级流域、重点城市群与近海观测网等示范工程群，以关键节点和瓶颈清单为抓手推动源—径—受全链条协同治理，并通过基准数据集与评测任务支撑可比性与可重复性，整体提升系统性风险治理的科技供给与政策落地效果。

参 考 文 献

[1] Elsner M，Atkinson G，Zahidi S. The global risks report 2025 20th edition//World Economic Forum 2025.Geneva：World Economic Forum，2025.

[2] Bi J，Yang JX，Liu MM，et al. Toward systemic thinking in managing environmental risks. Engineering，2021，7(11)：1518—1522.

[3] 杨静. 国家自然科学基金环境工程学科发展探讨. 环境工程学报，2022，16(4)：1055—1062.
Yang J. The development of environmental engineering disciplinary in context of National Natural Science Foundation of China. Chinese Journal of Environmental Engineering，2022，16(4)：1055—1062. (in Chinese)

[4] Eberle C，O'Connor J，Narvaez L，et al. Interconnected disaster risks：Risk tipping points. United Nations University，2023.

[5] Yu YJ，Li MY，Li LZ，et al. Construction of models to predict the effectiveness of E-waste control through capture of volatile organic compounds and metals/metalloids exposure fingerprints：A six-year longitudinal study. Environmental Science & Technology，2023，57(25)：9150—9162.

[6] Li HM，Wang XC，Zhao XF，et al. Understanding systemic risk induced by climate change. Advances in Climate Change Research，2021，12(3)：384—394.

[7] McPhearson T，Cook EM，Berbés-Blázquez M，et al. A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services. One Earth，2022，5(5)：505—518.

[8] Shumilova O，Sukhodolov A，Osadcha N，et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. Science，2025，387(6739)：1181—1186.

[9] Davis KF，Downs S，Gephart JA. Towards food supply chain resilience to environmental shocks. Nature Food，2021，2(1)：54—65.

[10] Wang YL，Zou B，Chai LY，et al. Monitoring of soil heavy metals based on hyperspectral remote sensing：A review. Earth-Science Reviews，2024，254：104814.

[11] Zhao S，Chen ZY，Xiong ZT，et al. Beyond Grid Data：Exploring graph neural networks for Earth observation. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine，2025，13(1)：175—208.

[12] Li JX，Hong DF，Gao LR，et al. Deep learning in multimodal remote sensing data fusion：A comprehensive review. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation，2022，112：102926.

[13] 陈弘，周庆琛，佟光远，等. 水体富营养化响应规律与水华预警方法研究进展. 中国农村水利水电，2024(7)：117—125，134.
Chen H，Zhou QC，Tong GY，et al. Progress of research on eutrophication response law and early warning method of water bloom in water bodies. China Rural Water and Hydropower，2024(7)：117—125，134. (in Chinese)

[14] Magnan AK，Pörtner HO，Duvat VKE，et al. Estimating the global risk of anthropogenic climate change. Nature Climate Change，2021，11(10)：879—885.

[15] Ouyang X，Liu LT，Chen W，et al. Systematic risks of the global lithium supply chain network：From static topological structures to cascading failure dynamics. Environmental Science & Technology，2024，58(50)：22135—22147.

[16] Yang SY，Zhao J，Chang SX，et al. Status assessment and probabilistic health risk modeling of metals accumulation in agriculture soils across China：A synthesis. Environment International，2019，128：165—174.

[17] Westra S，Zscheischler J. Accounting for systemic complexity in the assessment of climate risk. One Earth，2023，6(6)：645—655.

[18] Liu LT，Ouyang X，Gao TM，et al. Spatiotemporal and multilayer trade network patterns of the global cobalt cycle. Environmental Science & Technology，2024. DOI：10.1021/acs.est.4c02717.

[19] Simpson NP，Mach KJ，Constable A，et al. A framework for complex climate change risk assessment. One Earth，2021，4(4)：489—501.

[20] Xu X，Zhang XM，Zou YY，et al. Integrated carbon and nitrogen management for cost-effective environmental policies in China. Science，2025，388(6751)：1098—1103.

[21] Druckenmiller H，Liao YJ，Pesek S，et al. Removing development incentives in risky areas promotes climate adaptation. Nature Climate Change，2024，14(9)：936—942.

[22] Salazar-Miranda A，Conzelmann C，Phan T，et al. Long-term effects of redlining on climate risk exposure. Nature Cities，2024，1(6)：436—444.

Basic Scientific Issues and Countermeasures for Systemic Ecological and Environmental Risk Control

Jing Yang[1*] Jin Wu[2] Qiao Wang[2] Guoqiang Wang[2] Kai Liu[3] Shouliang Huo[4]

1. *Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China*
2. *Advanced Interdisciplinary Institute of Satellite Applications, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
3. *School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
4. *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

Abstract Systemic ecological and environmental risks are characterized by complex mechanisms of occurrence and development, posing significant challenges for prevention and control. Addressing these risks represents a critical national demand for ecological and environmental security and stands at the forefront of current international research in environmental science and engineering. Against this backdrop, the National Natural Science Foundation of China convened the 395th Shuangqing Forum, titled "Fundamental Scientific Issues and Countermeasures for Controlling Systemic Ecological and Environmental Risks." The forum facilitated strategic discussions on key themes, including the mechanisms governing the emergence and evolution of systemic risks and their coupled driving forces; theoretical frameworks and methodologies for real-time identification and precise early warning of such risks; and key technologies for coordinated prevention and control across multiple media and processes. Building upon the outcomes of this forum, this paper systematically reviews current challenges pertaining to the characterization of complex features of systemic ecological and environmental risks, multi-stage real-time early warning, and efficient coordinated containment and control. It distills the pivotal scientific questions urgently requiring resolution across the chain of risk characterization, early warning, and containment. Accordingly, the paper proposes a whole-chain collaborative governance technological pathway, leveraging lists of critical nodes and bottlenecks as key entry points. This approach aims to enhance China's capacity for systematic governance of environmental risks and play a foundational and pioneering role in safeguarding national ecological and environmental security.

Keywords systemic ecological and environmental risk; risk transmission; risk identification; risk perception; risk prevention and control

杨 静 博士,研究员,现任国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学三处处长。

(责任编辑 王 磊 张 强)

* Corresponding Author, Email: yangjing@nsfc.gov.cn