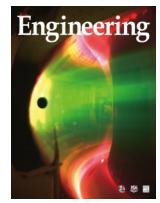




Contents lists available at ScienceDirect

## Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



### Views & Comments

## 迈向系统性环境风险管理

毕军, 杨建勋, 刘苗苗, 马宗伟, 方文

*State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China*

### 1. 引言

我们正生活在一个高度互联的世界当中，环境、经济和社会系统之间形成无数相互依存的复杂网络，人力、资源、材料、商品和信息通过这些网络以前所未有的速度进行交换[1]。与此同时，此类复杂网络也深刻改变了全球风险格局，并使整个社会经济系统更加脆弱[2]，特别是存在于复杂网络中的系统性风险近年来愈加得到人们关注。系统性风险往往源于局部的初始破坏性事件（如2019年的新冠病毒肺炎大流行），其风险通过复杂网络在全球范围内迅速传播，从而造成破坏性影响并导致高昂的社会成本[3]。为了控制和降低系统性风险，迫切需要开展协调一致的研究工作，提出认知和调控系统性风险的综合方法。

在世界经济论坛（WEF）发布的《2021年全球风险报告》中，环境风险被列为最具可能性和最高影响力的风险之一[4]。减轻环境风险作为联合国可持续发展目标的主要任务之一，现已成为全球重要的政策议程[5]。一方面，贸易等互联系使得人类和环境系统以前所未有的方式“远程耦合”在一起，来自世界不同地区的社会消费需求驱动环境要素的迁移，同时影响区域可持续性并造成环境不平等和不公正等问题[6–7]。另一方面，极端生态环境事件也会破坏经济和社会系统的适应性反馈机制，导致整个系统的崩溃。因此，从整体和系统的角度看待环境风险，识别隐藏在这些复杂系统中的风险节点至关重要。迄

今为止，在理解系统性风险方面所做的大部分努力都主要集中在金融系统内，直到最近学者们才开始关注环境中可能存在的系统性风险[8]。此外，现有的应用于环境问题的系统性风险分析框架侧重于气候变化等全球环境议题，未能充分揭示跨尺度、跨系统的环境风险反馈机制[9]。

在这篇“观点与评论”论文中，我们提出了系统性环境风险的概念和分析框架，并阐述了环境风险如何在不同系统和多尺度网络内部间的转移。我们以中国长江流域的水环境风险为例，介绍了在具有复杂经济和环境系统的地区应如何理解和管理系统性风险。从系统工程的角度出发，我们进一步明确了应对生态环境风险挑战所应采取的策略，并提出了相应的前沿研究话题以便不同学科背景的研究人员参考。

### 2. 复杂系统与系统性环境风险

系统性风险通常被视为存在于复杂系统内部的特征。复杂系统的结构可以用复杂网络来表征，其中节点代表系统中的众多组分，边代表这些组分间的相互联系[9]。环境、经济和社会领域的许多相互依存关系可以被描述为复杂系统，如生物系统、气候系统、交通系统、金融系统、互联网和社交网络等[10]。因此，系统性风险可以理解为在高度互联的网络中潜在的风险。

当前研究缺乏对复杂系统内部的环境风险潜在影响的

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2021, 7(11): 1518–1522

引用本文: Jun Bi, Jianxun Yang, Miaoqiao Liu, Zongwei Ma, Wen Fang. Toward Systemic Thinking in Managing Environmental Risks. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.016>

认知。针对这一瓶颈，我们提出了系统性环境风险的概念，以更全面地刻画人类与环境系统间的联系。我们将系统性环境风险定义为由人类活动引起或与之相关的风险，这些风险可以通过复杂的生态、经济和社会网络与人类系统相互作用。与仅在单个系统内转移的其他类型风险不同，系统性环境风险能够在人类和自然系统中发生转移，并留下跨系统的“风险足迹”。环境风险既能够引发人类系统的不稳定性，也可以通过反馈循环进一步受到人类系统的影响。图1概念性地描述了系统性环境风险与人类系统相互作用的路径。大多数环境风险（如有毒污染物）源自人为活动，由复杂的经济网络（如产业供应链）驱动。在环境系统内，风险沿着食物链污染的物理化学转化过程等发生转移，并表现出不同的演变模式。同时，累积性环境风险会增加水和能源等资源的稀缺性，从而对经济系统的运行构成威胁。另外，个体暴露于环境风险会导致环境健康问题，破坏社会稳定。在这样的复杂网络中，财富和社会资本在现实世界中往往不成比例地积累，使得人类系统中的一些高影响力节点（如少数国家和公司）在驱动网络方面占据主导地位。这一过程将加速环境和财富不平等以及合作失败等问题，进而加剧系统性风险。因此，面对系统性环境风险，单一系统的缓解和适应措施是不够的。

面对系统性环境风险需要系统性的管理策略，以更好

地应对其三个显著特征。

## 2.1. 不同时空尺度的相互作用

系统性环境风险可能发生在局地（如化学品泄漏）、区域（如土地退化、空气污染）和全球范围等（如气候变化），其空间尺度取决于环境系统与人类系统间发生联系时的规模[11]。此外，由于不同环境风险的演化速度不同，因此也具有不同的时间尺度。我们将系统性环境风险分为以下三类：①短期内发生的突发性事故风险，如化工厂爆炸或森林野火；②持续累积并爆发为严重事件的风险，最常见的如藻华和棕地污染等；③对人类系统构成长期慢性威胁并可能引发系统性变化的风险，如气候变化。人与环境跨时空尺度的动态相互作用增加了风险识别和治理的难度。

## 2.2. 风险间的非线性关联机制

系统性环境风险遵循非线性因果关系，因此不能理解为单一风险的简单加总[12]。不同环境风险之间的相互作用可能具有协同和溢出效应，并展现出复杂的特征。自组织和负反馈效应使复杂系统能够适应一定程度的扰动；但当非线性相互作用累积达到某些临界点时，它们会产生系统性和不可逆的转变，引发多米诺骨牌式的级联后果[13]。例如，在经济和资源已经相对贫乏的边缘地区，自

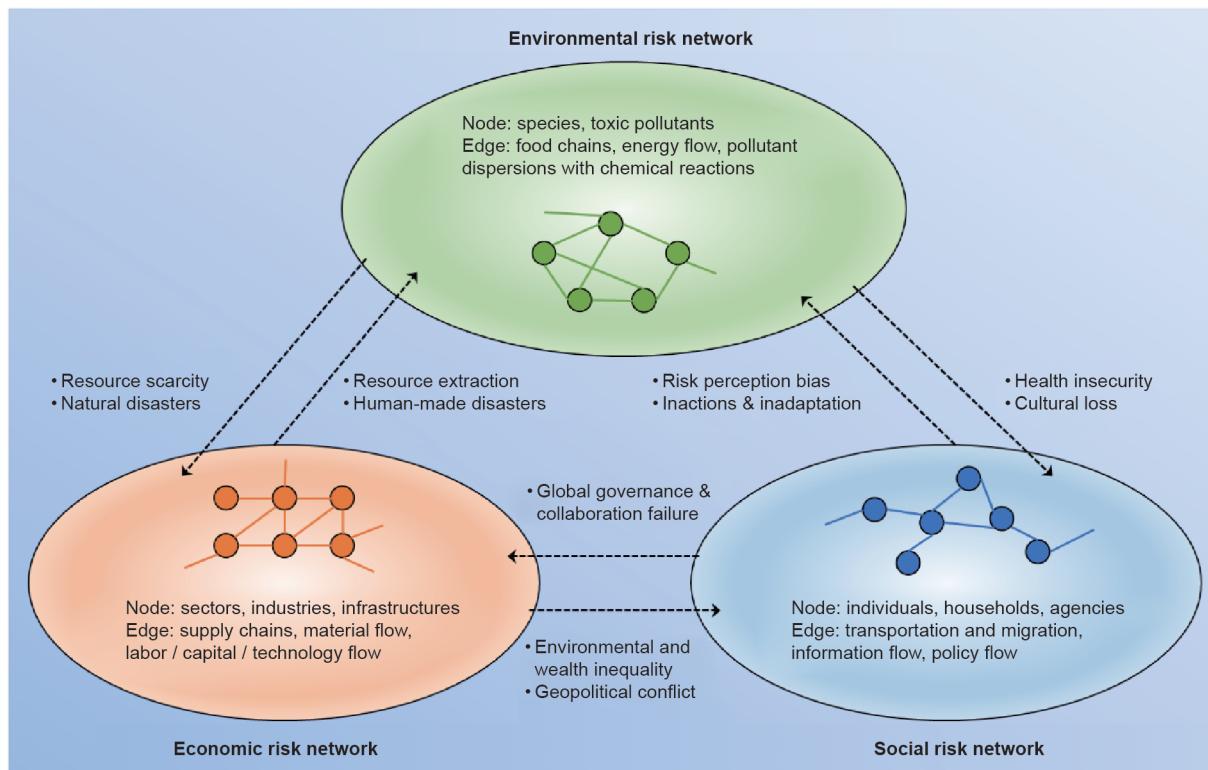


图1. 系统性环境风险概念示意图。

然灾害的频繁发生可能会加速经济网络的崩溃。由于这些非线性关联机制，风险临界点的出现往往难以预测。

### 2.3. 非理性的认知和决策

社会经济系统在产生、承担和减轻风险方面发挥着核心作用，同时个体非理性的认知与行为决策可能导致系统性环境风险管理的失灵。首先，公众风险感知能力是有限的，不能准确判断环境风险水平。例如，个体对可观测风险更加警惕，如空气污染等，但倾向于低估长期全球尺度的风险，如气候变化[14]。在个体决策方面，一些“双赢”的集体行为可能会因搭便车问题（即受益于公共物品的人不支付费用）以及囚徒博弈（即当人们将自己对公共利益的贡献不足合理化而不合作）等失灵，最终导致全球环境风险管理的失败。

## 3. 理解系统性环境风险：以长江流域为例

在本节中，我们以中国长江流域的水环境风险管理为例，说明了解系统性环境风险的重要性。长江是世界第三长河，拥有着丰富的生态环境资源。同时，长江流域是中国经济和社会活动的中心地带，创造了全国近一半的国内生产总值（GDP），承载了全国三分之一的人口。史无前例的工业扩张和城市化带来了严重的水污染风险；此外，面对气候变化，长江流域还面临更频繁发生洪水等极端天气事件的风险。

图2简要说明了长江流域的水环境风险及其与人类经济和社会系统的耦合情况。农业和工业部门的水资源使用和废水排放是经济系统造成环境压力的主要源头。据估计，中国每年有60%以上的铅（Pb）、汞（Hg）、镉（Cd）和砷（As）污染排放到长江水体中[15]。随着经济增长和城市化进程的推进，对水污染排放的需求可能会进一步增加。

环境风险通过多种途径推动和放大经济系统中的网络风险。例如，①气候变化导致的水体污染、过度用水与异常降水增加了水资源短缺的风险。水资源短缺风险将通过一系列非线性经济网络，如全球供应链、上游和下游贸易网络、粮食-水-能源关系等，给用水部门造成潜在的经济损失[16-17]。②气候变化和极端天气风险增加，会破坏公共基础设施和私有财产，造成直接经济损失，并影响上游供应链。这些环境风险通常发生在局地，其影响在区域层面汇总，并由于不同地区恢复能力的差异而表现出跨部门和区域的异质性[18]。

与此同时，人们对长江流域中环境风险造成的社会影

响和平等问题了解甚少。例如，①水污染和水灾与许多急性和慢性健康风险有关，包括消化系统癌症和流行病[19]。公共卫生资源分配不均可能会加剧区域不平等并造成许多被忽视的环境健康风险热点。②水环境风险是导致贫富差距和人口迁移的重要驱动因素。水环境风险对经济系统的影响在不同地区是有差异的，因此扩大了贫富差距，并驱动更多的社会资本和劳动力资源向城市地区和沿海发达地区转移。

在管理水环境风险时，治理失败的潜在风险也值得关注。长江流域横跨19个省和直辖市，地方政府在管理环境风险方面发挥着主导作用，但他们的决策是基于经济和环境目标之间的权衡。由于治理的行政边界与生态系统边界在空间上往往是错位的，这使得地方政府之间合作失灵的风险很高[20]，从而放大水环境风险对经济可持续增长和社会稳定的影响，并逐渐形成闭环，难以全面实现风险良治。

## 4. 应对系统性环境风险

系统性环境风险管理需要系统性的策略。当前的风险管理研究存在一定不足，无法充分评估跨系统的风险转移：

(1) 缺乏对导致环境风险的社会、政治和经济因素的关注。例如，当前的环境健康风险分析范式主要依赖于包括风险识别、剂量反应评估、暴露评估和风险表征四个步骤。风险削减的主要环节在于防止风险在环境介质中传播并减少风险暴露，对驱动环境风险转移和塑造不平等格局的社会和经济因素关注较少。

(2) 未能将不同风险的反馈闭环整合到建模中。典型的故障树和事件树分析是一种自上而下的技术，用于识别风险节点和评估故障概率。这些方法无法处理多系统间的风险闭环反馈。例如，人为活动改变了气候，反过来又受到气候变暖的影响，这可能会进一步放大人为活动对气候变化的贡献[21]。

(3) 低估了罕见极端事件和人类系统意外行为的可能性。主流经济学基于均衡范式，假设系统将做出最优决策并向稳定状态演进，极端事件发生的概率没有得到充分考虑。最典型的案例即自然灾害引发技术灾难风险（Natech）[22]，2011年福岛核事故和随后的社会恐慌就是例证。

在此基础上，我们提出了解决系统性环境风险的思路与研究方向建议。

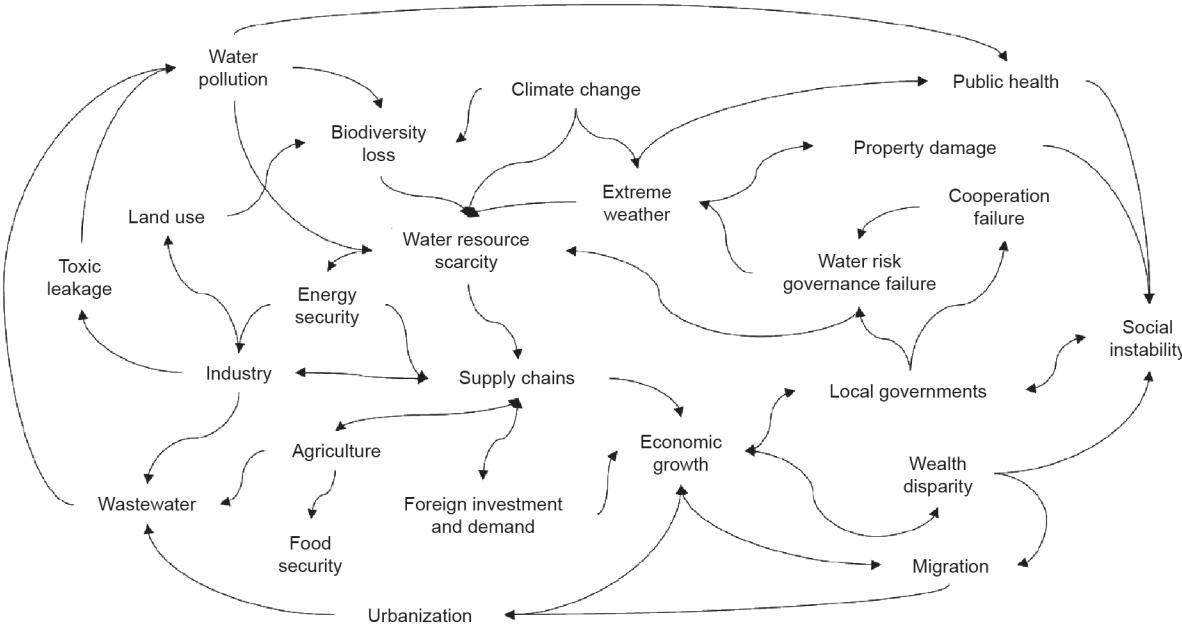


图2. 长江流域系统性环境风险示意图。

#### 4.1. 向系统性环境风险评估和全过程管理转型

鉴于上述不足，迫切需要开展跨系统风险评估和全过程风险管理研究。首先，当前线性的环境风险分析范式应转变为基于闭环反馈分析的范式，将社会和经济网络添加到分析框架中，研究其驱动和放大环境风险的作用机制。此外，除了在达到临界点之前对环境风险的演变进行建模之外，还要模拟“黑天鹅”事件（即有重大影响的突发事件）发生后风险网络的变化，并设计相应的应急方案。

#### 4.2. 确定系统性环境风险的管控优先级

系统性环境风险范围广泛，但应用于风险管理的资源十分有限，因此需要建立风险优先管理清单，筛选需要监管的关键节点。相关节点包括高风险供应链、资源密集型行业和高风险的部门与主体。建立优先序势必涉及大量定量数据，并应根据风险的可能性和后果制定管控排名。专家意见等定性数据在此过程中也应得到重视，因其可能比从不同系统收集的定量数据更有洞察力。例如，世界经济论坛发布的年度全球风险认知调查即由来自不同学科领域的650名专家共同讨论编制[4]。此外，由于环境风险的优先级和目标会随着社会经济的发展而变化，并且随着新兴风险不断涌现，应定期和动态地开展风险排序工作，以识别新的挑战。

#### 4.3. 整合工程措施、市场工具和公众参与以提高系统韧性

韧性决定了复杂网络在面对系统性风险的脆弱程度。为了提高系统韧性，应进一步分散网络节点间的耦合强度，提高系统容错性，从而削减整体性风险。在实践中，

工业园区生态修复、风险排查等工程项目是缓解环境风险、提高风险适应能力的最直接措施。此外，经济系统中的污染责任保险等绿色金融工具有助于在面临破坏性环境风险时保持经济弹性。最后，社会机构和公众广泛参与对环境风险的识别与监控，也是保障利益相关方风险管理诉求的重要路径。

中国政府将防范化解重大风险确立为保障社会安全和可持续发展的重大国家战略之一，并提出到2060年实现“碳中和”的远景目标。为此，决策者应重视系统性环境风险评估，设计多尺度、跨系统的调控工具有效控制环境风险。管理系统性环境风险的成功实践经验也将为应对全球环境变化提供有益借鉴。

#### 致谢

本研究得到国家自然科学基金项目(71921003, 71761147002)及中国工程院重大咨询研究项目(2019-ZD-33)的资助。

#### References

- [1] Brockmann D, Helbing D. The hidden geometry of complex, network-driven contagion phenomena. *Science* 2013;342(6164):1337–42.
- [2] Helbing D. Globally networked risks and how to respond. *Nature* 2013; 497 (7447):51–9.
- [3] Chang S, Pierson E, Koh PW, Gerardin J, Redbird B, Grusky D, et al. Mobility network models of COVID-19 explain inequities and inform reopening. *Nature* 2021;589(7840):82–7.
- [4] Kwon K, Barthe-Dejean G, Scott J, Smith-Bingham R, Riddel G. The global risks report 2021. 16th edition. Geneva: World Economic Forum; 2021.

- [5] Bodin Ö. Collaborative environmental governance: achieving collective action in social–ecological systems. *Science* 2017;357(6352):eaan1114.
- [6] Keys PW, Galaz V, Dyer M, Matthews N, Folke C, Nyström M, et al. Anthropocene risk. *Nat Sustain* 2019;2(8):667–73.
- [7] Liu J, Dietz T, Carpenter SR, Taylor WW, Alberti M, Deadman P, et al. Coupled human and natural systems: the evolution and applications of an integrated framework. *Ambio*. In press.
- [8] Liu J, Hull V, Batistella M, DeFries R, Dietz T, Fu F, et al. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecol Soc* 2013;18(2):26.
- [9] Gao J, Barzel B, Barabási AL. Universal resilience patterns in complex networks. *Nature* 2016;530(7590):307–12.
- [10] Brown DG, Robinson DT, An L, Nassauer II, Zellner M, Rand W, et al. Exurbia from the bottom-up: confronting empirical challenges to characterizing a complex system. *Geoforum* 2008;39(2):805–18.
- [11] Famiglietti JS. The global groundwater crisis. *Nat Clim Chang* 2014;4(11):945–8.
- [12] Galaz V, Crona B, Dauriach A, Scholtens B, Steffen W. Finance and the Earth system-exploring the links between financial actors and non-linear changes in the climate system. *Glob Environ Change* 2018;53:296–302.
- [13] Loarie SR, Duffy PB, Hamilton H, Asner GP, Field CB, Ackerly DD. The velocity of climate change. *Nature* 2009;462(7276):1052–5.
- [14] Huang L, Liu Y. Balanced news for long-term growth. *Nat Energy* 2020;5(7):500–1.
- [15] Hu F, Tan D, Xu Y. Yangtze water risks, hotspots and growth. Report. Hong Kong: China Water Risk; 2019.
- [16] Qu S, Liang S, Konar M, Zhu Z, Chiu ASF, Jia X, et al. Virtual water scarcity risk to the global trade system. *Environ Sci Technol* 2018;52(2):673–83.
- [17] Zhou XY, Lei K. Influence of human–water interactions on the water resources and environment in the Yangtze River Basin from the perspective of multiplex networks. *J Clean Prod* 2021;265:121783.
- [18] Kambhu J, Weidman S, Krishnan N. Part 3: systemic risk in ecology and engineering. *Econ Policy Rev* 2007;13(2):25–40.
- [19] Liu M, Liu X, Huang Y, Ma Z, Bi J. Epidemic transition of environmental health risk during China’s urbanization. *Sci Bull* 2017;62(2):92–8.
- [20] Sayles JS, Baggio JA. Social–ecological network analysis of scale mismatches in estuary watershed restoration. *Proc Natl Acad Sci USA* 2017;114(10):E1776–85.
- [21] Obradovich N, Rahwan I. Risk of a feedback loop between climatic warming and human mobility. *J R Soc Interface* 2019;16(158):20190058.
- [22] Salzano E, Basco A, Busini V, Cozzani V, Marzo E, Rota R, et al. Public awareness promoting new or emerging risks: industrial accidents triggered by natural hazards (NaTech). *J Risk Res* 2013;16(3–4):469–85.