

DOI: 10.5846/stxb202101060054

张萌萌,王帅,傅伯杰,刘焱序,武旭同.社会-生态网络方法研究进展.生态学报,2021,41(21):8309-8319.

Zhang M M, Wang S, Fu B J, Liu Y X, Wu X T. Study on social-ecological network method: Progress and prospect. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8309-8319.

## 社会-生态网络方法研究进展

张萌萌<sup>1,2</sup>, 王 帅<sup>3,\*</sup>, 傅伯杰<sup>2,3</sup>, 刘焱序<sup>3</sup>, 武旭同<sup>3</sup>

1 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

**摘要:** 社会-生态系统是由一个或多个社会和生态子系统交互作用形成的复杂的、非线性的、动态耦合系统。理解社会与生态子系统之间的复杂交互关系对于实现有效、可持续的环境治理至关重要。社会-生态网络方法是网络理论在社会-生态交互作用研究中应用与发展的产物,在定量刻画社会-生态系统结构、分析系统动态变化、推动系统适应性治理等方面具有重大的应用潜力。系统梳理了国内外现有的社会-生态网络研究,首先从网络的类型、构建模式、分析方法 3 个方面介绍社会-生态网络方法,并阐述其在资源管理、社会-生态匹配、社会-生态适应性治理领域中的应用,探讨社会-生态网络方法在研究社会-生态交互作用中的优势和挑战,最后提出未来社会-生态网络研究的重点方向,即社会-生态网络的动态变化过程以及社会-生态网络结构与功能关系。研究旨在深化网络分析可用于描述人-自然关系的认识,为社会-生态系统的网络研究提供实践指导,以期促进社会-生态网络方法在我国社会-生态系统研究中的应用。

**关键词:** 社会-生态网络; 人地关系; 社会-生态系统; 社会生态匹配

## Study on social-ecological network method: Progress and prospect

ZHANG Mengmeng<sup>1,2</sup>, WANG Shuai<sup>3,\*</sup>, FU Bojie<sup>2,3</sup>, LIU Yanxu<sup>3</sup>, WU Xutong<sup>3</sup>

1 School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Social-ecological system is composed of social subsystem and ecological subsystem and the interactions between them, whose structures and functions are different from those of social subsystem or ecological subsystem alone. Social-ecological system is therefore characterized by complexity, non-stability and nonlinearity. At present, dynamic evolutions and mutual feedback mechanisms have gradually become the core contents of social-ecological system research. Achieving effective and sustainable environmental governance requires a better understanding of the complex interdependencies in social-ecological systems. However, the complexity, mutual feedback loops and other nonlinear dynamic characteristics of social-ecological dependence, as well as differences in interdisciplinary research paradigms make it very difficult to conceptualize and understand human-nature interactions in the social-ecological system. With the development of modern graph theory, statistical theory, computer technology, etc., network thinking has gradually been practically applied in analyzing the internal relations of the system. Social-ecological network method has been born as a product of the application and development of network theory in the study of socio-ecological interaction, which has great application potential in quantitatively describing the system structure, analyzing the system dynamic changes, and promoting adaptive governances.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41991235, 42041007); 巴彦淖尔生态治理和绿色发展院士专家工作站建设(YSZ2018-1); “科技兴蒙”行动重点专项项目(NMKJXM202008)

收稿日期: 2021-01-06; 采用日期: 2021-07-27

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shuaiwang@bnu.edu.cn

We systematize existing social-ecological network studies and introduce the social-ecological network methods in terms of the type of network, building mode and analysis method. Then the article summarizes the social-ecological network method's applications in the field of natural resource management, social-ecological fit, social-ecological adaptability governances. By discussing the advantage and challenge of the social-ecological network method in the research of social-ecological interaction, we believe that the generalization of the social-ecological system into a network provides an effective way to understand the social-ecological dependence and insight into the behavior of the system. However, currently, the lack of generally recognized social-ecological interaction theory, insufficient practical application cases and researches on the causal relationship between structure and function, etc., still hinder the further development of social-ecological network methods. Finally, we put forward two important directions on strengthening and improving social-ecological network research in the future, that is, to introduce mathematical or physics methods to study the dynamic change process of social-ecological network, and to use more cases to reveal the relationship between the structure and function of social-ecological network. The paper aimed at deepening the understanding that network analysis can be used to describe human-nature relationship, and providing practical guidance for social-ecological network research, to promote a scientific and standardized application of the network method in social-ecological system studies in China.

**Key Words:** social-ecological network; human-nature relationship; social-ecological systems; socio-ecological fit

地球进入“人类世”,自然过程逐渐受到人类行为的主导和控制,人与自然的的关系日趋复杂<sup>[1]</sup>。生态系统和社会系统在不同的时空尺度上以复杂和动态的方式相互作用,形成交互联系的社会-生态系统<sup>[2-6]</sup>。生态和社会(子)系统的动态过程及交互联系将对更大尺度的社会-生态系统产生影响,而这种影响反过来也会改变子系统及其组分。因此,理解复杂社会-生态系统中的社会-生态依赖关系对于制定有效的资源管理策略、增强系统弹性、解决生态问题、实现可持续发展至关重要<sup>[3,7-9]</sup>。但是,社会-生态依赖关系的复杂性、滞后性、弹性、相互反馈循环等非线性动态特征<sup>[10]</sup>以及跨学科研究范式的差异导致在社会-生态系统下对人地相互作用进行概念化非常困难,因此亟需发展新的方法将社会和生态放在同一平台,对社会-生态系统核心组分及其之间的复杂相互作用关系进行定量研究。

运用网络思想对复杂系统的组织模式与动态交互关系进行定性表达最早起源于我国传统哲学文化。所谓“大而无外,小而无内”,万事万物以不同大小、等级的网络进行组织,“天、地、人”三才统一构成宇宙整体,并时刻处于“刚柔相推而生变化”的动态演变中<sup>[11]</sup>。随着现代图论和统计理论的发展,网络思想在分析系统内部关系中逐步得到实际应用,网络分析方法成为理解和分析系统内部关系格局(即拓扑)以及格局与系统特征关联的有力工具<sup>[12]</sup>。关系结构的网络分析在社会学和生态学领域均已有广泛的应用<sup>[13-14]</sup>。在社会学领域,网络常用来研究社会实体(个体行为人或集体行为)之间的非物质(信息、建议等)和物质(农副产品)流关系<sup>[15-17]</sup>。在生态学领域,网络则用于分析城市生态系统<sup>[18]</sup>或景观区域中各生物及非生物组分之间的相互依赖关系<sup>[19-20]</sup>,网络中的联系通常用来描述营养关系(捕食)和非营养关系(物种的迁移,竞争,互利共生)等<sup>[21-22]</sup>。

进入 21 世纪,随着新的数据类型和计算方法的出现,复杂网络研究得以快速发展<sup>[23-24]</sup>,网络思想在跨学科研究领域广泛传播,网络分析开始越来越多地用于研究社会与生态之间的交互关系<sup>[25-27]</sup>。社会-生态网络的概念逐渐被引入到自然资源治理<sup>[28]</sup>、生物物种保护<sup>[29]</sup>、农业政策制定<sup>[30]</sup>等研究领域,来探索资源使用对生态系统的影响,行为人的协作与资源管理效果间的关系等。网络成为推进社会-生态系统可持续性<sup>[31]</sup>和弹性研究<sup>[32]</sup>,进行生态系统服务供给和评估<sup>[33]</sup>的有效路径。

基于此,本文综述了社会-生态系统背景下,概念化和分析社会-生态关系的网络研究,从网络类型、构建模式、分析方法 3 个方面阐述社会-生态网络方法如何概念化社会-生态系统中的依赖关系,并梳理此类研究在资源管理、匹配问题和社会生态适应性治理中的应用,最后通过论述社会-生态网络研究的优势与挑战,提出社会-生态网络方法未来发展的重点方向。

### 1 社会-生态网络方法

社会-生态网络方法假设社会-生态系统可以被模拟成社会-生态网络,通过对系统中社会与生态的相互依赖关系进行网络化,采用网络术语来描述社会-生态系统的特征<sup>[34]</sup>。社会-生态网络中的实体称为节点,他们之间的关系称为边。通常来说,社会-生态网络的构建有3个步骤:(1)定义特定研究的社会生态依赖,(2)定义社会和生态节点,(3)定义联系<sup>[35]</sup>。根据Bodin等观点<sup>[34]</sup>,每一个社会-生态网络同时包含了一系列的社会和生态/生物物理实体(节点)以及它们之间的依赖关系(链接或边)。根据所研究现象的不同,节点和链接的选择各异。社会节点可以是个体资源获取者、政府、非政府组织或机构等非实体行为人。生态节点可能是生物物理环境特定组件(如特定物种或空间分离的栖息地斑块),也可代表聚合生物物理形式或现象(例如富营养化、气候变化等)<sup>[36]</sup>。链接代表节点之间存在的生物物理联系、行为、合作关系等。依据该观点,社会-生态网络中的节点可分为两类,即社会节点和生态节点;社会-生态网络中的联系按照与其相连的节点的类型进行划分,而不是联系本身的性质,可分为社会-社会联系、社会-生态联系、生态-生态联系三类;网络中社会节点与生态节点之间的连边仅代表跨越人与自然的联系。

#### 1.1 网络类型

从社会-生态系统中社会与生态的相互依赖特征出发,根据社会和生态组分及关系的集合程度归类已有的社会-生态网络研究,可以分为三类网络,如图1所示。

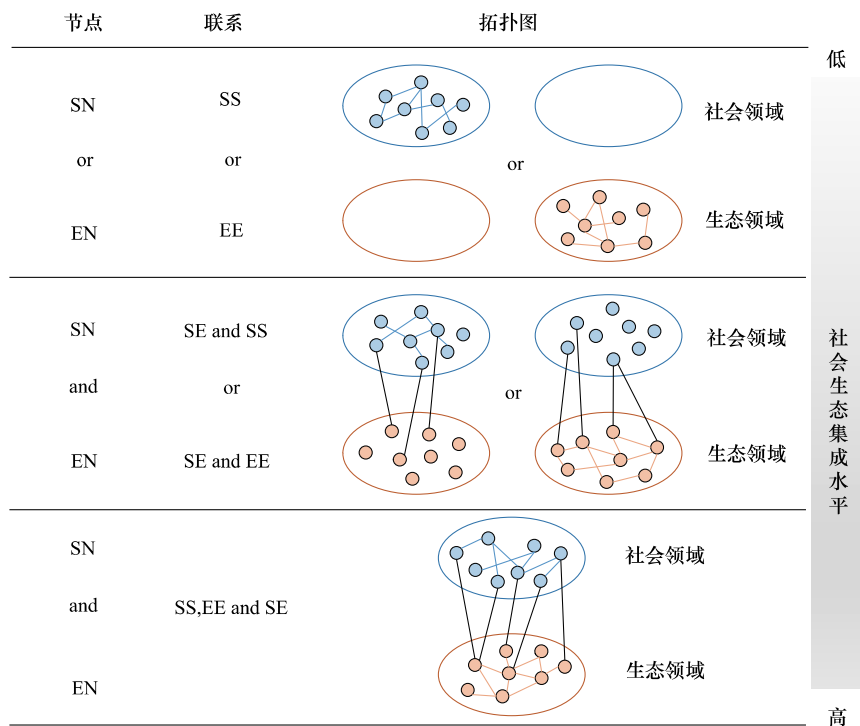


图1 基于社会生态集成水平的社会-生态系统网络研究分类

Fig.1 A typology of network studies analysing human-nature relationships in social-ecological systems based on different levels of integration of the social and/or ecological realm

EE: 生态-生态连边 Ecological-ecological edge; SS: 社会-社会连边 Social-social edge; SE: 社会-生态连边 Social-ecological edge; SN: 社会节点 Social node; EN: 生态节点 Ecological node

第一类网络主要考虑一种类型的节点和一种类型的联系,即社会节点和社会联系,或者生态节点和生态联系。该类型网络多为自然资源管理或者社会-生态系统背景下的社会网络或生态网络<sup>[37-39]</sup>。其中,社会网络多是将参与资源使用或治理的社会行为人及其之间的联系进行概念化<sup>[40]</sup>,社会节点多为渔民、村民、各级

资源管理者等行为人,社会联系则多为他们之间的信息共享<sup>[41]</sup>、知识交换<sup>[42]</sup>、协作<sup>[43]</sup>等行为。生态网络的概念化则多针对生物或非生物组分的生态过程,既有对食物网(营养链接)的研究,聚焦捕鱼业对海洋食物网的影响<sup>[44]</sup>,也有分析关键种的意义或入侵物种对生态系统的影响<sup>[45-46]</sup>。

第二类网络综合考虑社会节点和生态节点以及两种类型的联系(社会-社会联系和社会-生态联系,或者生态-生态联系和社会-生态联系)。这类网络中,虽然某一领域的单个节点与另一领域的相互作用被概念化,但是该领域内节点之间的联系未考虑。这种类型网络的概念化中,社会节点可能代表社会行为人,也可以代表社会组织;生态节点可以是不同鱼类,也可以是水系、景观等。在资源管理中,这种网络类型可用来研究资源和制度之间的关系<sup>[47]</sup>或研究渔民的捕捞行为对食物网动态的影响<sup>[48]</sup>。

第三类网络综合考虑两种类型的节点和三种类型的联系。这类网络的研究聚焦景观管理背景下的人-自然关系的网络概念化,例如林地斑块<sup>[49]</sup>、植被群落<sup>[50]</sup>、城市绿地空间<sup>[51]</sup>、流域<sup>[25]</sup>等,来反映被不同人类主体所管理的生态节点之间的关系。此外,也有以渔业为目标,研究渔民(作为社会节点)通过协作从生态系统(食物网)中获取鱼类的行为<sup>[52-53]</sup>。

已有研究将社会-生态系统概念化成网络的方式很多,部分学者基于社会-生态系统组分之间关系的性质进行社会-生态系统的网络概念化,社会-生态网络可分成单层网络(单一的链接),多层网络(多层级的链接),复合网络(多种类型的链接<sup>[54]</sup>)。每一种类型的网络并无好坏之分,针对具体的研究问题和社会生态依赖关系,可选择适当的网络类型。

### 1.2 网络构建模式

已有的社会生态依赖关系研究中,对于社会-生态网络的构建一般基于景观和系统两种模式(表1)。

表1 各类社会-生态网络研究案例分析方法

Table 1 Exemplary means of analysis for different types of network studies

网络类型 Network type	网络构建模式 Network mode	网络特征 Network characteristics				网络分析方法 Network analysis method	主要研究内容 Key contents
		节点类型 Node type	节点描述 Node definition	连边类型 Edge type	连边描述 Edge definition		
类型 I Type I	系统模式	SN	个体渔民、企业管理者、政府官员等	SS	各社会节点之间的信息共享行为	描述性方法	社会网络结构对鲨鱼误补量的影响 <sup>[40]</sup>
	景观模式	EN	城市绿地景观斑块	EE	河网、生态廊道等	描述性方法	城市景观破碎化与绿网优化 <sup>[55]</sup>
类型 II Type II	系统模式	SN, EN	捕鱼者、买鱼者(SN), 鱼的种类(EN)	SS, SE	买鱼者与捕鱼者间的交易关系(SS), 买鱼者间或捕鱼者间存在的关于价格商定、购买承诺等关系(SS)	描述性方法	小尺度买鱼者对鱼交易网络变化的适应能力 <sup>[56]</sup>
	景观模式	SN, EN	水库(文中将其作为钓鱼者的替代指标, 作为SN)	SS, SE	钓鱼者在水库间的移动(SS), 钓鱼者将入侵物种带入水库中(SE)	描述性方法	耦合社会和生态模型评估水生入侵物种的“传染” <sup>[57]</sup>
类型 III Type III	景观模式	SN, EN	城市湖泊(EN)的不同管理组织(SN)	SS, EE, SE	管理组织为改进湖泊管理而进行的合作(SS), 湖泊间的水系连接(EE), 管理组织管理湖泊(SE)	统计模拟方法(指数随机图)	城市景观的社会生态匹配 <sup>[58]</sup>
	系统模式	SN, EN	使用不同捕鱼工具的渔民(SN), 捕鱼工具捕到的不同种类的鱼(EN)	SS, EE, SE	渔民之间关于捕捞工具等信息的交流与合作(SS), 各类鱼之间的营养关系(EE), 捕捞工具捕获特定鱼的种类(SE)	统计模拟(多层指数随机图)	社会生态匹配的生态效应 <sup>[52]</sup>
	景观模式	SN, EN	社会代理(SN), 景观生态斑块(EN)	SS, EE, SE	社会代理之间的政策和信息联系(SS), 斑块之间的地理距离(EE), 社会代理管理生态斑块(SE)	计算机网络模拟	生态干扰和管理政策在社会生态网络中的传播 <sup>[50]</sup>

EE: 生态-生态连边 Ecological-ecological edge; SS: 社会-社会连边 Social-social edge; SE: 社会-生态连边 Social-ecological edge; SN: 社会节点 Social node; EN: 生态节点 Ecological node

景观模式通常从景观的视角出发,考虑社会-生态关系的空间特征。例如,在城市或者牧区背景下,动物通过生态廊道或者栖息地之间的连通度进行迁移<sup>[59-62]</sup>,反映生态系统间的空间依赖性。也有研究采用景观生态学中景观廊道<sup>[63]</sup>的概念,建立生态-生态间的空间关系<sup>[55,64]</sup>。

不同于景观模式,系统模式不必根植于地理空间,只需要基于对真实世界或对生物物理过程的理解,将其概念化或抽象化为社会和生态的实体以及联系。例如,Ekstrom 等使用社会-生态网络描绘了一个耦合人类驱动的理论海岸社会-生态系统<sup>[65]</sup>。基于营养关系的生态网络<sup>[66]</sup>、海洋渔业网络的构建多基于系统模式。

### 1.3 网络分析方法

(1) 描述性方法。这种方法是分析社会-生态网络的基本方法。通过计算网络的密度、连通度,节点的权重、介数等指数,或对网络进行社团划分、模块化分析<sup>[67]</sup>,描述社会-生态网络的结构特征,并分析其所代表的意义<sup>[25]</sup>。这种描述性方法在三种类型的社会-生态网络分析中均很常见。

(2) 统计模拟方法。社会-生态网络研究中对统计模拟方法的使用大多基于社会生态构建块理论。2012年,Bodin 等<sup>[35]</sup>提出了一个新颖的理论框架,该框架的核心是一组基于行为人获取资源的方式是否相同,行为人之间是否有合作,以及资源之间是否有联系 3 个原则确立的基本构建块<sup>[68]</sup>,每个构建块代表一个由两个社会行为人和两种生态资源组成的简化的社会-生态系统(图 2)。该框架假定社会-生态系统可以被模拟成一个社会-生态网络,而每个社会-生态网络都可以看成是若干个某一种或者几种基本构建块的组合。这些小的“社会-生态网络”明确地代表了社会与生态的相互依赖关系。比起直接分析巨大复杂的社会-生态网络结构,框架主张着眼于这些小的构建块。对构建块进行统计分析通常基于一定的假设,例如稳定结构的构建块(图 2)有利于解决环境问题,通过从社会-生态网络中提取两个社会节点和两个生态节点之间所有可能的组合,量化网络中不同类型构建块出现的频率,来揭示相关的治理问题与挑战<sup>[69-71]</sup>。这种方法大多应用在第三种类型的社会-生态网络中,多结合社会网络科学中的随机模拟方法——指数随机图法<sup>[72]</sup>,关注社会和生态层网络的整体拓扑特征。近年来,随机图方法发展出多层指数随机图模型<sup>[73]</sup>和时间指数随机图模型<sup>[74]</sup>,为研究多层级社会-生态网络的时空动态带来巨大潜力<sup>[49,75-76]</sup>。

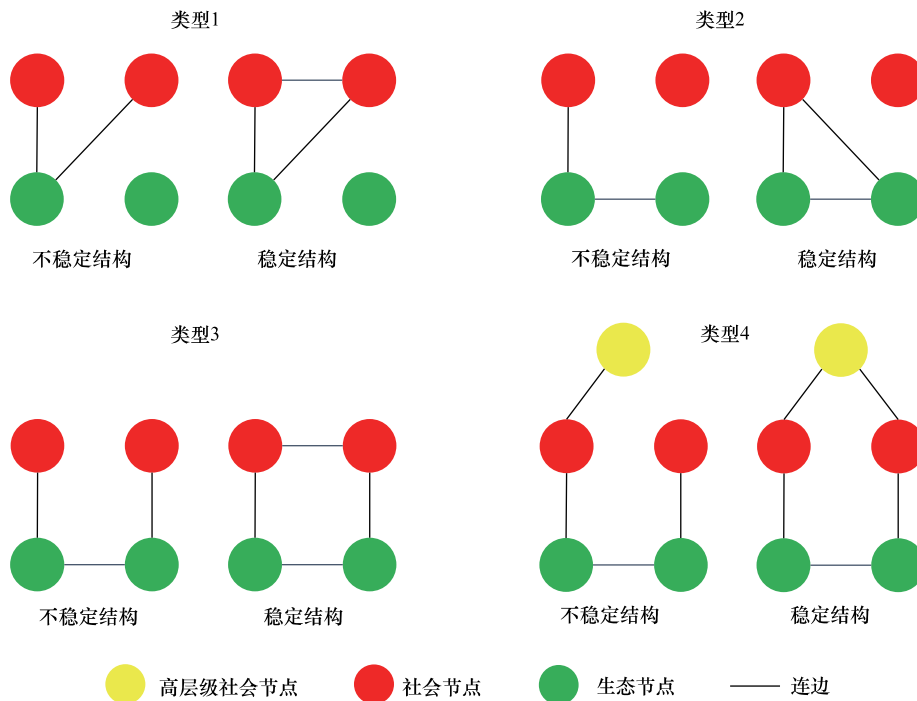


图 2 常见的社会-生态系统基本构建块类型

(3) 计算机网络模拟。该分析方法通过去除或干扰网络中的某些节点<sup>[50]</sup> 模拟自底向上或自上向下的干扰传播过程,并观察其对临近节点和整个网络的影响,以此来测试系统的稳定性。也可通过识别网络断开点或观察(预测)网络组件间联系的变化,洞察社会-生态系统行为<sup>[77]</sup>。

## 2 社会-生态网络应用研究

社会-生态网络作为一个有效的研究社会与生态相互作用的工具,目前在自然资源管理、社会-生态匹配和社会-生态系统适应性治理等领域的研究中得到广泛应用。

### 2.1 资源管理与物种保护

资源管理和物种保护因涉及社会行为人之间、生态单元之间、以及社会行为人与生态之间的相互作用而形成复杂的社会-生态系统,社会-生态网络方法通过将系统中的社会生态依赖关系进行网络化,深入理解社会-生态系统内的依赖关系,探索资源管理效果与网络的关系<sup>[78]</sup>,为优化资源管理奠定基础。例如在渔业资源的管理中, Sayle 和 Baggio 在使用网络方法研究河口流域社会-生态系统时,发现环境问题严重的河口区域,渔民间的合作密度和强度往往较弱<sup>[79]</sup>。Barnes 等研究了大尺度的渔民信息共享网络与鲨鱼误捕量之间的关系,发现社会关系与捕鱼者直接作用于海洋生态系统的行为联系紧密,认为加强渔民之间的沟通能够降低鲨鱼误捕量<sup>[40]</sup>。Lubell 等通过构建社会-生态网络来研究社会政策网络对于入侵物种管理的影响<sup>[80]</sup>。Yletyinen 等构建了渔业社会-生态网络,通过分析网络的社团结构和构建块频率,来评估捕鱼策略的多样化如何影响渔民对未来生态系统变化的适应能力<sup>[81]</sup>。

### 2.2 匹配问题

在社会-生态匹配问题的研究中,社会-生态网络方法也发挥了重要作用。主要体现在两个方面:一是定量研究社会-生态匹配与环境治理效果的关系。资源管理的经验证据表明,环境治理成效有赖于行为人之间的相互作用格局与生态连通度格局之间的匹配程度<sup>[82]</sup>。社会-生态系统中跨越生态和社会组分的过程的匹配有助于降低干扰和系统功能的失效<sup>[83-84]</sup>。社会-生态网络方法为量化研究社会-生态匹配与环境治理效果的关系提供了有力工具。在珊瑚礁海域捕鱼的案例中, Barnes 等使用社会-生态网络方法量化研究了社会生态匹配度与珊瑚礁生态质量的关系,发现渔民之间合作捕捞有利于海洋环境质量的好转<sup>[52]</sup>;湖泊基层管理的社会-生态网络与湖泊生态质量的关系研究,发现基层行为人合作有利于湖泊环境的保护<sup>[58]</sup>;在我国黑河流域社会-生态系统的研究中, Zhang 等使用社会-生态网络分析方法研究流域中自然系统和社会经济管理系统之间的动态网络关联,发现黑河流域管理局成立后,促进了中下游流域管理网络与自然生态网络的结构匹配,进而带来流域生态环境的好转<sup>[85-86]</sup>。

二是评估社会-生态系统中的不匹配程度。社会-生态不匹配给入侵物种管理、野火防治等带来挑战<sup>[87-88]</sup>。Bergsten 等<sup>[89]</sup>使用社会-生态网络和指数随机图方法诊断了城市地区土地管理和湿地生态连通度之间的不匹配问题,并评估了不匹配的程度。Hamilton 等结合野火传播网络和治理网络,研究了野火风险管理网络中促成和阻止匹配的因素<sup>[90]</sup>。

### 2.3 适应性治理

社会-生态系统是典型且复杂的适应性系统,社会和生态间多尺度、嵌套性的相互依赖关系造成了适应性治理问题<sup>[91-92]</sup>。社会-生态网络方法在适应性治理中的应用主要体现在 3 个方面。

一是研究个体(节点)行为对适应性治理网络结构和功能的影响。适应性网络关注社会-生态系统结构和个体动态的关系,适应性网络的研究对社会生态转型治理至关重要。社会-生态网络研究被用于分析可持续转型的网络结构特征,评估代理组织在自适应网络中扮演的角色。例如,在城市绿地生态系统治理网络中,有学者探讨了网络中的个体如何改变网络结构,进而影响生态系统治理<sup>[51]</sup>。部分学者使用社会-生态网络方法研究治理网络中的知识交换、信息流动和影响传递<sup>[93]</sup>,以此识别治理网络中的关键组织<sup>[94]</sup>或研究桥联组织对海洋系统保护治理结果以及海洋保护策略和需求适应性的影响<sup>[95]</sup>。

二是探究社会合作网络结构对社会-生态系统适应性治理成效的影响<sup>[96]</sup>。在社区尺度上,资源使用者之间知识和信息交流的格局影响渔业资源协同治理的集体行动<sup>[97]</sup>。在区域尺度上,Hirschi 研究了不同部门和管理层级的行为人所构成的合作网络,发现其结构特征(聚集性、碎片化和灵活度)会影响农村地区的可持续发展<sup>[98]</sup>。王宁馨使用社会-生态网络方法研究了兰州市公园管理的耦合模式<sup>[99]</sup>。

三是进行适应性治理系统的动态变化研究。Österblom 等分析了由行为人、社会网络、组织、制度共同构成的适应性治理网络的变化,分析和描述了社会生态适应性治理系统结构与功能和区域海洋渔业社会生态结果的关系<sup>[100]</sup>。社会-生态网络方法在适应性治理中的应用为如何通过调节社会-生态系统治理结构来实现持续保障人类福祉提供了理论依据。

### 3 社会-生态网络方法的优势与挑战

社会-生态系统的复杂性、多尺度性、嵌套性等特征决定了对其系统的解构和理解极具挑战,将社会-生态系统概化成网络为理解社会-生态依赖关系、洞悉系统行为提供了有效途径。相较于其他方法,社会-生态网络方法在社会-生态系统研究中有以下几点优势:(1) 社会-生态网络方法将社会和生态放在同一平台,提供了跨学科的共同的语言方法和模型;(2) 社会-生态网络方法可以捕捉到复杂社会-生态系统中社会和生态实体以及他们之间的重要关系,明确解释可能对社会-生态系统行为产生显著影响的相互依赖关系;(3) 社会-生态网络可以将不同主体、不同联系、不同空间尺度的依赖关系纳入网络中,解决社会-生态系统中多主体、跨尺度的问题,且构建的社会-生态网络可具有时间上的连续性,有助于研究社会-生态系统行为的演化规律。尽管如此,社会-生态网络方法目前仍处在起步阶段并存在很多不足。首先,该方法是将社会-生态系统描述为节点和链接,这种描述方式必须由与研究目标相关的基本假设和理论驱动。生态网络研究多基于生态学的基本理论,社会网络研究则多基于社会学的基本理论,但是对于社会-生态网络研究,目前尚未有普遍认可的社会-生态相互作用理论,这阻碍了进一步发展模型、进行网络动力学模拟。其次,尽管资源管理案例和素材极为丰富,但使用社会-生态网络方法进行分析的案例研究明显不足,且已有研究主要是测量和描述社会与生态间的相互依赖,对于社会与生态相互作用机制的探讨较少,检验网络与社会-生态结果间因果关系假设的经验案例研究也明显不足。此外,社会-生态网络可以在两个方向上与社会生态结果产生因果关系,一方面网络格局影响社会生态结果,另一方面网络本身作为因变量,其结构特征(即节点和链接的模式),也可视为由潜在社会生态过程(自变量)留下的可观察静态变量。但当前的案例研究对因果假设方向性的探讨非常薄弱<sup>[34]</sup>。因此,社会-生态网络方法的经验应用很难超越个别案例进行比较分析并形成理论,且社会-生态依赖关系的实证调查很难与格局是如何产生并如何导致特定社会生态结果的真正关联起来。

### 4 社会-生态网络方法的发展方向

社会-生态网络方法为社会-生态系统研究提供了一种新的研究思路和范式。为进一步推动社会-生态网络在社会-生态系统研究中的应用,充分发挥其优势,未来可从以下两方面开展工作。

#### 4.1 社会-生态网络动态过程

动态演化与互馈机制是社会-生态系统研究的核心内容<sup>[101]</sup>,理解系统演变过程与机制是实现社会-生态适应性治理和可持续发展的关键<sup>[102]</sup>。已有的社会-生态网络研究虽已建立了以网络结构为基本骨架,社会和生态节点为基本单元,以节点之间的关系为基本运行机制的社会-生态网络,但也仅仅停留在对节点间相互作用结构的刻画上,缺乏对社会-生态相互作用动力过程的捕捉。网络动力过程就是在“外部刺激”或“内部消息”触发下,网络中各节点自身信息状态发生改变(消息的传播、能量的流动),或者节点间连边关系(反映在网络拓扑结构图上)变化,从而导致整个网络发生明显或者不明显的“质变”,这种改变可能是随机的,也可以是在某种规则约束下发生的,符合某种物理过程。未来社会生态网络研究要对更多的案例进行不同时空的静态网络结构的刻画,并揭示网络结构的时空动态变化过程,分析网络结构变化可能的原因和机理。可引入数

学或者物理学的方法,建立相应的网络动力学模型,模拟和预测系统组分(网络节点)及其关系(联系的数量、链接的方式)变化对系统行为的影响,进而揭示社会-生态系统演变机制。

#### 4.2 社会-生态网络结构与功能关系

社会-生态系统结构与功能关系研究不仅能够为解决环境治理难题,实现资源可持续利用提供理论依据,而且有助于建立合理的数学或物理网络动力学模型,帮助揭示社会-生态系统的互馈机制。目前,社会-生态依赖的网络化研究虽然促进了对网络结构与系统功能间因果关系的探讨,但因果关系并未得到真正的验证,这个问题也仍是现有文献中的薄弱环节。未来社会-生态网络结构与系统功能关系的研究可从3个方面加强:一是大量收集不同社会结构和生态环境数据,对基本的因果过程进行全面的理论研究,形成因果关系类型库;二是增强社会-生态系统结构与功能间因果假设的推理和验证,可通过单个社会-生态系统的动态过程及效应分析,或通过不同案例的比较研究,建立和发展一般性的结论;三是进一步整合人地关系研究中的关键问题,比如生态系统服务和可持续研究。这些关键问题的解决需要将社会-生态网络结构与功能联系起来。同时,结构与功能关系可以提供一个桥梁,帮助阐明生态系统管理的益处,指导生态系统服务政策和实践。

#### 5 总结

理解社会-生态系统中社会和生态组分之间的直接和间接联系对于制定长期管理策略以维持系统功能至关重要。社会-生态网络方法是运用网络理论实现复杂关系量化研究的分析方法,是社会-生态系统研究在方法论上的创新与突破。社会-生态网络作为一个新的研究方法,因其在概念化复杂系统、描述系统组分间关系及其变化等方面的优势,为社会-生态系统研究提供了一个新的途径,被广泛应用于自然资源管理、社会生态匹配和适应性治理等领域。虽然社会-生态网络研究目前仍处于发展的初期,理论尚不完善,但未来在研究社会-生态系统的结构与功能,揭示系统过程与机制方面有着巨大的发展前景和应用空间。

#### 参考文献(References):

- [1] Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, Crutzen P. The new world of the anthropocene. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2228-2231.
- [2] Berkes F, Folke C, Colding J. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. New York: Cambridge University Press, 1998.
- [3] Folke C. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [4] Hughes T P, Carpenter S, Rockström J, Scheffer M, Walker B. Multiscale regime shifts and planetary boundaries. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(7): 389-395.
- [5] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [6] 余中元,李波,张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析. *生态学报*, 2014, 34(7): 1870-1879.
- [7] Newell B, Crumley C L, Hassan N, Lambin E F, Pahl-Wostl C, Underdal A, Wasson R. A conceptual template for integrative human-environment research. *Global Environmental Change*, 2005, 15(4): 299-307.
- [8] Young O R, Berkhout F, Gallopin G C, Janssen M A, Ostrom E, Van Der Leeuw S. The globalization of socio-ecological systems: an agenda for scientific research. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 304-316.
- [9] Binder C R, Hinkel J, Bots P, Pahl-Wostl C. Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2013, 18(4): 26.
- [10] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [11] 聂启阳. 基于《周易》三才理论的生态城市建设思考. *城市发展研究*, 2021, 28(3): 20-23.
- [12] Webb C, Bodin Ö. A network perspective on modularity and control of flow in robust systems//Norberg J, Cumming G, eds. *Complexity Theory for a Sustainable Future*. New York: Columbia Press, 2008.
- [13] Borgatti S P, Mehra A, Brass D J, Labianca G. Network analysis in the social sciences. *Science*, 2009, 323(5916): 892-895.
- [14] 李中才,徐俊艳,吴昌友,张漪. 生态网络分析方法研究综述. *生态学报*, 2011, 31(18): 5396-5405.
- [15] Wasserman S, Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 219-220.
- [16] Hauck J, Schmidt J, Werner A. Using social network analysis to identify key stakeholders in agricultural biodiversity governance and related land-



- use decisions at regional and local level. *Ecology and Society*, 2016, 21(2): 49.
- [17] Granovetter M S. The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, 1973, 78(6): 1360–1380.
- [18] 张妍, 郑宏媚, 陆韩静. 城市生态网络分析研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 4258–4267.
- [19] 殷炳超, 何书言, 李艺, 李杨帆. 基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究. *生态学报*, 2018, 38(12): 4373–4382.
- [20] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042–1050.
- [21] Proulx S R, Promislow D E L, Phillips P C. Network thinking in ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(6): 345–353.
- [22] Ings T C, Montoya J M, Bascompte J, Blüthgen N, Brown L, Dormann C F, Edwards F, Figueroa D, Jacob U, Jones J I, Lauridsen R B, Ledger M E, Lewis H M, Olesen J M, Van Veen F J F, Warren P H, Woodward G. Review: Ecological networks – beyond food webs. *Journal of Animal Ecology*, 2009, 78(1): 253–269.
- [23] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23(4): 399–417.
- [24] Montoya J M, Pimm S L, Solé R V. Ecological networks and their fragility. *Nature*, 2006, 442(7100): 259–264.
- [25] Zhao Y, Wei Y P, Wu B F, Lu Z X, Fu L. A connectivity-based assessment framework for river basin ecosystem service management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 34–41.
- [26] Newman L L, Dale A. Network structure, diversity, and proactive resilience building: a response to tompkins and adger. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): r2.
- [27] The QUINTESENCE Consortium. Networking our way to better ecosystem service provision. *Trends in Ecology & Evolution*, 2016, 31(2): 105–115.
- [28] Hauck J, Stein C, Schiffer E, Vandewalle M. Seeing the forest and the trees: facilitating participatory network planning in environmental governance. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 400–410.
- [29] Cumming G S, Bodin Ö, Ernstson H, Elmqvist T. Network analysis in conservation biogeography: challenges and opportunities. *Diversity and Distributions*, 2010, 16(3): 414–425.
- [30] Baird J, Jollineau M, Plummer R, Valenti J. Exploring agricultural advice networks, beneficial management practices and water quality on the landscape: a geospatial social-ecological systems analysis. *Land Use Policy*, 2016, 51: 236–243.
- [31] Gonzalès R, Parrott L. Network theory in the assessment of the sustainability of social-ecological systems. *Geography Compass*, 2012, 6(2): 76–88.
- [32] Janssen M A, Bodin Ö, Anderies J, Elmqvist T, Ernstson H, McAllister R R J, Olsson P, Ryan P. Toward a network perspective of the study of resilience in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 15.
- [33] Dee L E, Allesina S, Bonn A, Eklöf A, Gaines S D, Hines J, Jacob U, McDonald-Madden E, Possingham H, Schröter M, Thompson R M. Operationalizing network theory for ecosystem service assessments. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(2): 118–130.
- [34] Bodin Ö, Alexander S M, Baggio J, Barnes M L, Berardo R, Cumming G S, Dee L E, Fischer A P, Fischer M, Garcia M M, Guerrero A M, Hileman J, Ingold K, Matous P, Morrison T H, Nohrstedt D, Pittman J, Robins G, Sayles J S. Improving network approaches to the study of complex social-ecological interdependencies. *Nature Sustainability*, 2019, 2(7): 551–559.
- [35] Bodin Ö, Tengö M. Disentangling intangible social-ecological systems. *Global Environmental Change*, 2012, 22(2): 430–439.
- [36] Christensen N L, Bartuska A M, Brown J H, Carpenter S, D'Antonio C, Francis R, Franklin J F, Macmahon J A, Noss R F, Parsons D J, Peterson C H, Turner M G, Woodmansee R G. The report of the ecological society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, 1996, 6(3): 665–691.
- [37] Bodin Ö, Crona B I. Management of natural resources at the community level: exploring the role of social capital and leadership in a rural fishing community. *World Development*, 2008, 36(12): 2763–2779.
- [38] Bodin Ö, Crona B I. The role of social networks in natural resource governance: what relational patterns make a difference? *Global Environmental Change*, 2009, 19(3): 366–374.
- [39] Groce J E, Farrelly M A, Jørgensen B S, Cook C N. Using social-network research to improve outcomes in natural resource management. *Conservation Biology*, 2019, 33(1): 53–65.
- [40] Barnes M L, Lynham J, Kalberg K, Leung P. Social networks and environmental outcomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(23): 6466–6471.
- [41] Moeliono M, Gallemore C, Santoso L, Brockhaus M, Di Gregorio M. Information networks and power: confronting the "wicked problem" of REDD + in Indonesia. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): 9.
- [42] Lauer M, Matera J. Who detects ecological change after catastrophic events? indigenous knowledge, social networks, and situated practices. *Human Ecology*, 2016, 44(1): 33–46.
- [43] Fliervoet J M, Geerling G W, Mostert E, Smits A J M. Analyzing collaborative governance through social network analysis: a case study of river management along the Waal River in The Netherlands. *Environmental Management*, 2016, 57(2): 355–367.
- [44] Rocchi M, Scotti M, Micheli F, Bodini A. Key species and impact of fishery through food web analysis: a case study from Baja California Sur, Mexico. *Journal of Marine Systems*, 2017, 165: 92–102.
- [45] Ortiz M, Rodriguez-Zaragoza F, Hermosillo-Nuñez B, Jordán F. Control strategy scenarios for the alien lionfish *Pterois volitans* in Chinchorro Bank (Mexican Caribbean): based on semi-quantitative loop analysis. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0130261.
- [46] Vasas V, Jordán F. Topological keystone species in ecological interaction networks: considering link quality and non-trophic effects. *Ecological*

- Modelling, 2006, 196( 3/4 ): 365–378.
- [47] Leventon J, Schaal T, Velten S, Dänhardt J, Fischer J, Abson D J, Newig J. Collaboration or fragmentation? Biodiversity management through the common agricultural policy. *Land Use Policy*, 2017, 64: 1–12.
- [48] Levine J, Muthukrishna M, Chan K, Satterfield T. Theories of the deep: combining salience and network analyses to produce mental model visualizations of a coastal British Columbia food web. *Ecology and Society*, 2015, 20( 4 ): 42.
- [49] Bodin Ö, Robins G, McAllister R, Guerrero A, Crona B, Tengö M, Lubell M. Theorizing benefits and constraints in collaborative environmental governance: a transdisciplinary social-ecological network approach for empirical investigations. *Ecology and Society*, 2016, 21( 1 ): 40.
- [50] Baggio J A, Hillis V. Managing ecological disturbances: learning and the structure of social-ecological networks. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 109: 32–40.
- [51] Ernstson H, Barthel S, Andersson E, Borgström S. Scale-crossing brokers and network governance of urban ecosystem services: the case of Stockholm. *Ecology and Society*, 2010, 15( 4 ): 28.
- [52] Barnes M L, Bodin Ö, McClanahan T R, Kittinger J N, Hoey A S, Gaoue O G, Graham N A J. Social-ecological alignment and ecological conditions in coral reefs. *Nature Communications*, 2019, 10( 1 ): 2039.
- [53] Zador S G, Gaichas S K, Kasperski S, Ward C L, Blake R E, Ban N C, Himes-Cornell A, Koehn J Z. Linking ecosystem processes to communities of practice through commercially fished species in the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science*, 2017, 74( 7 ): 2024–2033.
- [54] Kivelä M, Arenas A, Barthelemy M, Gleeson J P, Moreno Y, Porter M A. Multilayer networks. *Journal of Complex Networks*, 2014, 2( 3 ): 203–271.
- [55] Xiu N, Ignatieva M, Van Den Bosch C K, Chai Y Y, Wang F, Cui T F, Yang F P. A socio-ecological perspective of urban green networks: the Stockholm case. *Urban Ecosystems*, 2017, 20( 4 ): 729–742.
- [56] González-Mon B, Bodin Ö, Crona B, Nenadovic M, Basurto X. Small-scale fish buyers' trade networks reveal diverse actor types and differential adaptive capacities. *Ecological Economics*, 2019, 164: 106338.
- [57] Haak D M, Fath B D, Forbes V E, Martin D R, Pope K L. Coupling ecological and social network models to assess “transmission” and “contagion” of an aquatic invasive species. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190: 243–251.
- [58] Enqvist J P, Tengö M, Bodin Ö. Are bottom-up approaches good for promoting social-ecological fit in urban landscapes? *Ambio*, 2020, 49( 1 ): 49–61.
- [59] Easdale M H, Aguiar M R, Paz R. A social-ecological network analysis of Argentinean Andes transhumant pastoralism. *Regional Environmental Change*, 2016, 16( 8 ): 2243–2252.
- [60] Mokross K, Ryder T B, Côrtes M C, Wolfe J D, Stouffer P C. Decay of interspecific avian flock networks along a disturbance gradient in Amazonia. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 281( 1776 ): 20132599.
- [61] Calder J L, Cumming G S, Maciejewski K, Oschadlous H D. Urban land use does not limit weaver bird movements between wetlands in Cape Town, South Africa. *Biological Conservation*, 2015, 187: 230–239.
- [62] Aly S S A, Amer M S E. Green Corridors as a response for nature: greening Alexandria city by creating a green infrastructure network. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2010, 138: 101–117.
- [63] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 成方妍, 张月秋, 董世魁. 景观生态网络研究进展. *生态学报*, 2017, 37( 12 ): 3947–3956.
- [64] Ossola A, Locke D, Lin B, Minor E. Yards increase forest connectivity in urban landscapes. *Landscape Ecology*, 2019, 34( 12 ): 2935–2948.
- [65] Ekstrom J A, Young O R. Evaluating functional fit between a set of institutions and an ecosystem. *Ecology and Society*, 2009, 14( 2 ): 16.
- [66] Banerjee A, Banerjee M, Mukherjee J, Rakshit N, Ray S. Trophic relationships and ecosystem functioning of Bakreswar Reservoir, India. *Ecological Informatics*, 2016, 36: 50–60.
- [67] Dimitriadis C, Borthagaray A I, Vilela R, Casadevall M, Carranza A. A network approach to by-catch in a multi-species Mediterranean small-scale fishery. *Fisheries Research*, 2016, 173: 273–281.
- [68] Moreno J L, Jennings H H. Statistics of social configurations. *Sociometry*, 1938, 1( 3/4 ): 342–374.
- [69] Kininmonth S, Bergsten A, Bodin Ö. Closing the collaborative gap: aligning social and ecological connectivity for better management of interconnected wetlands. *AMBIO*, 2015, 44( 1 ): 138–148.
- [70] Bergsten A, Jiren T S, Leventon J, Dorresteijn I, Schultner J, Fischer J. Identifying governance gaps among interlinked sustainability challenges. *Environmental Science & Policy*, 2019, 91: 27–38.
- [71] Bodin Ö, Crona B, Thyresson M, Golz A L, Tengö M. Conservation success as a function of good alignment of social and ecological structures and processes. *Conservation Biology*, 2014, 28( 5 ): 1371–1379.
- [72] Lusher D, Koskinen J, Robins G. *Exponential Random Graph Models for Social Networks: Theory, Methods, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [73] Baggio J A, Burnsilver S B, Arenas A, Magdanz J S, Kofinas G P, Domenico M D. Multiplex social ecological network analysis reveals how social changes affect community robustness more than resource depletion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113( 48 ): 13708–13713.
- [74] Hanneke S, Fu W J, Xing E P. Discrete temporal models of social networks. *Electronic Journal of Statistics*, 2010, 4: 585–605.
- [75] Guerrero A M, Bodin Ö, McAllister R R J, Wilson K A. Achieving social-ecological fit through bottom-up collaborative governance: an empirical

- investigation. *Ecology and Society*, 2015, 20(4): 41.
- [76] Wang P, Robins G, Matous P. Multilevel network analysis using ERGM and its extension//Lazega E, Snijders T A B, eds. *Multilevel Network Analysis for the Social Sciences: Theory, Methods and Applications*. Cham: Springer, 2016: 125-143.
- [77] Chopra S S, Khanna V. Understanding resilience in industrial symbiosis networks: insights from network analysis. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141: 86-94.
- [78] Larson S, Alexander K S, Djalante R, Kirono D G C. The added value of understanding informal social networks in an adaptive capacity assessment: explorations of an urban water management system in indonesia. *Water Resources Management*, 2013, 27(13): 4425-4441.
- [79] Sayles J S, Baggio J A. Social-ecological network analysis of scale mismatches in estuary watershed restoration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(10): E1776-E1785.
- [80] Lubell M, Jasny L, Hastings A. Network governance for invasive species management. *Conservation Letters*, 2017, 10(6): 699-707.
- [81] Yletyinen J, Hentati-Sundberg J, Blenckner T, Bodin Ö. Fishing strategy diversification and fishers' ecological dependency. *Ecology and Society*, 2018, 23(3): 28.
- [82] Cumming G S, Cumming D H M, Redman C L. Scale mismatches in social-ecological systems: causes, consequences, and solutions. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 14.
- [83] Epstein G, Pittman J, Alexander S M, Berdej S, Dyck T, Kreitmair U, Rathwell K J, Villamayor-Tomas S, Vogt J, Armitage D. Institutional fit and the sustainability of social-ecological systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 34-40.
- [84] Folke C, Pritchard Jr L, Berkes F, Colding J, Svedin U. The problem of fit between ecosystems and institutions: ten years later. *Ecology and Society*, 2007, 12(1): 30.
- [85] Wang S, Fu B J, Bodin Ö, Liu J G, Zhang M M, Li X Y. Alignment of social and ecological structures increased the ability of river management. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1318-1324.
- [86] Zhang M M, Wang S, Fu B J, Wei X H, Wang C, Song S, Wei F L. Structure disentanglement and effect analysis of the arid riverscape social-ecological system using a network approach. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5159.
- [87] Beever E A, Simberloff D, Crowley S L, Al-Chokhachy R, Jackson H A, Petersen S L. Social-ecological mismatches create conservation challenges in introduced species management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(2): 117-125.
- [88] Guerrero A M, McAllister R R J, Corcoran J, Wilson K A. Scale mismatches, conservation planning, and the value of social-network analyses. *Conservation Biology*, 2013, 27(1): 35-44.
- [89] Bergsten A, Galafassi D, Bodin Ö. The problem of spatial fit in social-ecological systems: detecting mismatches between ecological connectivity and land management in an urban region. *Ecology and Society*, 2014, 19(4): 6.
- [90] Hamilton M, Fischer A P, Ager A. A social-ecological network approach for understanding wildfire risk governance. *Global Environmental Change*, 2019, 54: 113-123.
- [91] Folke C, Hahn T, Olsson P, Norberg J. Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30(1): 441-473.
- [92] Bodin Ö. Collaborative environmental governance: achieving collective action in social-ecological systems. *Science*, 2017, 357(6352): eaan1114.
- [93] Weiss K, Hamann M, Kinney M, Marsh H. Knowledge exchange and policy influence in a marine resource governance network. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 178-188.
- [94] Vignola R, McDaniels T L, Scholz R W. Governance structures for ecosystem-based adaptation: Using policy-network analysis to identify key organizations for bridging information across scales and policy areas. *Environmental Science & Policy*, 2013, 31: 71-84.
- [95] Berdej S M, Armitage D R. Bridging organizations drive effective governance outcomes for conservation of indonesia's marine systems. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0147142.
- [96] Bodin Ö, Sandström A, Crona B. Collaborative networks for effective ecosystem-based management: a set of working hypotheses. *Policy Studies Journal*, 2017, 45(2): 289-314.
- [97] Crona B, Bodin Ö. WHAT you know is WHO you know? Communication patterns among resource users as a prerequisite for co-management. *Ecology and Society*, 2006, 11(2): 7.
- [98] Hirschi C. Strengthening regional cohesion: collaborative networks and sustainable development in swiss rural areas. *Ecology and Society*, 2010, 15(4): 16.
- [99] 王宁馨. 社会-生态网络分析视角下的兰州市公园管理耦合模式研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [100] Österblom H, Folke C. Emergence of global adaptive governance for stewardship of regional marine resources. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): 4.
- [101] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 王亚萍. 黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性. *资源科学*, 2020, 42(1): 96-103.
- [102] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 陈海滨, 刘焱序, 赵文武. 社会-生态系统适应性治理研究进展与展望. *地理学报*, 2019, 74(11): 2401-2410.