

面向“RNAO-生态”超网络复杂结构的流域水资源治理模式

锁利铭, 李军

引用本文

锁利铭, 李军. 面向“RNAO-生态”超网络复杂结构的流域水资源治理模式[J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 355-367.

SUO Liming, LI Jun. Water Resources Governance Mode in Watersheds Oriented to “RNAO-Ecology” Hypernetwork Complex Structure [J]. Computer Science, 2023, 50(7): 355-367.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于注意力神经网络的对地观测卫星上自主任务规划方法](#)

Satellite Onboard Observation Task Planning Based on Attention Neural Network

计算机科学, 2022, 49(7): 242-247. <https://doi.org/10.11896/jsjx.210500093>

[一种基于切比雪夫距离的隐式偏好多目标进化算法](#)

Hidden Preference-based Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Chebyshev Distance

计算机科学, 2022, 49(6): 297-304. <https://doi.org/10.11896/jsjx.210500095>

[联合自注意力和循环网络的图像标题生成](#)

Generation of Image Caption of Joint Self-attention and Recurrent Neural Network

计算机科学, 2021, 48(4): 157-163. <https://doi.org/10.11896/jsjx.200300146>

[双语图像标题联合生成研究](#)

Study on Joint Generation of Bilingual Image Captions

计算机科学, 2020, 47(12): 183-189. <https://doi.org/10.11896/jsjx.190900181>

[基于改进特征子集区分度的行为识别特征选择方法](#)

Feature Selection Method for Behavior Recognition Based on Improved Feature Subset Discrimination

计算机科学, 2020, 47(11A): 204-208. <https://doi.org/10.11896/jsjx.200100030>

面向“RNAO-生态”超网络复杂结构的流域水资源治理模式

锁利铭^{1,2} 李军¹

1 南开大学周恩来政府管理学院 天津 300050

2 中国政府发展联合研究中心 天津 300050

(suoliming@nankai.edu.cn)

摘要 长久以来,流域的整体性与权威碎片化致使我国流域水资源治理成本甚高,向网络治理转型成为近些年流域研究的关注热点并形成广泛共识。强调协调策略的 RNAO(Restricted Network Administration Organization)网络结构,相较于西方学者提出的 3 种传统方案,更符合流域水资源治理本土化的实践需要,而针对 RNAO 的更为一般化的治理理论则是其理论发展方向。首先,梳理了流域水资源治理“传统-网络-超网络”模式的三维进阶逻辑;其次,将 RNAO 与“社会-生态”系统理论加以融合,创新地提出了“RNAO-生态”规模匹配的流域超网络治理模式,详细分析了“组织网、行为网、生态网”三层子网的复杂互动机理,从而初步形成了对 RNAO 的一般性理论构建;最后,针对“联合河长制”与“黑河流域水资源治理”两个案例,分析了 RNAO 与“RNAO-生态”在中国流域治理实践中的应用现状,并给出未来流域治理网络化转型的相关政策建议和可能的学术议题。

关键词: 流域水资源;网络治理;超网络复杂结构;RNAO;“社会-生态”系统

中图分类号 D63;X52

Water Resources Governance Mode in Watersheds Oriented to “RNAO-Ecology” Hypernetwork Complex Structure

SUO Liming^{1,2} and LI Jun¹

1 Zhou Enlai School of Government, Nankai University, Tianjin 300050, China

2 The United Research Center of Chinese Government Development, Tianjin 300050, China

Abstract For a long time, the integrity of watersheds and the fragmentation of authority have resulted in high cost of water resources governance in China's watersheds. The transition to network governance has become a hot topic of watershed research in recent years, and a broad consensus has been formed. Compared with the three traditional schemes proposed by western scholars, the RNAO(Restricted Network Administration Organization)network structure focusing on coordination strategies is more in line with the practical needs of localization of water resources governance in the watersheds. A more general governance theory for RNAO is the direction of its theoretical development. First, this paper sorts out the triple advanced logic of the “traditional-network-hypernetwork” process of water resources governance of watershed research. Secondly, it integrates RNAO and “social-ecological” system theory, innovatively proposes an “RNAO-ecological” scale matched watershed hypernetwork governance mode, and analyzes the complex interaction mechanism of the three-layer sub-network of “organization network, behavior network, and ecological network” in detail, thus initially forming a general theoretical construction of RNAO. Finally, according to the two cases of “united river chief system” and “water resource governance of Heihe watershed”, this paper analyzes the application of RNAO and “RNAO-ecology” system in China's watershed governance practice and gives relevant policy suggestions and possible academic topics for the future network transformation of watershed governance.

Keywords Water resources in watersheds, Network governance, Hypernetwork complex structure, RNAO, “Social-ecological” system

1 引言

经济社会活动。从古至今,流域系统的持续发展离不开流域治理实践的与日创新。水资源的流动性和多样态,使其成为连接流域系统中各地理单元、经济社会单元、治理单元的关键

流域作为自然界中水资源的空间载体,承载着人类各项

到稿日期:2022-09-15 返修日期:2022-12-26

基金项目:国家自然科学基金(72074129,71774026);2021 年南开大学文科发展基金科学研究类项目(ZB21BZ0219)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(72074129,71774026) and Scientific Research Program of Liberal Arts Development Fund of Nankai University in 2021(ZB21BZ0219).

通信作者:李军(zsglijun@mail.nankai.edu.cn)

纽带^[1],而其作为公共池塘资源的天然属性也带来了诸如集体行动的困境。流域水资源治理不仅涉及广泛的利益相关者,还包含政治、经济、社会、生态各子系统的复合互嵌机制,这就要求我们必须用复杂性科学的视角对治理过程中的问题重新加以审视。

二十余年来,各级政府在治理水资源短缺、水环境污染等流域问题上动用了海量资源,耗费了大量精力,但仍然收效甚微,其根源之一在于整体性流域的碎片化治理^[2]。人为的辖区划分使原本开放的流域生态圈层闭合化,有限而碎片化的治理权威在“部门本位主义”和“地方保护主义”的利益驱动下^[3],当面对诸如取水不公、污染转移、洪汛灾害这类负外部性事件发生时,以邻为壑、各自为政的局面便成为常态。单一的市场机制或府际协作已无法实现流域各区段全面可持续的治理目标^[4],还会使流域生态的可持续性、社会的公平性大打折扣。有数据表明,中国的水质在1991年至2005年的15年间几乎没有改善^[5],而中国的城市政府在1999年至2010年期间向下游邻居排放的污染物却平均增长了57%^[6],可见跨界水资源的协调治理难题并非朝夕之困,利用复杂治理工具解决复杂治理问题已迫在眉睫。

2022年7月,全国水生态环境保护工作会议指出,要深刻把握“十四五”水生态环境保护的总体策略,更加突出“三水统筹”,着力推动水生态环境保护向水资源、水生态、水环境等流域要素系统治理、统筹推进转变。这一表述,本质上是运用复杂系统的思维重新审视流域治理。以黄河流域为例,其上中下游分别面临着水源涵养、水土保持和污染防治、水沙平衡等治理目标,同一辖区可能兼具多重治理任务,而各流段的治理效果又通过非线性的动态交互反馈影响其他流段。府际关系、经济社会关系、生态关系彼此叠加交织,如何有效识别这种复杂嵌入的网络结构,形成熵减有序的治理体制机制,是学术界和实务界的共同关切。传统的条块分割管理体制已无法适应流域整体性治理的现实需要,流域水资源治理模式亟待更新与变革,而网络治理是一种可观的面向。

现有研究指出,跨界流域水资源治理的空间整体性和问题复杂性产生了网络治理的需要,应以“经济发展和水环境容量协调”为目标构建网络治理模式^[7]。但受限于相关实践样本的缺乏,后来的研究鲜有进一步的深入。而随着2020年长三角“一河三湖”的“联合河长制”、2021年“珠江委+流域片省级河长办”等大流域网络治理模式的建立,及时的现实捕捉成为当前流域网络治理研究的重要突破口。与此同时,“社会-生态”系统理论和超网络理论等复杂性科学前沿成果的适应性引入,也是现阶段推动流域网络治理理论迭代创新的必要之举。

从辩证法的角度来看,网络治理这一新生事物的发展离不开内外部两对矛盾的运动。就流域水资源治理所面临的具体困境而言,对外表现为“流域系统的网络叠加和高依赖性”与“治理结构的传统模式和简单关联”之间的矛盾,对内则表现为“流域问题的复合属性与多重任务”与“治理过程中网络能力和资源运作”之间的矛盾。由此引申出本文的核心问题:当我们把流域水资源治理视为一项复杂系统工程时,从复杂网络结构的视角,如何解构当今中国的治理模式(河长制、

水委协调下的联合河长制等)?以及如何用超网络乃至“社会-生态”系统的思维揭示治理过程的黑箱并进一步优化治理策略?

基于以上考量,本文首先回顾了我国流域水资源治理模式从传统到现代的进阶逻辑,分析了流域治理中引入超网络结构的必要性;其次,将RNAO网络治理结构与“社会-生态”系统理论加以融合,创新提出“RNAO-生态”流域超网络治理模式;最后,结合实例分析了RNAO与“RNAO-生态”在中国流域治理实践中的应用现状,并提出可供参考的政策建议与未来研究的可能议题。

2 传统-网络-超网络:流域水资源治理模式的三维进阶

2.1 传统治理模式的中西经验

从世界流域水资源开发和利用的历史来看,率先迈入工业化进程的西方国家在应对水污染、水冲突的实践中也诞生出更为丰富的治理样本。纵观其百年来的流域治理进程,基本呈现出从最初的“多部门分割管理或单一部门管理”,逐步演变为如今“以某一部门为主导与多部门合作相结合”的治理模式。学术界多使用案例方法对典型的流域治理模式加以介绍和分析,如美国的五大湖流域^[8]、欧洲大陆的多瑙河流域^[9-10]、英国的泰晤士河流域^[11]等。归纳其基本模式,主要包括4个方面:1)从整体上把握流域治理方案,建立综合管理机构,如多瑙河沿岸各国政府共同成立的多瑙河流域管理委员会;2)注重流域水环境与经济发展相协调,如五大湖流域治理中实行排污许可证制度,并根据各地生态特征设定水质目标;3)基于水资源产权界定进行市场化开发,如泰晤士河各流段经营权通过水务局私有化进行上市股票交易;4)鼓励公众参与治理,上述流域普遍设立了水资源管理协调与咨询机构,以防止决策内部化导致的公众意见缺失。综合来看,西方的传统流域治理所采用的是市场化和自组织相结合的运作方式,这种模式的优点在于产权清晰、激励性强,同时可以缓解财政压力;但由产权界定和外部监督所带来的交易成本较高,且存在不小的违约风险。

相比之下,我国的流域水资源治理开展得较晚,管理体制与运行机制设计很大程度受计划经济基础的影响,逐步形成了以“传统层级治理为主,地方府际协作为辅,流域管理与行政区管理相结合”的治理形态。然而,这种政府主导模式的注意力焦点往往在于权力分配而非资源共享,利益保护和信息封锁使多元治理主体之间无法聚合为有机整体,已成为限制区域社会与环境可持续发展的主要阻碍之一。为探寻出路,现有的研究多从协同治理^[12]的视角加以关注,议题涵盖生态补偿^[13]、公众参与^[14]、水污染防治^[15]等。而从更广范围的“流域治理模式”来看,“小流域”综合治理^[16]、“多主体演化博弈”治理^[17-18]、“动态适应双环”治理^[19]、“松散关联式”协作治理^[20]等,则分别从整治关键性生态单元、设计模拟仿真框架、分析复杂性机理、理解主体间非完全合作等角度提出了流域治理中一些可能的模式选择。与此同时,近年来“河长制”的实践创新为省内流域治理提供了有效的新思路,学者们也普遍从政策分析的视野考察其责任机制与协同功能^[21-22],但

对于跨行政边界的流域问题而言,仍待建立适应更高水平生态协同治理的大流域整体方案和组织体系。而协同视角下的组织体系本质上体现为一种府际网络^[23],但现阶段从网络视角分析国内流域治理的研究仍存在较大的发展空间,因此有必要通过回溯相关理论进展,为流域网络治理的系统化转型提供借鉴。

2.2 网络治理模式的结构嬗变

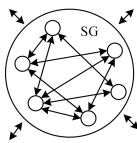
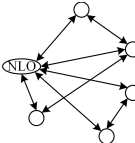
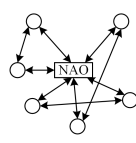
缘起于西方学者对“网络治理(Network Governance)是否比对抗式或管理式治理(Adversarial or Managerial Governance)更为有效的”的发问^[24],近20年的研究已经逐渐证实了网络治理是对搭便车行为的一种补救,是走出集体行动困境的有效工具。网络治理强调对治理形态的研究,这种治理形态是为协调集体行动以实现网络级目标而制定的机制或机构的组合,是一类显著发生但仍未得到充分解释的现象^[25]。相较于传统治理,现有关于网络治理的界定普遍强调多元利益主体之间的多边关系,通过对治理行动中的网络结构阐释和组织架构优化来改善实践过程。下面将对网络治理的主要范式及其演进过程加以回溯,并分析其作为一种一般理论模式针对流域水资源治理具体应用情景的嵌入过程。

2.2.1 初期建构:NAO

在不同的制度条件下,网络不仅会形成不同的结构,也会产生高度不同的结果^[26]。这一黑箱过程^[27]由PROVAN & KENIS总结成3种网络模式^[25],其主要区别见表1特征一栏。当参与者之间缺乏信任且成员规模较大时,他们可能没有动力参与自发的合作(形成Shared Governance, SG)或让某一成员组织牵头协调网络活动(形成Network Lead Organization, NLO)。而一直以来,管理公共自然资源(如流域水资源)是涉及诸多网络参与者且参与者之间经常不信任的政策领域,如果没有适当的监管或合作机制,处于竞争中的行动者不仅会将污染物扩散到邻近地区,还会从邻近地区榨取资源^[28]。在此背景下,授权外部网络代理人是一种解决不信任的方案,也有助于降低合作中的交易成本^[29]。学者们将这种“专门为管理网络及其活动而设立的实体”^[25]或“与网络成员建立联系的独特第三方”^[30]称为NAO(Network Administration Organization)。

表1 网络治理的3种P-K结构

Table 1 Three P-K structures of network governance

名称	共享型治理 SG	网络领导组织 NLO	网络管理组织 NAO
结构			
代理人	无	内部代理人	外部代理人
激励	发展型治理 如:资源开发、经济建设	抑制型治理 如:环境保护、灾害控制	
特征	小规模 高密度信任 高目标一致性 网络能力要求低	中等规模 低密度的集中信任 较低的目标一致性 网络能力要求适中	大规模 受监督的中等信任 较高的目标一致性 网络能力要求高

此外,流域水资源治理作为一种抑制型导向的治理活动,也需要在NAO模式下才能实现网络的有效性。在中国,长期以来“政治锦标赛”的激励考核制度使地方政府之间倾向于就发展型公共事务展开协作,如面向区域的资源开发、经济建设等,这类跨域府际协作只需得到上级政府的批准,从而有机会形成SG或NLO。但随着公共事务绩效可测量性下降及任务复杂度提高,以流域水资源治理为代表的抑制型公共事务往往对应着官员晋升的“弱激励”和府际协作的“低意愿”,需要上级政府(往往是中央政府)派出机构或巡视专员高位推动,借助传统科层的外挂装置进行压力传导,强制地方按照上级要求完成协作治理的目标,此时的网络结构便更倾向于形成NAO。

综合规模、信任、激励与代理人等方面的需要,与其他两种模式相比,在流域水资源治理议题之下,NAO是实现环境网络级目标更为有效的工具^[31]。已有研究表明,NAO的相对优势还体现在协调正式合作^[32]、提供监督^[25]和分配资源^[33]等方面,通常被用于解决复杂的跨辖区问题^[34]。因此,接下来的探讨将基于NAO的变体展开。

2.2.2 本土迭代:LNAO

现有关于NAO的研究均是基于西方传统下的一个基本假设:政府偏好和连任压力推动了地方的政策行动^[35]。但这一假设并不适用于大多数威权政府的发展中国家。在目标一致性方面,中国的流域水资源治理与西方相比存在截然不同的制度环境,流域“上下游、干支流、左右岸”的治理均涉及复杂的政治权责和利益关系,流域内利益相关者被隔离在不同的辖区或部门,权力的非对称性加之经济和资源禀赋的差异,使其难以就同一治理目标达成共识。因此,NAO尚不具备独立存在的空间,应转向更加符合中国国情的流域网络治理结构。

对此, Ma等针对区域水资源共享冲突提供了一种本土化的网络治理类型^[4]: NAO-NLO集成模式。从结构上来看,该模式在NAO的基础上重点强调了网络内部关键行动者(Leader)的节点功能,跳出传统网络模型中有关整体目标一致性的简单二分(高/低),转而考虑目标一致性的分布情况。只要求内外代理人之间(即L和A之间)达成共识,并借助中国特有的行政指令传导机制,就可一定程度上替代传统NAO中对于高目标一致性的整体要求,实现同样的治理优势。该模式亦可称为“领导型NAO”或“含有内部代理人的NAO”,简记为LNAO。例如,在“9+2”泛珠三角区水资源共享平台的建设中,除国家层面发改委和水利部门的外部协调外,广东省在网络内部就扮演了关键行动者的角色:2003年,广东省委书记首次公开提出“泛珠三角经济区”的构想,该构想得到了区域的广泛认同;2014年,首届泛珠三角区域合作行政首长联席会议在广州召开。作为网络内部的一员,广东省在经济、区位和两个“首次”的加持下,巩固了其在网络中的关键地位,凝聚起周边成员的合作共识。

LNAO是基于NAO的一次本土迭代,它融合了NLO的局部特征,形成了双核集权而又彼此约束的网络结构。然而,LNAO对于解释目标导向和委托代理过程中的网络治理仍

存在一定的局限,“乌卡时代”的不确定性对流域水资源治理中更为稳定的网络形态提出了新的要求。

2.2.3 最新成果:RNAO

虽然网络在大多数时候被理解为从组织间偶然的横向相互作用中发展出来的新兴实体^[36],但在中国长久以来“横向不足、纵向有余”的央地关系背景下,治理网络更多地表现为一种“授权网络”。授权网络是目标导向网络集合中的一个子群,其生成是由预设的目标所驱动的^[33]。授权网络在公共部门中十分常见,通常是指立法部门、行政上级或缔约方通过建立一个成员必须参与的法定网络,迫使其他行为者进行协调和合作^[31,37-38]。在中国的绩效高压下,地方政府间不断进行竞争和博弈^[39]，“自上而下”的制度评价所发挥的作用远高于“自下而上”的公民监督^[40],且这一现象在水污染治理方面得到了充分的证实^[41]。无论是NAO还是LNAO,已有研究更多地关注影响自发网络形成中个体选择的因素演变(信任密度、对网络级能力的需求、目标、规模),而一定程度上忽视了另一种基于强制性和事前目标规划的授权网络。

在授权网络中,专门负责协调和促进网络成员间合作的机构被称为授权型NAO(Mandated Network Administration Organization, MNAO)。MNAO自身也有其治理机构,该机构通常以会议、董事会、委员会的形式决定包含MNAO在内的网络集体的决策事项^[32]。由于授权网络的其他成员修改网络规则的能力有限,其退出或选择合作伙伴的可能性受到控制^[42-44],因此也被称为“受控型NAO”(Restricted Network Administration Organization, RNAO)^[45]。Wang等将RNAO与NAO的区别总结为网络形成过程、网络权力分配、网络进出权限、其他参与者角色4个主要方面(见表2)^[45]。

表2 两种网络治理结构的对比:NAO和RNAO

Table 2 Comparison of two network governance structures: NAO and RNAO

	NAO	RNAO
形成过程	基于强关系或合同协议	基于上级权威直接授权
权力分配	基于网络协议的谈判和约束,由NAO和其他网络参与者共享决策权	集中决策的权力和网络成员的沟通很大程度上集中和受控于RNAO
进出权限	受制于合同或协议	受制于RNAO行政规定
其他成员角色	基于网络协议,参与网络政策制定和执行	参与网络政策制定但不对其负责;任务是政策执行
举例	西方官僚网络	中国政府主导的官僚网络

注:基于文献^[45]内容修改。

最新研究发现,RNAO可以通过增强地方政府网络分配资金的能力,大幅改善环境绩效^[46]。举例来说,2021年之后的流域珠江水利委员会便是RNAO在流域水资源治理方面的一个典型。2021年9月,“珠江委+流域片省级河长办”协作机制成立,成员包括云、贵、桂、粤、湘、赣、闽、琼8省(自治区)的省级河长办,旨在搭建珠江流域跨区域议事协商平台,凝聚形成“流域统筹、区域协同、部门联动”的河湖管理保护格局,每年将以年度例会、专题会议、信息共享、联合巡河、联合执法等形式开展工作。相比之下,2021年之前的珠江委仅为形式上的NAO;受条块分割的影响,省级以下水利部门既要在业务上接受上级水利部门的领导,又要在财政上服从本地政府的分配。虽然这一现象在2016年深化行政体制改革之后有所改善(来自本地政府的影响显著减弱),但在河长制完成基层责任整合到“党政一把手”之前,珠江委在协调流域内其他执行主体(水利部门)的行动上仍旧“心有余而力不足”。

本质上来说,无论是LNAO还是RNAO,都是在西方网络治理研究基础上对中国情境下具体NAO形态的进一步建构与解读。其主要差异对比归纳如表3所列。

表3 NAO、LNAO与RNAO的差异对比

Table 3 Differences between NAO, LNAO and RNAO

	NAO	LNAO	RNAO
网络类型		自发网络	授权网络
形成期		事后协议	事前规划
成员关联来源		外部性问题 社会资本	外部性问题 委托代理
关系演化要素	信任密度中等	信任密度中等	合法性高
	成员规模大	成员规模大	利益冲突可调和
	网络能力强	网络能力强	价值观一致
	网络整体目标一致性高	内外部代理人目标一致性高	权力强制性高
提出者	PROVAN & KENIS ^[25]	Ma等 ^[4]	SAZ-CARRANZA等 ^[32] WANG等 ^[45]
提出时间	2008	2010	2016(MNAO) 2019(RNAO)
案例	Nexia International公司 领导下的全球会计网络	“9+2”泛珠三角区域 水资源共享平台	“珠江委+流域片省级河长办”协作机制

图1则从3个维度进一步分析了从NAO到LNAO再到RNAO的中国化演进逻辑。首先,从自发性到强制性。随着NAO所处的初始网络环境(政治制度)发生改变,网络成员之间依赖性的形成从“以社会资本为核心的信任契约关系”走向“以委托代理为核心的权力控制体系”。其次,从同质性到异质性。成员的进出权限从“多方谈判的利益妥协”走向“高位决定的势能约束”。由于达成妥协和签订契约更容易发生在同质性个体之间,因此相较于NAO, RNAO模式的一个目标

抑或优势就在于,通过对成员进出权限加以控制,削弱基于已有关系资本的惯性式合作,从而提升网络整体的异质性和在异质交流中实现创新的可能。最后,从无序性到有序性。在传统NAO模式下,自组织的外部协调会在多方博弈中产生高昂的交易成本。相比之下,内部关键行动者的出现(LNAO)和权力的党政系统控制整合(RNAO)则可以极大降低因协调而产生的交易成本,事前规划成为可能,也让网络治理的集体行动迈向有序。

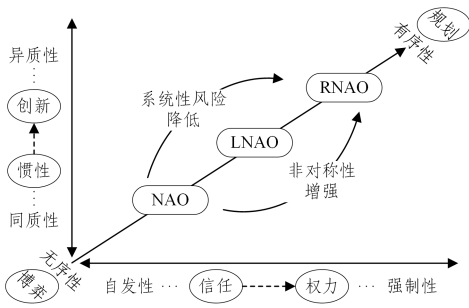


图1 从NAO到LNAO再到RNAO的演进逻辑

Fig. 1 Evolution logic from NAO to LNAO and RNAO

2.3 超网络治理模式引入的必要性

当流域中行动者的治理活动与该活动在生态系统层面上产生的任何环境结果相关联时,就可认为二者之间形成了一种更为紧密的反馈链^[47]。这种在与生态规模相适应的组织层次上有效利用制度的能力被称为“规模匹配”(Scale-Matching)^[48]或“制度适合”(Institutional Fit)^[49];在经济学视域下,也被称为“生态外部性的内在化”^[50];在复杂治理系统的研究中,则表现为以“生物物理联系”(Biophysical Linkages)^[51-52]为特征的“社会-生态”系统(Social-Ecological System),用于研究生态系统和社会系统在不同的时空尺度上如何以复杂和动态的方式相互作用,形成交互联系^[53-55]。真正意义上的流域治理模式创新,不应止步于RNAO本身的构建,因为这一网络结构仅关注到组织行动者之间的社会联系,更进一步的方向应是借助“社会-生态”系统的思维将RNAO同流域生态层的自然系统自适应地结合起来,探究各子系统之间的复杂交互机理以实现流域问题外部性的内在化,并最终建立起以“RNAO-生态”连通系统为核心的治理模式。

21世纪以来,越来越多的研究者受到网络思想的影响,开始运用网络分析的方法对“社会-生态”系统的结构进行探索^[56-57]。从形态上来看,“RNAO-生态”连通系统实际上是一个多层耦合的超网络结构。所谓超网络结构(Network of Network),直观而言就是网络的网络,是包含性质各异的多层节点与多重关系的复杂网络系统,具有多层性、多重性和嵌套性,能够描述各种网络之间的相互作用和影响,揭示同构网络多重关系和异构网络交互关系^[58]。超网络理论是在复杂网络分析热潮之后的又一次延伸,自Wang等提出一种进化超网络模型以来^[59],学者们在物理学、生物学、管理学、传播学等诸多领域展开了具体应用,很多难以解释的经典问题在此找到了更深刻的答案。超网络的分析一般分为两种:基于网络的超网络和基于超图的超网络。前者聚焦现实世界网络的多层、多级、多维网络流复杂特性,适合对多层次网络进行建模;后者以超图理论为基础,借助超图可以清晰表示每一条超边中的多个节点以及超边之间的相互关系。基于流域问题的具体属性和社会生态依赖关系,下面将建构流域水资源治理的超网络结构。

3 “RNAO-生态”超网络治理的三层结构与互动机理

基于宏观视野,流域水资源治理中的超网络建构主要

包含治理网络和生态网络,分别对应治理过程和作用对象。其中,流域生态网络是一个自成体系的完整自然系统,具有自组织、自调节、自生长的能力^[60],是流域超网络结构形成的基础;而治理网络以组织为中心,通过市场机制、科层制度、网络结构的相互作用,运用经济政策、行政手段、法律规范等干预措施,努力实现人与流域自然系统之间物质、能量交换的健康良性可持续循环。基于中观视角,治理过程又有治理主体(组织)和治理行为之分,二者共同构成了连续性的治理网络。从而,“社会-生态”系统在流域水资源治理网络中具体表现为顶层组织网、中层行为网、底层生态网三层网络之间的集成互动,其立体分析框架如图2所示。下面将就各子网内外部元素交互的微观机理展开分析。

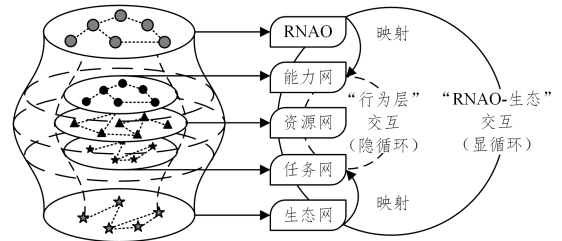


图2 “RNAO-生态”超网络治理结构的分析框架

Fig. 2 Analysis framework of the governance structure of “RNAO-ecology” hypernetwork

3.1 RNAO为核心的顶层组织网

在中国,不只是流域治理,大多数重大和紧急的环境问题(如污染控制、自然资源保护等)都存在RNAO生成和发展的制度土壤和内生驱力。解决这类环境问题,除了必要的综合技术手段外,更重要的是处理利益相关者的权责关系,实现相互间有效的供需对接。利益相关者通常以组织的形式存在,在场域、策略和结构上各有侧重。

3.1.1 双重嵌套

考虑到流域整体在我国已不可避免地划分为属地治理单元和跨域治理单元两类,RNAO自身的建构也相应地要求形成嵌套结构,分别处理不同的关系。

在属地治理单元内,公私合作关系是主要关系。RNAO要求地方环境合作网络中政府始终居于主导地位,而谋求自然资源供给和污染排放权的工厂企业、为环境改善提供知识技术的科研机构,以及宣传环保价值和组织社会力量的环境NGO等各种组织,它们在网络中的作用主要是通过提升异质性,加快知识、能量、物质的扩散,从而为解决环境治理的“老问题”找到有效的“新方案”。而之所以需要政府主导,从合作生成的动力学本质来讲,是因为相较于同质性合作网络,高异质性环境合作网络在没有外部力量的作用下是难以建立的,但后者凭借异质扩散,强化了学习和创新的行为,往往具备更强的问题解决能力。例如,2022年2月广东省召开河湖长制暨水利工作会议,不仅包含水利部珠江水利委员会、省政务服务数据管理局、省全面推进河长制工作领导小组成员单位、各地级以上市河流主管,还包括广东省粤海集团、广东省建工集团、数字广东网络建设有限公司、广东省水利电力规划勘测设计研究院公司等利益相关的市场主体。这种河湖制的定期

汇报和听证会制度,为公私关系连接提供了稳定的平台。

在跨域治理单元中,府际合作关系是主要关系。RNAO 致力于流域大政府的形成,利用自上而下的科层结构保证行政指令快速传输的同时,更多地利用上级权威独有的纵向政治整合力量实现横向同级政府间有效的协调。在这方面,中央近些年出台了诸多文件,如 2018 年《中共中央关于深化党和国家机构改革的决定》和《深化党和国家机构改革方案》已经明确将国土、水利、农业、海洋等部门的涉水职责划转给生态环境部,2020 年《关于构建现代环境治理体系的指导意见》也明确提出“推动跨区域跨流域污染防治联防联控”,党的十九届五中全会更是进一步指出“建立地上地下、陆海统筹的生态环境治理制度”。这些文件的出台在很大程度上表明 RNAO 跨域网络治理转向与中央对于构建现代化治理体系的思想内核高度一致。

3.1.2 协调策略

通常来说,环境治理的集体行动可以分为协调与合作两种策略^[61-62],RNAO 同样面临着主导策略的选择问题。协调策略所描述的情境是所有或大多数行动者的诉求大致相同,即网络的总体目标为大部分行动者所认可,但实现目标更多的是以有效的方式协调行动者的“不同活动”^[63],例如通过环境 NGO 协调志愿者们的自发环保活动,将个人的环保行为凝聚成集体的有序分工,从而实现 $1+1>2$ 的效果;而合作策略对应的情境是行动者表现出“不同的意见和利益”,解决问题必然涉及谈判和博弈,以达成合作的共同协议,即每个行动者的主导战略是搭便车。例如在一个环境改善工程中,承建公司、设计团队、环保部门、审计部门等均存在自己的利益诉求,需要通过签订合同来实现彼此供需关系的对接。此外,协调和合作策略分别对应着低风险和高风险^[62]。

表 4 展示了这种区别。考虑到中国是一个低信任水平社会,官员对于抑制型公共事务的态度也偏向于低风险的保守策略,加之“集中力量办大事”的政策价值导向,协调是更适合流域治理的集体行动方案。

表 4 环境治理中的两种集体行动策略

Table 4 Two collective action strategies in environmental governance

策略	协调	合作
集体行动情境	行动者目标基本一致,但从事的活动无序	行动者意见和利益差异大,需要开展谈判
风险	低风险	高风险
适合的 网络结构	中心度高、密度低	中心度低、密度高
信任	对核心行动者信任度高,同级别行动者之间缺乏信任	行动者之间信任度高
环境偏好	中国	西方

3.1.3 开放三元

从结构视角出发,不同集体行动策略的网络有效性也对其各自的微观结构提出了要求。已有的实证研究认为^[63],

连贯且密集的网络结构更适合解决高风险的合作问题,而集中且稀疏的网络结构则更适合解决低风险的协调问题。具体而言,一个有利于解决合作问题的网络的特点是行动者倾向于对新的网络关系做出反馈,以形成“封闭三元结构”(即朋友的两个朋友也将是朋友,见图 3(a))。由此形成的密集结构有助于施加遵守规则的社会压力,并建立相互信任,从而使网络具有连贯性,对应自发网络中的初始 NAO。而一个有利于解决协调问题的网络的特点则是更开放的结构(即朋友的两个朋友未必也是朋友,见图 3(b))。相较于其他行动者,该网络中的某些主体将占据更中心的位置,继而使整体表现出集中且稀疏的特征。这种网络结构无需参与者投入大量资源来维系相对较多的社会联系,只需保持其对于网络中心行动者较高的信任,从而可以降低总体的交易成本并促进组织间协调,对应授权网络中的 RNAO。由上所述,在我国,以协调为核心策略、以 RNAO 为基本范式的流域水资源网络治理模式,应当以行动者“开放三元”为微观组件,构建稀疏而集中的聚合体,激励新成员、新知识、新资源的持续涌入,从而保证协调策略的有效实施。

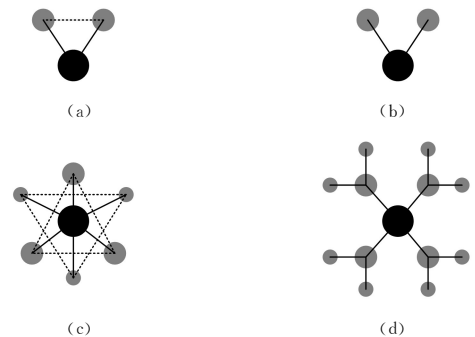


图 3 环境治理中的两种网络结构

Fig. 3 Two network structures in environmental governance

3.2 “能力-资源-任务”动态匹配的中层行为网

治理主体、治理资源、治理对象 3 类实体因流域治理的动态过程而在各子网内部与子网之间产生关联。这一关联机制具体可分为“层内要素互动”与“层间要素流动”两个递进的环节。

3.2.1 层内要素互动

流域治理主体既包括属地内的涉水管理机构,也包括跨域的协调机构,还包括企业、科研机构、NGO 等经济和社会团体,其本质是各种专业化功能导向的“网络能力”载体,是以 RNAO 为核心的顶层组织网在行为层的投影。由于单一组织并不具备处理跨域问题所需的全部能力,因此需要组织以关系网络为桥梁实现能力的共享与组合。从而,以参与流域治理事项的行动者为节点,以能力在行动者间的桥梁式转化为纽带,形成“能力”的子网 G_c 。

流域治理对象涉及流域生态环境中的多种要素,除本文讨论的水资源要素以外,现实中的流域治理问题还包括与径流水存在高度关联的植被缩减、地下水水位下降、沙尘暴侵袭、湖泊枯竭等生态退化现象。尽管这些次生问题根源于人类对水资源的不合理开发与分配,但实际治理时往往需要“标本

兼治”,将治理目标分解为任务序列,各任务之间是迭代关系。相同的流域治理任务(如污染控制、水土保持)通常在资源使用和 能力匹配方面具有一定的相似性。从而,以水资源所处的地理单位为节点,以任务在治理单元上的连续性实施为纽带,形成“任务”子网 G_T 。

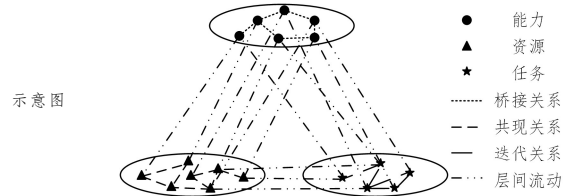
流域治理资源总体上包括一般资源和关系资源两类,前者表现为实体资源(如资金、设施、人才)和无形资源(如技术专利、声誉、特许权),后者则是基于已有合作网络形成的社会资本。两种资源的调用对网络能力的类型分布提出了不同的要求,前者强调网络执行能力(Network Implementation Capacity, NIC),后者则更多地运用网络构建能力(Network Build Capacity, NBC)^[64]。从而,以传输和转化中的资源类别为粒度,以资源在能力作用下的匹配式流动和在任务要求下的叠加态支持为纽带,形成“资源”子网 G_R 。

总体而言,“能力”“资源”“任务”3 层子网存在着如表 5 所列的内部要素关联,连边表示要素互动的层内形态,每一次行动事件构成一条超边,同时涉及 3 种类别的层内要素流动,而不同层的要素之间具体如何流动,则需要进一步讨论其层间的映射方向与映射关系。

表 5 行为层子网构成与子网内部要素互动

Table 5 Subnet composition of the behavior layer and the interaction of elements within each subnet

子网	符号	节点	连边	属性
能力网	G_C	参与治理任务的行动者	能力在行动者间的桥梁式转化	桥接关系
资源网	G_R	传输和转化的资源类别	资源在能力作用下的匹配式流动和在任务要求下的叠加态支持	共现关系
任务网	G_T	水资源所处的地理单元	任务在治理单元上的连续性实施	迭代关系



3.2.2 层间要素流动

表 6 列出了行为层两两子网之间的映射方向、映射关系、来源、内涵以及超图理论下的符号表示。

表 6 行为层层间要素流动与超图系统

Table 6 Inter-layer element flow and hypergraph system of behavior layers

子网	映射方向	关系	来源	内涵	集合形式	超边
能力网 & 资源网	能力 $C \rightarrow$ 资源 R	占有关系/利用关系	组织基于网络能力对禀赋资源的持续占有和对其他组织资源的利用	由某一治理主体的网络能力 C_i 占有或提供流域治理所需的特定网络资源 R_j	$C(R_j) = (C_i, R_j)$ $(i, j = 1, 2, \dots, n)$	$E_{C-R} = C(R_j)$
能力网 & 任务网	能力 $C \rightarrow$ 任务 T	服从关系	自上而下的协调分工(基于纵向压力传导和集体性收益需要)	某一治理主体依靠能力 C_i 完成某项被分配的治理任务 T_j	$C(T_j) = (C_i, T_j)$ $(i, j = 1, 2, \dots, n)$	$E_{C-T} = C(T_j) + T(C_j)$
	任务 $T \rightarrow$ 能力 C	依赖关系	自下而上的主动合作(基于横向自组织动机和选择性收益需要)	某一治理任务 T_j 依赖于某一治理主体基于能力 C_j 的主动作为并贡献于集体行动之中	$T(C_j) = (T_j, C_j)$ $(i, j = 1, 2, \dots, n)$	
任务网 & 资源网	任务 $T \rightarrow$ 资源 R	依赖关系	任务对资源的天然需要	完成某项任务 T_j 需要匹配特定资源 R_j	$T(R_j) = (T_j, R_j)$ $(i, j = 1, 2, \dots, n)$	$E_{T-R} = T(R_j)$

超图系统: $CRT = \{N, SE\}$
 $N = \{G_C, G_T, G_R\}$ 为流域治理体系中子网络的集合
 $SE = \{E_{C-R}, E_{C-T}, E_{T-R}\}$ 为流域治理体系中超边的集合

层间要素流动与层内要素互动之间的主要差异在于,前者是有向网络,后者是无向网络。有向网络相比无向网络增加了连接的方向信息。有向网络的出入度分布,有助于反映各要素之间的因果联系和特异现象,从而揭示流域治理中出现的问题。

整体观之,中层行为网各子网之间的要素流动关系可归纳为图 4。基于前文的分析,流域水资源治理作为一种高负外部性的抑制型导向的治理问题,自下而上的主动合作很难实现,因此“任务 \rightarrow 能力”的依赖关系只是次要的存在,两子网间要素的主要流动方向仍然在于基于 RNAO 强制性压力传导的“能力 \rightarrow 任务”服从关系。根据行为网的运作过程,治理者要看到治理行动中涉及的多重元素之间的互动与流动关系,坚持“刺激-反应”的适应性原则,不断提升成员对不同资源情境、不同任务情境下的动态决策能力。

智能、一体化调度、远程自控等高新技术,当地公司自主研发出闸泵厂群智能调度关键技术,实现沱江流域水量、水质、生态全面立体感知与厂、闸、池等全要素调控;通过将智慧水务平台与智慧蓉城运管平台对接、共融,实现“数据共享、资源整合、任务调配”;通过建设沱江流域中上游水情调度中心,不断优化分析模型,实现监测、预警、调度和辅助决策全过程的数字流域建设,取得了显著成效。

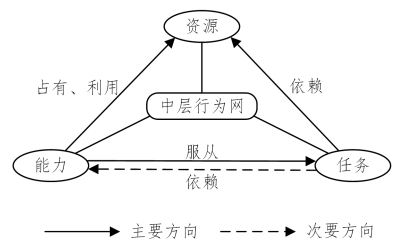


图 4 流域治理的超网络模型建构过程

Fig. 4 Construction process of hypernetwork model of watershed governance

就其应用来看,各子网要素高效互动的关键在于人的创新能动意识和数字技术手段的有机融合。对此,成都市沱江流域的智慧治水模式值得借鉴。基于物联网、大数据、人工

3.3 “社会-生态”规模匹配的底层生态网

“社会-生态”系统研究的核心在于“社会-生态”匹配^[65],包括横向匹配,即社会和生态连通性的对齐(如河流的上下游生态关联、渔民在同一片水域的人际关系),以及纵向匹配,即行动者与生态资源之间连通性的对齐(如渔民在不同水域捕鱼的对对应关系)^[61,66]。而“社会-生态”网络分析是“社会-生态”系统研究的常用工具^[67]。通过调查社会生态连通性的横向与纵向对齐情况,给出调整建议并预估调整后的效果是该领域研究的一般分析思路。生态系统由跨越地理和时间尺度的相互依赖成分组成,但通常与各种人为治理结构不一致^[68]。这种错配一般分为:空间尺度错配、时间尺度错配与功能错配。这里重点讨论流域水资源治理的空间错配问题,即相互依赖的流域生态组件分别由不同行动者属地管理时,由于欠缺空间协调而出现的生态恶化和社会总体福利下降的现象。

图5给出了“社会-生态”系统的一个最小单元^[61]。其中,灰色节点代表管理者,白色节点代表环境单元或地理范围,而黑色节点代表协调者,黑色实线代表跨界治理中各生态组成部分的联系或行动者之间通过人员、信息、能源、资本的流动而进行的交流或合作。由于大多数公共池塘资源的使用具有高竞争性和非排他性,从而形成规模不匹配(见图5中A),具体表现为生态资源在管理者利益最大化的目标下被过度开采。为了弥合这种负外部性,通常有两种方案:1)水平拟合(见图5中B),即通过同层级管理者合作实现“社会-生态”连通,容易形成SG或NLO的治理模式;2)垂直拟合(见图5中C),即通过跨层级协调者的行动实现“社会-生态”连通,容易形成NAO的治理模式。事实上,在水资源治理方面,已有研究通过考察“社会-生态”建构模块数量的多少,证实了行动者倾向于参与通过第三方促进协调的网络结构。由此判断,跨层级协调(见图5中C)比同层级合作(见图5中B)的网络结构更能满足流域治理的实践需要^[69]。

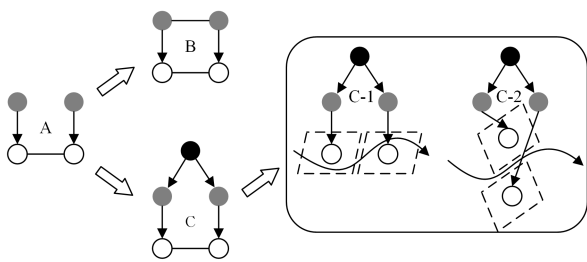


图5 流域水资源“RNAO-生态”规模匹配演变

Fig. 5 Evolution of the “RNAO-ecology” scale-matching of water resources in watershed

考察流域生态层的现实情况,根据河流流道与辖区边界之间的位置关系(相交或重叠),又可进一步区分针对流域水资源治理的规模匹配方式(见图5中C-1和C-2)。其中,菱形虚框代表相邻辖区行政边界,曲线代表河流流道,箭头代表流向,白色节点在C-1中表示具有“上下游关系”的流域单元,在C-2中则表示具有“左右岸关系”的流域单元,而具有“干支流关系”或“与辖区边界部分重叠或部分相交关系”的流域单元则是基于前两种规模匹配关系的线性叠加。当河流流道与辖区边界重叠时(见图5中C-2,如陕西和山西以黄河为界,四川和云南以金沙江为界),两辖区之间更多地表现为类似

“囚徒困境”的非零和博弈。尽管两岸协同治理可以带来更长远收益,但任何一方的先行治理都意味着更高的机会成本,因此“搭便车”策略是更为理性的选择。相比之下,图5中C-1的情况更为普遍。当河流穿越行政区时,除位于河流发源地和入海口的行政区外,其余行政区既是上游污染的承担者又是下游污染的制造者。其特殊性表现在3个方面,一是时滞性较长,二是扩散面更广,三是博弈对象不同。尽管我国跨省级行政区的河长制协同机制已经有所萌芽,也有研究表明河长制通过RNAO的跨层级协调在一定程度上破解了集体行动困境^[70],但仍需强调这种“社会-生态”的规模匹配是极为复杂的。不仅需要把握河流与区划的边界交织关系,还需加强对灌溉农业区、工业用水区、植被覆盖区、沙漠区、水库大坝、地下水开采区等关键性流域单元的识别,以最终形成“水岸共治、序流联动、干支协同”的流域治理理想状态。

4 “RNAO”的流域实践与“RNAO-生态”的应用实例

前文重点从理论方面探讨了两个递进的层次:其一解读NAO这一网络模式如何在中国发展为RANO,其二是将网络治理理论与“社会-生态”系统理论和超网络建模方法加以融合,提出“RNAO-生态”规模匹配的分析框架。针对这两个方面,下文将结合实例阐释我国流域水资源治理中“RNAO”的具体实践以及“RNAO-生态”的当前应用阶段。

4.1 从“河长制”到“联合河长制”:RNAO的二阶整合

“河长制”(River Chief System),也指河(湖)长制,是近年来我国政府在流域水资源治理方面引入RNAO网络治理工具的典型尝试。所谓“河长制”,指由地方各级党政负责人担任本行政辖区内河流湖泊的“河长”,作为辖区治水的第一责任人,分级分段承担责任,并成立河长办公室,联动整合各职能单位,统筹规划水治理的一项创新制度^[71]。其起源于2007年江苏省无锡市在太湖蓝藻暴发事件中协调县区政府共同控制水污染的治理模式,因成效显著,引起地方和中央的关注。随着十八大提出“把生态文明建设放在突出位置”,中央有关部门认为有必要在全国推广河长制。2016年12月,中央全面深化改革领导小组通过《关于全面推行河长制的意见》,各级政府迅速行动实施。截至2018年6月底,全国31个省(自治区、直辖市)全面建立了河长制。同年10月,水利部印发了《关于推动河长制从“有名”到“有实”的实施意见》,要求各级河长按照“山水林田湖草”系统治理的总体思路,加强流域内沟通协调、区域联防联控、部门沟通协作,从全面建立到全面见效,河长制自此进入快车道的发展进程。

从网络治理的角度来看,河长办公室作为河长制下RNAO的实体单元,经上级政府授权负责协调其下属辖区对跨界河流的管理。河长体系分为两部分,一是区域河长,即在省、市、县、乡设立总河长;二是河湖分级分段河长,即各省(自治区、直辖市)行政区域内主要河湖设立河长,由省级负责同志任职,各河湖所在市、县、乡均分级分段设立河长,由同级负责同志任职。之所以说河长制符合RNAO,关键有以下几点。1)首先,河长制虽然诞生于地方水污染治理的实践,但作为一项全国性制度的推广,其是一种目标导向的事前主动规划,是基于授权网络自上而下的权力安排,而非自发协议,

因此不是初始的 NAO。2)其次,河长制虽然是央地之间“委托-代理”关系的产物,但并不存在内外部代理人之分,从部门关系来看,各辖区河长制的年度目标任务要求逐一分解落实到部门,由河长办公室统一做好组织、协调、分办、督办工作,因而所有河长均位于原有网络成员(涉水职能部门)的外部,并非 LNAO 的共同代理模式。3)此外,河长制在策略、场域和结构方面的侧重也均符合 RNAO 特质。其一,河长的工作重点并非具体政策的实施,而在于跨区域、跨部门的“协调策略”;其二,下级辖区的河长需要服从上级辖区河长和流域管理机构的安排,在跨界河流的管理上形成“嵌套结构”;其三,河长的问责和激励均来自上级而非地方,条块分割的打破要求权力和信任只需向上级河长集中,从而实现“开放三元”的微观机理。4)最后,河长制尤为重视流域治理主体异质性的提升,一方面邀请外部专家参与治水政策的设计^[72],另一方面也通过开辟公众对污染源情况的信息上传通道来加强公众参与^[73]。

河长制的核心网络级目标在于跨行政区河流的水资源治理,然而由于河长的纵向协同仅触及省级内部流域的府际协作,对于跨省治理单元而言,还需要更高位的 RNAO 加以协调。我国的流域管理机构设立于新中国成立初期,由水利部派出的七大流域水利委员会(简称“水委”,含一个流域管理局)组成,《水利部职能配置、内设机构和人员编制方案》规定了其核心职责在于“跨行政区的流域综合规划与监督、协同各级政府治理方案的实施”。然而,从实际效果来看,由于属地管理的碎片化,跨区域水资源治理仍然难以摆脱“公地的悲剧”。而河长制的诞生实则成为流域管理机构发挥实效带来了转机:通过将辖区内水务责任整合到党政负责人(一阶整合),“对冲”了抑制型目标带来的弱激励问题,从而为高位 RNAO 有效实现联合河长制(二阶整合)奠定了底层动力基础。

以太浦河“联合河长制”为例。2020年9月30日,《长三角生态绿色一体化发展示范区重点跨界水体联保专项方案》出台,该方案由水利部太湖流域管理局牵头,生态环境部太湖流域东海海域生态环境监督管理局、长三角生态绿色一体化发展示范区执委会以及上海市、江苏省、浙江省一市两省的生态环境厅(局)、水务(水利)局(厅)在内的九部门联合制定。《方案》提出,在目前“太湖淀山湖湖长协商协作机制”的基础上,先行创设“一河三湖”的“联合河长制”,实现跨省级区域的日常管理、联合巡河、会商协作。例如:嘉善县在联动保洁方面,与上海青浦区及苏州吴江区优化作业范围,定期开展会商;在联合执法方面,加入“一湖两河”巡查,与上海、江苏进行省界水利执法部门联动;在队伍联建方面,以联组学习为平台,成立长三角“水滴”志愿护河突击队,推动流域治理。

总体而言,从“河长制”到“联合河长制”可由图6加以表示。前者的作用发挥保留了较多地方治理的科层色彩,尽管通过高一层级的 RNAO 行政权力可以实现跨区域、跨部门的连通,以及府际关系与公私关系的并重,但由于地方治理的最高层级仅到省,而大河多跨省而行,因此仍无法解决更加广域的外部性问题;而后者实质上突破了相对独立的地方科层体系在河长制中对治理效率的约束,通过在央地之间设置水委,并依托水委建立起行政边界与隔离单元间的沟通机制,增强了流域整体的资源调配能力。整个过程最终实现了 RNAO 对碎片化权威的二阶整合。

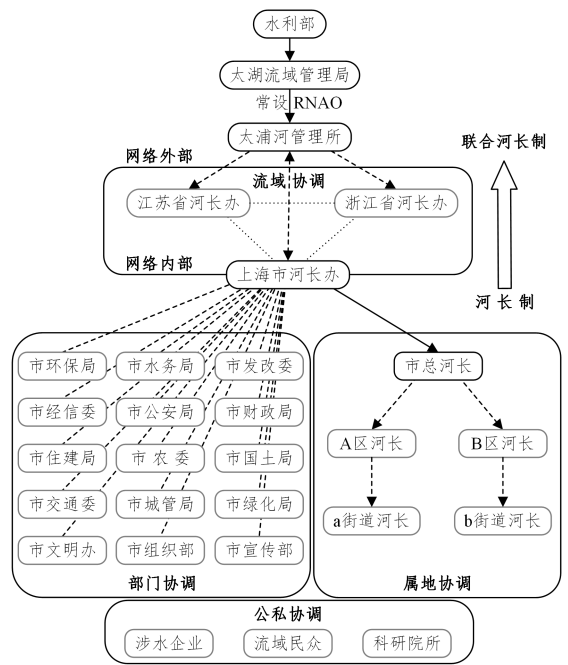


图6 从“河长制”到“联合河长制”

Fig. 6 From “river chief system” to “united river chief system”

4.2 “RNAO-生态”规模匹配:以黑河流域水资源治理为例

黑河流域是中国西北干旱地区第二大内陆河流域,位于河西走廊中部,总面积约14.29万平方公里。河流发源于冰雪覆盖的祁连山,后流经甘肃省和内蒙古自治区,最终向北消失在戈壁沙漠的东居延海。黑河的上中下游被莺落峡和正义峡所分开,中下游均以灌溉农业为主要生产方式。在过去三十年,黑河流域经历了农业扩张、生态退化和引水工程等一系列事件,这些变化为我们纵向观察其治理演化提供了丰富的素材。图7绘制了黑河流域整体的“社会-生态”连通关系。

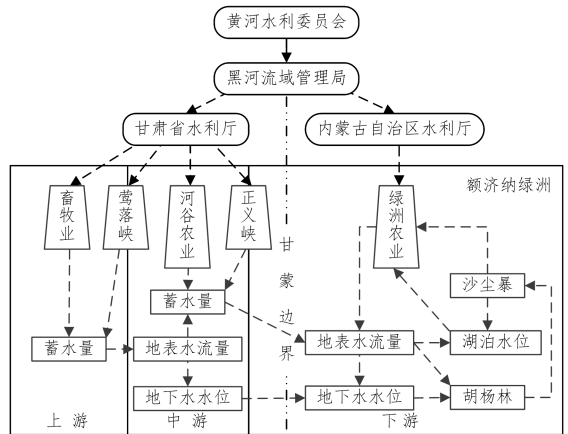


图7 黑河流域“RNAO-生态”规模匹配

Fig. 7 “RNAO-ecology” scale-matching in the Heihe river watershed

黑河的中下游分别位于甘肃省和内蒙古自治区。起初,两个行政区以自身利益最大化为目标,管理着黑河流域的两大单元,从未将流域视为统一的整体,这种对抗式的管理结构成为后来流域“社会-生态”失调的主要原因。长期以来,中游地区是重要的产粮区。然而,随着科技进步、经济发展和人口增加,耕地面积不断扩张。从1990年到2000年,中游地区的农田面积增加了686平方公里(13.9%)^[74]。由于该地区

缺少降水,这种扩张主要针对灌溉的河谷农业,而抽水的直接影响是流经正义峡的水量大幅减少。尽管自20世纪70年代以来,受气候影响,莺落峡的进水量呈上升趋势^[75],但从1970年到2000年,正义峡上游的进水量从71%下降到47%^[74],随之而来的下游流量减少导致了东居延海的干涸以及胡杨林的枯败。这些胡杨林本该成为下游地下水灌溉的绿洲,但由于植被覆盖率的严重下降,其已成为周边腾格里和巴丹吉林两大沙漠的主要侵袭地^[76]。黑河流域生态网络的横向连通,因为社会层面的不匹配(见图5中A)而走向崩溃。

为扭转这一局面,1999年1月,中央批复同意成立水利部黄河水利委员会黑河流域管理局。该管理局负责在甘肃省和内蒙古自治区的涉水管理机构之间建立起跨层级的联系,成为流域整体的协调者(见图5中C-1)。2000年6月,黄委成立《黑河水资源问题及其对策》研究工作领导小组;8月21日,黑河历史上第一次干流省际调水指令发出;10月3日,断流多年的下游额济纳旗河段恢复过流。调水项目启动后,2000年至2010年,正义峡的年均径流量占莺落峡的百分比与1990年至2000年期间相比增加了10%^[74]。2002年,东居延海重新出现,并于2005年历史性地实现全年不干涸。流域下游的胡杨林日渐恢复,能够抵御沙尘暴的侵袭,额旗纳绿洲也因此再现繁荣。这些变化足以说明,作为RNAO的黑河流域管理局,基于自上而下的权威,通过平衡两省之间的用水权益,促进了流域整体的有效协调并遏制了生态退化。

但与此同时,以中游地下水位下降为代表的一些隐性问题也悄然发生。黑河流域作为一个多含水层系统,地表水和地下水之间有许多相互作用。生态水资源调配项目固然带来了下游耕地、经济和人口的扩张,但中游地区灌溉农业为维持基本的用水所需,只能转而增加地下水的开采,其结果就是中流抽取的地下水增加量几乎等同于分配给下游的径流增加量^[74]。最终,生态水资源调配工程带来了中游地下水的超采和下游用水量的扩张,长此以往无法实现可持续发展。

黑河流域的水资源分配悖论呼唤“RNAO-生态”治理模式的进一步变革。结合3.3节末尾的分析,考虑规模匹配的复杂机理,流域RNAO的网络级目标也应从协调水资源在上下游各成员间的有序利用,到加强重点流域生态单元的治理,而地处黑河中游的张掖市便是构成“RNAO-生态”连通的关键节点。据官方统计,张掖市集中了黑河流域92%的人口、83%的国民经济用水量 and 76%的耗水量,张掖段的过量用水是黑河下游长期断流、调水后中游地下水位下降的主要原因。为破解僵局,2001年,水利部正式将张掖市确定为我国第一个节水型社会试点地区。在张掖市水务局(RNAO)的协调下,各区县建立了以水权制度为核心的水资源管理体系,每家农户都有一本水权证,农民可以清楚地从水权证上了解每户每年可使用的水资源量。水票作为水权的载体,经税务部门兑换后,农民就有了实际用水的依据。对用不完的水票,农民可通过水市场进行出卖,从而完成水权交易。水权制度改革大大激发了农民的水资源商品观念和农田管理意识。以此为契机,张掖市加快打造节水型经济模式,构筑与水资源承载力相适应的产业结构体系。如今,黑河中下游地下水位已明显回升。在“十六字”治水方针和河长制的协力配合下,一条属于黑河的“RNAO-生态”治理之路再难“断流”。

5 总结与展望

如果说传统的流域治理模式运用的是“自上而下、层层分解”的韦伯式线性思维,目的在于寻求确定性因果关系以期降低问题的复杂性,那么本文所建构的“RNAO-生态”超网络复杂结构的治理模式则反其道而行之,高度重视流域治理中的问题依赖关系、政策干预的非线性反馈效应和个体的自主性风险,重点提升成员对不同资源情境、不同任务情境下的网络能力,最终与流域生态建立自适应的系统关联机制,从而实现“社会-生态”的规模匹配和与之相对应的网络级治理目标。

5.1 研究发现

基于前文的理论分析与案例研究,本文的发现可归纳为如下几点。

(1)流域水资源治理的结构偏好表现为西方传统网络治理模式中的NAO。而从NAO到LNAO再到RNAO的本土化进程,既表明了静态上中国的流域治理是一种基于授权网络的权力关系和规划行为,又体现出动态上从自发性到强制性、从同质性到异质性、从无序性到有序性的演进逻辑。

(2)流域水资源治理中的超网络建构包含治理网络和生态网络两个部分,分别对应治理过程和作用对象,具体表现为顶层组织网、中层行为网、底层生态网3层子网间的集成互动。这一建构过程是运用网络方法对流域治理中依赖属性与关联机制的回应,核心是用复杂治理工具解决复杂场景问题。

(3)以RNAO为核心的顶层组织网在运作场域、行动策略和微观结构上各有侧重。属地和跨域的分解,组成流域宏观的嵌套结构,要求处理不同的关系;中国情境下的集体行动、网络特征、风险偏好和信任程度共同表明,协调是比合作更适合流域治理的行动方案;而基于微观“开放三元”所形成的稀疏且集中的聚合形态,则降低了成员连接的交易成本。

(4)治理主体、治理资源、治理对象3类实体因流域治理的动态过程而在各子网内部与子网之间产生关联,既包括“能力-资源-任务”在内的三层行为网,又体现为“层内要素互动”与“层间要素流动”两个递进的环节。其中,前一环节具体表现为“桥接、共现、迭代”复合关系的无向网络,而后者则是基于两两元素动态匹配的有向网络。

(5)流域水资源治理的空间错配,是指相互依赖的流域生态组件由不同行动者进行属地管理时,由于欠缺空间协调而出现的生态恶化和社会总体福利下降的现象。在“社会-生态”规模匹配的过程中,既要把握河流与区划的边界交织关系、水资源生态的相互依赖,还需加强对关键流域单元的识别。

(6)从“河长制”到“联合河长制”,本质上是运用RNAO对省内和跨省碎片化权威的二阶整合。而大河流域整体层面的有效协调仍需以七大水利委员会为主体的流域管理体系的持续推动。

5.2 政策建议

依据研究发现,本文提出以下几点建议。

(1)河长制作为一种省域RNAO治理模式,对辖区封闭单元内的小流域治理具有显著效果。但对于跨省的大江大河来说,河长的功能发挥仍限于省内流段的跨市协调。因而,改革的关键在于建立跨省协调的RNAO模式,而珠江流域“水委+

省级河长”的流域整体协调机制是一种值得推广的方案。

(2)流域治理既包括单条河流的贯通式协调,还包括多条河流之间的跨时空协调。针对跨时空流域治理议题,一方面要明确水利部既有 RANO(如水资源管理司、调水管理司、水旱灾害防御司等)的任务分工和协调权限;另一方面要适时设立专题工作监督领导小组,在流域间分水、生态补偿等突出问题上把握“刺激-反应”原则,形成自适应治理闭环。

(3)“RNAO-生态”模式的超网络治理思路在实践中需着重关注两点:一是把握流域生态层面多样化的连通形式,针对上下游、左右岸、干支流等生态连通关系要出台与之匹配的专门方案;二是识别水系水网中牵一发而动全身的关键生态节点,诸如水库大坝、污染源流、旱涝多发地等,压实压紧相关河湖长责任,建立适应性与标准化相统一的激励考核体系。

(4)从“RNAO”到“生态”的中间地带包含组织层、资源层、任务层在内的多重嵌套结构,层级内部与层级之间能否建立稳定的连接是网络治理有效性的关键。在跨域统筹时,除了要建立平战结合的基本制度,更要借助现代技术的力量打造数字流域,实现智慧治水,最终实现“高位推动、层级连通、科技支撑、动态适应”的流域网络治理模式。

5.3 研究展望

在未来的研究中,可以从以下几个方面深入探讨。

(1)整体网与个体网的研究进路转换。网络的结构分析既包含从个体网到整体网的研究进路,即重视当某些具有高能邻域的节点携带个体网进入到既有整体网时产生的连锁反应,也包含从整体网到个体网的研究进路,即预先假定有限的整体关联并探讨整体环境对节点个体的作用。本文针对 RNAO 的分析主要采用的是前者,而未来的研究可以对比两种不同研究进路下的结果差异。

(2)对话 RNAO 结构与网络科学的关联。测量流域乃至环境治理中的 RNAO 结构是否具备复杂网络研究中无标度网络的一般性质,是一个十分有趣的议题。RNAO 在微观上所呈现的开放三元结构,使其在宏观层面生长为稀疏而集中的网络聚合形态,这一定程度上契合了无标度网络中有关“幂律分布”的特质描述^[77]。若能给出定量证据,对于进一步应用网络科学中诸如偏好连接、生长机制、牵制控制、适应性等成熟理论从而改善环境治理绩效将大有裨益。

(3)关注协调策略与网络社会资本的关联。就 BERARDO 所提出的两种网络社会资本来说,协调策略或许更有助于由中心行动者提供“桥接型”(Bridging)网络社会资本,而非“粘结型”(Bonding)网络社会资本,进而将原本互不联系的行动者连接起来,减少重叠信息流,为找到问题的创新解决方案提供更多可能^[78]。

(4)运用大数据对超网络模型进行量化。时至今日,基于超图理论和系统动力学的高阶网络研究已有较为成熟的分析工具和仿真方法^[79]。本文针对“能力-资源-任务”三层网络要素交互所构建出的中层行为网分析框架,同样给出了集合和超边意义上的数学表达,结合大数据的量化实证不失为未来研究的一条可行路径。

参考文献

[1] JIN S, SHENG S H, LIU X F. Complexity Analysis on Water-

shed System and Adaptive Management[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(7): 60-67.

- [2] WANG Y. Research on Inter-Governmental Coordinating Mechanism in Basin Water Environmental Protection[J]. *Journal of Social Sciences*, 2009(3): 26-35, 187.
- [3] YANG Z Y. The Innovation of Integrated Mechanism for River Basin Water Environmental Governance System and Its Limits—From “Fragmented Authority” to “Holistic Governance”[J]. *Journal of Beijing Administration Institute*, 2022(2): 63-72.
- [4] MA J, SUO L M. Innovation of Network Governance Model for China’s Regional Water Sharing Conflict[J]. *Journal of Public Management*, 2010, 7(2): 107-114, 127-128.
- [5] WORLD BANK. *China Water Quality Management: Policy and Institutional Considerations*[M]. Washington, DC, 2006.
- [6] HE G, WANG S, ZHANG B. Watering Down Environmental Regulation in China[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2020, 135(4): 2135-2185.
- [7] YI Z B. Study on the Network Governance of Water Pollution Control in the Tran-Boundary River[J]. *Ecological Economy*, 2012(12): 165-168, 173.
- [8] GADEN M, KRUEGER C, GODDARD C, et al. A Joint Strategic Plan for Management of Great Lakes fisheries: A cooperative regime in a multijurisdictional setting[J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2008, 9(11): 50-60.
- [9] MICHAEL B, ROLF H, ANDREAS K, et al. Danubia: An Integrative Simulation System For Global Change Research In The Upper Danube Basin[J]. *Cybernetics and Systems*, 2004, 35(7/8): 639-666.
- [10] KREMER D, PERNAR R, ANCIC M. Distribution of North American Ash Species in the Drava River Basin and Danube Basin(Croatia)[J]. *Acta Botanica Croatica*, 2006, 65(1): 57-66.
- [11] HUGHES S N, WILLIS D J. *The Fish Community of the River Thames: Status, Pressures and Management*[M]// *Management and Ecology of River Fisheries*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 2000: 55-70.
- [12] LIAO J K, DU Q. Collaborative Governance of the Yellow River Basin: Realistic Requirements, Realization Approaches and Legislative emphases[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(10): 39-46.
- [13] ZHU R X, LI P Z. How to Achieve Horizontal Coordination of Cross-regional River Basin Ecological Compensation—A Qualitative Comparative Analysis of 13 Watershed Ecological Compensation Cases[J]. *Journal of Public Administration*, 2021, 14(1): 170-190, 224-225.
- [14] ZHENG Y F. Study on the Integration of River Chief System and Public Participation in Yangtze River Protection[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(21): 41-45.
- [15] RUI X X, ZHOU X L. The Research on the Composition and Synergy Degree of Water Pollution Collaborative Management System Base on Minjiang River Basin[J]. *Chinese Public Administration*, 2020(11): 76-82.
- [16] WANG H Y, LIU G H, DONG S C. Study on the Integrated Pattern of Controlling Eco-environment of Small Watershed in Hilly & Gully Area in the Loess Plateau: A Case Study of Jiuhuagou Watershed[J]. *Journal of Natural Resource*, 2004

- (2):207-216.
- [17] LI X S, LI J. SWARM Simulation Model's Design on the Watershed Ecological Common Governance[J]. *Ecological Environment*, 2013(11):170-172, 181.
- [18] CAI L R, WANG H W, ZENG W. System Dynamics Model for a Mixed-strategy Game of Environmental Pollution[J]. *Computer Science*, 2009, 36(8):234-238, 257.
- [19] DAI S L, LI Y C. Study on the Dynamic Adaptation Control Model of Water Pollution in the Yangtze River Basin Based on the Complexity Mechanism[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(15):35-40.
- [20] CUI J. "Loosely-coupled" Collaboration of Policy Implementation in China: A Case Study on the Governance Policy of S River Basin[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(6):85-101.
- [21] REN M. "River Chief System": A Sample Study on Cross-sectoral Collaboration of Chinese Government's River Basin Governance[J]. *Journal of Beijing Administration Institute*, 2015(3):25-31.
- [22] SHEN K R, JIN G. The Policy Effects of the Environmental Governance of Chinese Local Governments: A Study Based on the Progress of the River Chief System[J]. *Social Sciences in China*, 2018(5):92-115, 206.
- [23] SUO L M, KAN Y Q. Understanding the Diversity of Collaborative Organizations for Air Pollution Control in China: Type Differences and Selection Logic[J]. *Journal of South China Normal University(Social Science Edition)*, 2021(3):113-127, 207.
- [24] ANSELL C, GASH A. Collaborative Governance in Theory and Practice[J]. *Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART*, 2008, 18(4):543-571.
- [25] PROVAN K G, KENIS P. Modes of Network Governance: Structure, Management, and Effectiveness[J]. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2008, 18(2):229-252.
- [26] MILWARD H B, PROVAN K G. Measuring Network Structure[J]. *Public Administration*, 1998, 76(2):387-407.
- [27] BITTERMAN P, KOLIBA C J. Modeling Alternative Collaborative Governance Network Designs: An Agent-based Model of Water Governance in the Lake Champlain Basin, Vermont[J]. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2020, 30(4):636-655.
- [28] ANDERSON S E, BUNTAINE M T, LIU M, et al. Non-governmental Monitoring of Local Governments Increases Compliance with Central Mandates: a National-scale Field Experiment in China[J]. *American Journal of Political Science*, 2019, 63(3):626-643.
- [29] PROVAN K G, MILWARD H B. Do Networks Really Work? A Framework for Evaluating Public-sector Organizational Networks[J]. *Public Administration Review*, 2001, 61(4):414-423.
- [30] HUANG K. Knowledge Sharing in a Third-Party-Governed Health and Human Services Network[J]. *Public Administration Review*, 2014, 74(5):587-598.
- [31] ISETT K R, PROVAN K G. The Evolution of Dyadic Interorganizational Relationships in a Network of Publicly Funded Non-profit Agencies[J]. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2005, 15(1):149-165.
- [32] SAZ-CARRANZA A, SALVADOR IBORRA S, ALBAREDA A. The Power Dynamics of Mandated Network Administrative Organizations[J]. *Public Administration Review*, 2016, 76(3):449-462.
- [33] PROVAN K G, LEMAIRE R H. Core Concepts and Key Ideas for Understanding Public Sector Organizational Networks: Using Research to Inform Scholarship and Practice[J]. *Public Administration Review*, 2012, 72(5):638-648.
- [34] MACCIÒ L, CRISTOFOLI D. How to Support the Endurance of Long-term Networks: The Pivotal Role of the Network Manager[J]. *Public Administration*, 2017, 95(4):1060-1076.
- [35] GERBER E R, HOPKINS D J. When Mayors Matter: Estimating the Impact of Mayoral Partisanship on City Policy[J]. *American Journal of Political Science*, 2011, 55(2):326-339.
- [36] KILDUFF M, TSAI W. *Social Networks and Organizations*[M]. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2003.
- [37] RODRÍGUEZ C, LANGLEY A, BÉLAND F, et al. Governance, Power, and Mandated Collaboration in an Interorganizational Network[J]. *Administration & Society*, 2007, 39(2):150-193.
- [38] MOYNIHAN D P. Combining Structural Forms in the Search for Policy Tools: Incident Command Systems in U. S. Crisis Management[J]. *Governance*, 2008, 21(2):205-229.
- [39] ZHANG B, CAO C. Policy: Four Gaps in China's New Environmental Law[J]. *Nature*, 2015, 517(7535):433-434.
- [40] LI Y, KOPPENJAN J, VERWEIJ S. Governing Environmental Conflicts in China: Under What Conditions Do Local Governments Compromise? [J]. *Public Administration*, 2016, 94(3):806-822.
- [41] BUNTAINE M, ZHANG B, HUNNICUTT P. Citizen Monitoring of Waterways Decreases Pollution in China by Supporting Government Action and Oversight[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(29):e2015175118.
- [42] BACHARACH S B, LAWLER E J, et al. *Bargaining: Power, Tactics, and Outcomes*[M]. San Francisco: Jossey-Bass, 1981.
- [43] DEKKER H C. Control of Interorganizational Relationships: Evidence on Appropriation Concerns and Coordination Requirements[J]. *Accounting, Organizations and Society*, 2004, 29(1):27-49.
- [44] KERSTIN N. Ex-Ante Governance Decisions in Interorganizational Relationships: A Case Study in the Airline Industry[J]. *Management Accounting Research*, 2010, 21(4):220-237.
- [45] WANG X, BERMAN E M, CHEN D Y, et al. Strategies to Improve Environmental Networks for Pollution Control: Evidence from Eco-Compensation Programs in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 234:387-395.
- [46] BITTERMAN P, KOLIBA C J. Modeling Alternative Collaborative Governance Network Designs: An Agent-based Model of Water Governance in the Lake Champlain Basin, Vermont[J]. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2020, 30(4):636-655.
- [47] CUMMING G S, CUMMING D H M, REDMAN C L. Scale Mismatches in Social-ecological Systems: Causes, Consequences, and Solutions[J]. *Ecology and Society*, 2016, 11(1):14.
- [48] LEE K N. *Compass and Gyroscope: Integrating Science and Politics for the Environment*[M]. Washington D C: Island, 1993.
- [49] BROWN K. *Integrating Conservation and Development: a Case of Institutional Misfit*[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(9):479-487.

- [50] BODIN Ö, CORONA B, THYRESSON M, et al. Conservation Success as a Function of Good Alignment of Social and Ecological Structures and Processes[J]. *Conservation Biology*, 2014, 28:1371-1379.
- [51] LUBELL M. Governing Institutional Complexity: the Ecology of Games Framework[J]. *Policy Studies Journal*, 2013, 41(3): 537-559.
- [52] LUBELL M, ADAM D H, MIKE M. Collaborative Forums in an Ecology of Games[J]. *American Journal of Political Science*, 2010, 54(2): 287-300.
- [53] BERKES F, FOLKE C, COLDING J. Linking Social and Ecological Systems; Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience[M]. New York: Cambridge University Press, 1998.
- [54] FOLKE C. Resilience: the Emergence of a Perspective for Social-ecological Systems Analyses[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [55] HUGHES T P, CARPENTER S, ROCKSTRÖM M J, et al. Multi-scale Regime Shifts and Planetary Boundaries[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(7): 389-395.
- [56] NEWMAN L L, DALE A. Network Structure, Diversity, and Proactive Resilience Building: a Response to Tompkins and Adger[J]. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): r2.
- [57] ZHAO Y, WEI Y, WU B, et al. A Connectivity-based Assessment Framework for River Basin Ecosystem Service Management[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 34-41.
- [58] SUO L M. Hypernetwork Structure and Governance in City Being[J]. *People's Tribune*, 2020(20): 38-41.
- [59] WANG J W, RONG L L, DENG Q H, et al. Evolving Hypernetwork Model[J]. *The European Physical Journal*, 2010, 77(4): 493-498.
- [60] MITSCH W J, JØRGENSEN S E. Ecological Engineering: A Field Whose Time Has Come[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(5): 363-377.
- [61] BODIN Ö. Collaborative Environmental Governance: Achieving Collective Action in Social-ecological Systems[J]. *Science*, 2017, 357(6352): eaan1114.
- [62] BERARDO R, SCHOLZ J T. Self-Organizing Policy Networks: Risk, Partner Selection and Cooperation in Estuaries[J]. *American Journal of Political Science*, 2010, 54(3): 632-649.
- [63] BERARDO R. The Evolution of Self-organizing Communication Networks in High-risk Social-ecological Systems[J]. *International Journal of the Commons*, 2014, 8: 236-258.
- [64] AGRANOFF R. Inside Collaborative Network; Ten Lessons for Public Managers[J]. *Public Administration Review*, 2006, 66(12): 56-65.
- [65] BODIN Ö, ALEXANDER S M, BAGGIO J, et al. Improving Network Approaches to the Study of Complex Social-ecological Interdependencies[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(7): 551-559.
- [66] BODIN Ö, CORONA B, THYRESSON M, et al. Conservation Success as a Function of Good Alignment of Social and Ecological Structures and Processes; Social-Ecological Fit and Conservation[J]. *Conservation Biology*, 2014, 28(5): 1371-1379.
- [67] SAYLES J S, BAGGIO J A. Social-ecological Network Analysis of Scale Mismatches in Estuary Watershed Restoration[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(10): e1776-e1785.
- [68] BARNES M L, LYNHAM J, KALBERG K, et al. Social Networks and Environmental Outcomes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(23): 6466-6471.
- [69] KININMONTH S, BERGSTEN A, BODIN Ö. Closing the Collaborative Gap: Aligning Social and Ecological Connectivity for Better Management of Interconnected Wetlands[J]. *AMBIO*, 2015, 44(S1): 138-148.
- [70] LIU Y, TAN C. The Effectiveness of Network Administrative Organizations in Governing Interjurisdictional Natural Resources[J]. *Public Administration*, 2022: padm. 12834.
- [71] YAN H N, ZENG D. The Dilemma of and the Reflection on Water Environment Governance Innovation by the River Chief System: From the Perspective of Collaborative Governance[J]. *Journal of Beijing Administration Institute*, 2019(2): 7-17.
- [72] LI Y, TONG J, WANG L. Full Implementation of the River Chief System in China: Outcome and Weakness[J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 37-54.
- [73] WANG Y, CHEN X. River Chief System as a Collaborative Water Governance Approach in China[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2020, 36(4): 610-630.
- [74] WANG S, FU B, BODIN Ö, et al. Alignment of Social and Ecological Structures Increased the Ability of River Management[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1318-1324.
- [75] HUAI B, LI Z, WANG S, et al. RS Analysis of Glaciers Change in the Heihe River Basin, Northwest China, during the Recent Decades[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(6): 993-1008.
- [76] LI X, CHENG G, GE Y, et al. Hydrological Cycle in the Heihe River Basin and Its Implication for Water Resource Management in Endorheic Basins[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(2): 890-914.
- [77] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [78] BERARDO R. Bridging and Bonding Capital in Two-Mode Collaboration Networks; Bridging and Bonding Capital in Collaboration Networks[J]. *Policy Studies Journal*, 2014, 42(2): 197-225.
- [79] BIANCONI G. Higher-Order Networks[M]. Cambridge University Press, 2021.



SUO Liming, born in 1979, Ph. D, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include network governance, complex network and sustainability.



LI Jun, born in 2000, postgraduate. His main research interests include network governance, intergovernmental collaboration and regional environmental governance.