



DOI: 10.5846/stxb202208212395

王晗,张丹妮,华廷,赵宇豪,王振宇,吴健生.社会-生态系统:研究态势、主题演进与地域实践.生态学报,2023,43(15):6499-6513.

社会-生态系统:研究态势、主题演进与地域实践

王 晗^{1,2},张丹妮¹,华 廷³,赵宇豪^{1,2},王振宇¹,吴健生^{1,2,*}

1 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室,深圳 518055

2 北京大学城市与环境学院地表过程与模拟教育部重点实验室,北京 100871

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-生态系统综合了人类社会治理与自然环境利用研究视角,为解决全球生态问题提供新途径,是人地系统研究的热点。梳理和归纳社会-生态系统研究的发展历程和近今态势,总结前沿议题和地域实践,对人地系统耦合研究和可持续发展具有重要意义。主要发现如下:社会-生态系统研究领域整体发文量较少,发展阶段受国际重要研究计划和组织的直接影响;欧洲、北美洲和澳大利亚的高校、研究所和政府机构是领域内的主要研究力量,核心作者间合作紧密;我国社会-生态系统研究受资助力度逐年增加,研究内容不断深入,但在国际相关学术话语体系构建和关键作用发挥上仍有较大提升空间。社会-生态系统具有复杂性、地域性和动态性等特点,研究内容涵盖自然生态系统、气候变化、土地利用、社会治理与管理政策等主题,是综合了环境科学、生态学、地理学等自然科学与经济学、政治学和社会学等社会科学的多学科交叉领域;以脆弱性和韧性研究为起点,社会-生态系统研究的发展受到诸多人地关系研究工作的启发和推动,Olsson 的动态连接分析、Redman 的社会模式与过程和生态格局与过程、Ostrom 的公共资源治理是目前影响较广的三个社会-生态系统研究框架。扰沌为解释社会-生态系统快速与慢速交互作用、局部与全球适应性变化提供理论基础,干扰响应机制、系统自组织过程、学习与适应性治理成为社会-生态系统研究核心。海岸带、干旱区和城市等生态环境与社会环境敏感区是社会-生态系统研究最受关注的地域。未来的工作应注重结合我国广泛的地域实践,推动社会-生态系统的理论与方法体系的完善。相关发现为社会-生态系统领域凝炼研究方向和深化科学问题提供了参考。

关键词:人地关系;社会-生态系统;理论研究;地域实践;文献计量

人类活动对自然环境产生全球性影响是人类世的显著特征^[1-2]。城市化驱动下的土地利用与土地覆被变化^[3]影响了地表侵蚀^[4]、沉积^[5]、水循环^[6]等诸多自然过程,化石燃料燃烧造成的人为温室气体排放加剧了全球气候变暖^[7-8],农业活动尤其是化肥的广泛使用改变了氮、磷、硫等元素在全球生物地球化学循环中传输与转化的速率^[9-10]。陆地与海洋生态系统吸收了将近一半的人为碳排放,但在气候变化与人为因素共同作用下面临新的演化压力^[11-12],生物多样性丧失与生态系统退化的风险不断增加^[13-16]。日益严峻的全球环境问题成为人类可持续发展面临的重大挑战^[17]。

长期以来,人地系统研究关注从生态系统、社会系统的多个层面描述和解析自然环境与人类社会的交互作用。但全球性的环境变化问题进一步凸显了人地作用的复杂过程和机理^[18],人地关系的综合协调仍然面临着生态系统保护与社会系统治理两者系统性与整体性不足的难题。社会-生态系统(Social-ecological Systems, SESs)是近年来人地系统研究的热点视角^[19],其尝试将自然环境与人类社会刻画为复杂耦合的整体系统。以脆弱性^[20-21]、韧性^[22]与适应性^[23-24]为切入点的研究工作指出了社会-生态系统适应性治理的途

基金项目:国家自然科学基金项目(42130505)

收稿日期:2022-08-21; 采用日期:2022-10-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wujs@pkusz.edu.cn

径^[25],强调了建立具有适应性的社会权利分配与行为决策机制^[26],为缓解生态系统退化^[27]、恢复生态系统功能和服务^[28]、解决社会贫困^[29]等诸多跨系统问题提供了解决方案。

国外较早地围绕社会-生态系统开展理论和实践研究,而国内近年来开始针对具体区域问题开展系列探索,但相关工作仍处于起步阶段,且社会-生态系统领域整体发展态势与热点内容的总结工作仍不多见。为此,本文从社会-生态系统的相关文献分析出发,对其研究领域的发展历程、近今态势和前沿议题进行归纳,总结现有研究的理论基础和地域实践,以期凝炼社会-生态系统相关领域的研究方向和深化科学问题提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

Web of Science (WoS) (<https://www.webofscience.com/>)收录了世界范围内各学科领域的优秀期刊,能够及时反映科学发展的前沿态势^[30]。本文限定检索范围为 WoS 核心合集 (SCIE、SSCI、AHCI、ESCI) 和中国科学引文数据库 (CSCD),以“Social-Ecological Systems (Social-Ecological)”为主题词,文献类型为 Article 和 Review Article。截至 2022 年 5 月 18 日,共检索到 6835 篇文献。

中国国家自然科学基金委员会通过有计划的资助体系推动了我国科技创新尤其是基础研究的发展,其资助倾向反映了国家层面对科学发展的需求^[31]。以“社会-生态系统”为主题词,对 2021 年及以前历年资助项目进行检索 (<https://isisn.nsf.gov.cn/>),经筛选去除医学、心理学等领域不相关的少量结果,共检索到 43 个社会-生态系统主题的研究项目。

1.2 统计分析

本文利用 WoS 检索文献的题录字段(题目、作者、单位、关键词、资助基金、引文信息等)与 NSFC 资助项目的外部特征字段(项目名称、负责人、依托单位、项目类型、资助金额、项目摘要等)开展数量统计与趋势分析,以明确社会-生态系统研究的主要态势和热点内容。

1.3 共现网络与词频分析

本文以共同出现在文献中的作者、关键词、单位等关注项为网络节点,关注项共现频数作为网络的边,构建共现网络^[32]对社会-生态系统研究文献的作者、主题、发文机构及其相互联系进行量化分析,共现网络分析在荷兰莱顿大学 Eck 和 Waltman 开发的 VOSviewer 软件^[33]中进行。关键词频数能够反映一段或多段文本的主题分布^[34],本文通过 Python 脚本对 NSFC 资助的社会-生态系统研究项目的名称、摘要等内容进行分词和词频统计,以分析 NSFC 资助研究项目关注主题的演变。

2 社会-生态系统研究态势

2.1 社会-生态系统研究发文特点

2.1.1 文献发表趋势

社会-生态系统研究在 WoS 核心合集检索到相关文献 6595 篇,占比 96.5%,在 CSCD 检索到 240 篇,占比 3.5%。该领域文献最早发表于 1977 年,截至检索日,年均发文量约 149 篇,整体发文量较少。

社会-生态系统研究领域的形成与发展过程和国际组织发起的重要研究计划密切相关。随着国际性科学合作进程的推进,社会-生态系统研究的文献发表数量呈现了明显的三阶段特征(图 1),即萌芽阶段(1977—2001 年)、起步阶段(2002—2009 年)、发展阶段(2010 年至今)。研究议题最初以气候变化为起点关注全球变化等自然科学问题,后逐渐演变为关注人类世全球变化的驱动力、全球环境变化对人类福祉影响、缓解与适应全球变化等自然科学与社会科学融合的综合问题。

2.1.2 文献学科分布

以我国国务院学位委员会学科二级分类标准来看,社会-生态系统研究受到自然科学和社会科学多个学

科的广泛关注(图 2),其中来源于环境科学与工程、生态学、地理学三个学科文献发表数量与引用数量最高。生态学、可持续性科学、环境科学和管理政策等主题的国际期刊发表了最多的文献(表 1)。相关文献的

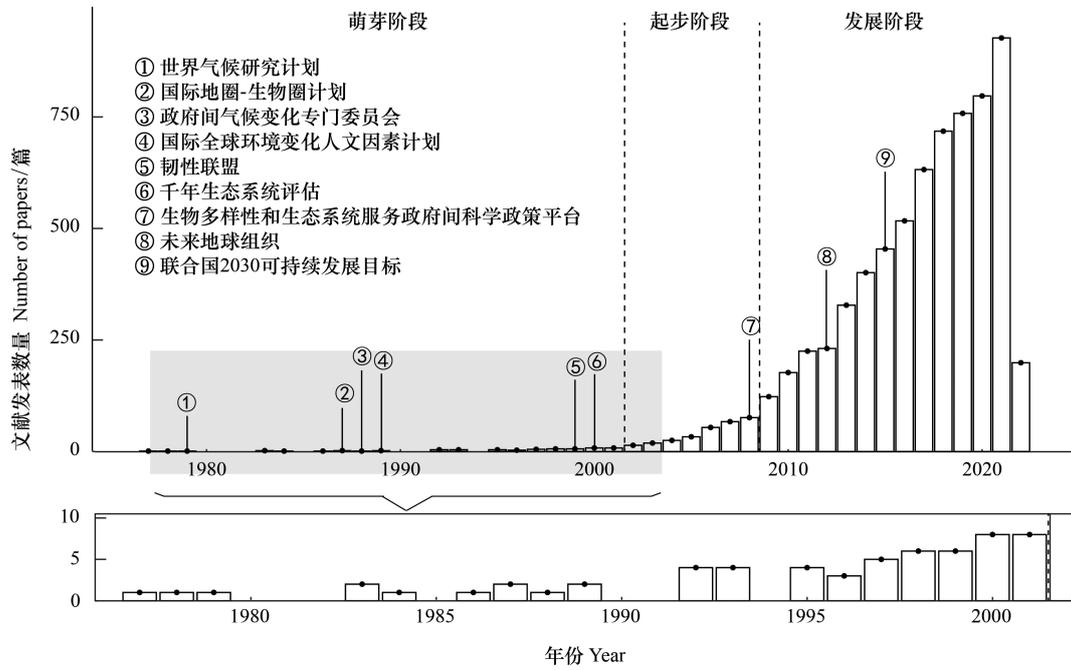


图 1 社会-生态系统研究论文发表趋势

Fig.1 Publication trends of social-ecological systems research papers

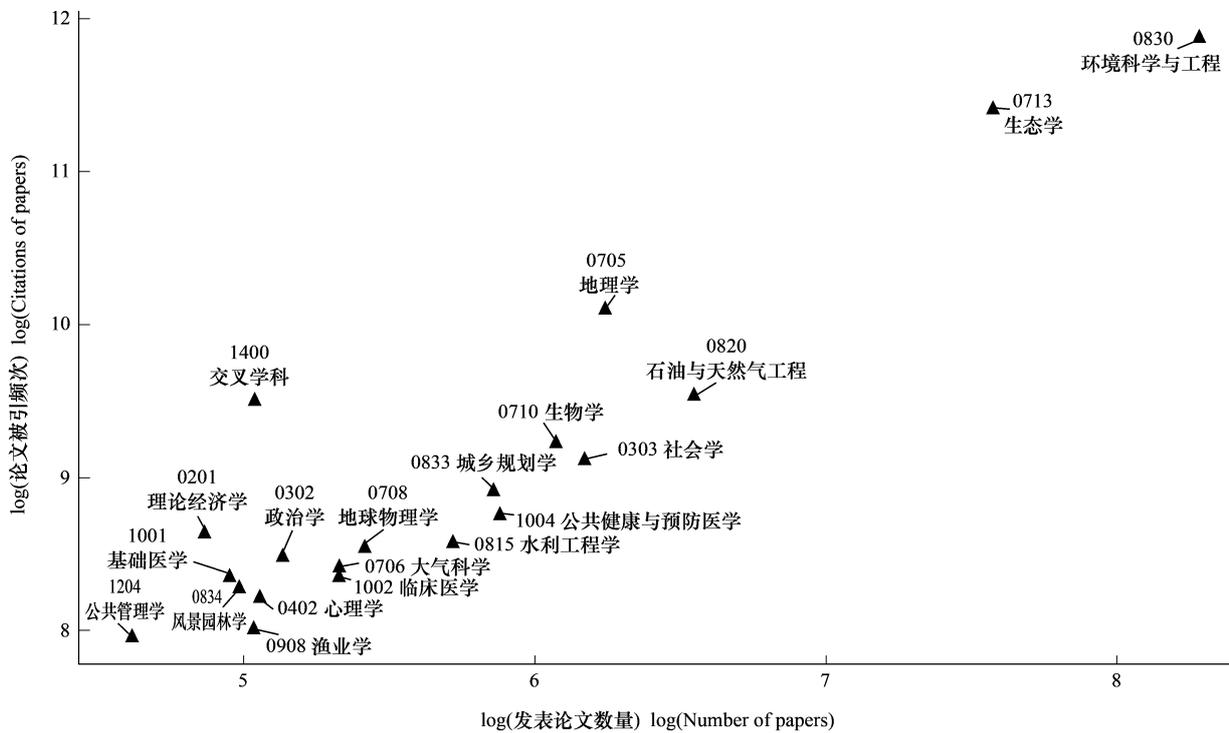


图 2 社会-生态系统论文发表与被引前 20 学科

Fig.2 Top 20 disciplines for publication and citation of social-ecological systems research papers

学科分布与期刊主题,凸显了社会-生态系统研究领域的学科交叉特点。

表 1 社会-生态系统研究论文主要来源期刊

Table 1 The primary source journals for the literature on social-ecological systems research topics

序号 No.	期刊名称 Journal	论文数量 Number of papers	序号 No.	期刊名称 Journal	论文数量 Number of papers
1	Ecology and Society	827	11	Ecological Economics	82
2	Sustainability	248	12	Land Use Policy	80
3	Global Environmental Change Human and Policy Dimensions	119	13	Ocean Coastal Management	80
4	Marine Policy	119	14	Ecosystem Services	79
5	Environmental Science Policy	102	15	International Journal of the Commons	76
6	AMBIO	99	16	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	74
7	Sustainability Science	97	17	Plos One	73
8	Journal of Environmental Management	93	18	Science of the Total Environment	69
9	Regional Environmental Change	92	19	Society and Natural Resources	65
10	Current Opinion in Environmental Sustainability	82	20	Environmental Management	58

2.2 社会-生态系统研究力量现状

全球形成了欧洲(瑞典、荷兰、法国、德国等国家)、北美洲(美国、加拿大)和澳大利亚三个社会-生态系统研究核心地区(图 3),上述地区的高校、科研院所、公益组织和政府机构是累计发文量前 20 的来源单位。

选择发文量与引用量均 ≥ 10 篇的前 300 个机构分析社会-生态系统研究的全球机构合作网络(图 4)。可以发现:主要发文机构中的斯德哥尔摩大学、亚利桑那州立大学、詹姆斯库克大学与昆士兰大学、英属哥伦比亚大学和滑铁卢大学是目前全球社会-生态系统研究机构合作网络的四个主要核心,巴塞罗那自治大学,莱布尼茨海洋科学研究所、波恩大学、清迈大学,中国科学院等为次一级核心。

以发文量和被引量均 ≥ 10 篇的发文作者构建全球作者合作网络(图 4),结果显示全球社会-生态系统领域的研究者之间存在着紧密的合作关系。但合作网络中华人作者或在国内单位就职的作者人员数量极少,表明我国科研力量尚未在国际社会-生态系统研究领域发挥重要作用。同时,统计得到社会-生态系统研究领域中文发文量前 10 的作者(表 2),国内研究的中文文献数量也较少,累计发文量尚不足百篇。

表 2 社会-生态系统研究中文文献的前 10 作者

Table 2 Top 10 authors of the Chinese papers on social-ecological systems research

序号 No.	作者 Author	所属机构 Institution	论文数量 Number of papers	序号 No.	作者 Author	所属单位 Institution	论文数量 Number of papers
1	杨新军	西北大学	18	6	周立华	中国科学院科技战略咨询研究院	6
2	刘焱序	北京师范大学	10	7	闵庆文	中国科学院地理科学与资源研究所	6
3	王俊	西北大学	8	8	傅伯杰	中国科学院生态环境研究中心	5
4	何思源	中国科学院地理科学与资源研究所	6	9	彭建	北京大学	5
5	刘文兆	中国科学院水利部水土保持研究所	6	10	李文军	北京大学	4

2.3 社会-生态系统研究资助趋势

2.3.1 社会-生态系统研究主要资助来源

社会-生态系统研究领域的发展与其受资助的方式与力度密切相关,多元化的资助体系是国际社会-生态系统研究迅速发展的重要支撑。根据统计得到的文章发表量前 20 的资助来源机构(表 3),北美洲、欧洲、澳大利亚等地区的资助机构数量最多。国际上相关资助机构类型多样,既有基础研究部门,也有各国政府业务部门和国际公益性研究组织,我国目前则主要依靠国家自然科学基金委员会的资助。

- (1) 斯德哥尔摩大学
- (2) 欧洲研究型大学联盟
- (3) 加州大学系统
- (4) 亚利桑那州立大学
- (5) 亚利桑那州立大学坦佩分校
- (6) 詹姆斯库克大学
- (7) 瓦格宁根大学
- (8) 法国国家科学研究中心
- (9) 联邦科学与工业研究组织
- (10) 弗洛里达州立大学系统
- (11) 法国研究型大学联盟
- (12) 国际农业研究磋商小组
- (13) 英属哥伦比亚大学
- (14) 昆士兰大学
- (15) 科罗拉多州立大学
- (16) 亥姆霍兹联合会
- (17) 滑铁卢大学
- (18) 法国农业、食品、环境研究所
- (19) 美国农业部
- (20) 印第安纳州立大学系统

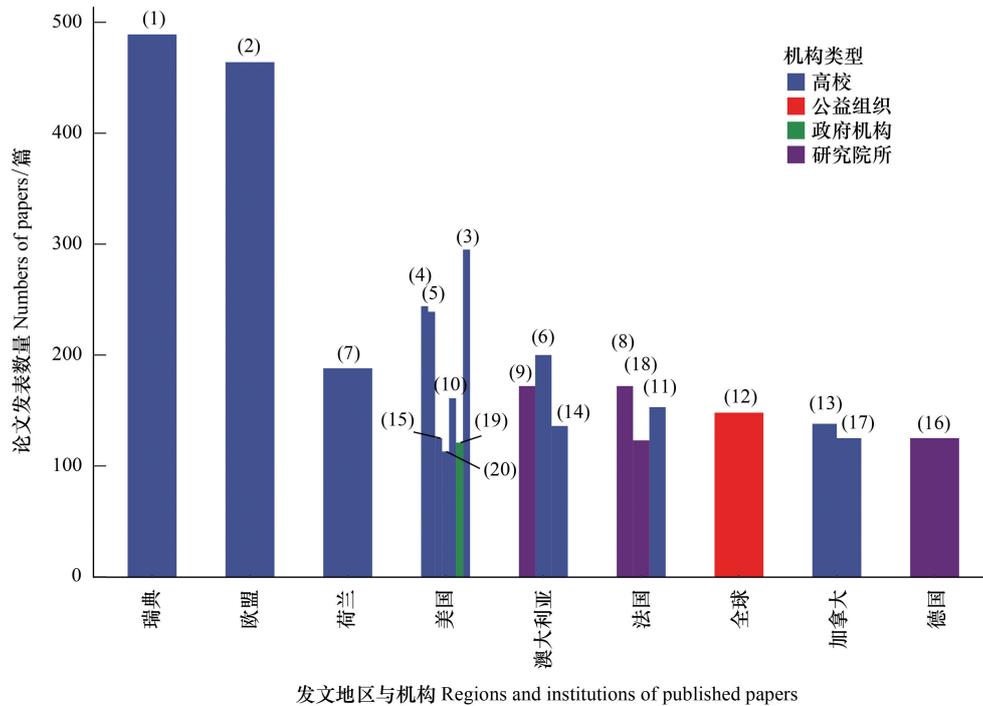


图 3 社会-生态系统研究发文量前 20 的机构及所属地区

Fig.3 Regions of the top 20 institutions on social-ecological systems research papers

表 3 社会-生态系统研究论文的前 20 资助来源机构

Table 3 Top 20 funding institutions of the papers on social-ecological systems research

序号 No.	资助来源机构 Institution	论文数量 Number of papers	序号 No.	资助来源机构 Institution	论文数量 Number of papers
1	美国国家自然科学基金委员会	626	11	国际农业研究磋商小组	122
2	欧盟委员会	328	12	美国国家自然科学基金委员会生物科学分部	115
3	瑞典研究理事会	209	13	美国国立卫生研究院	110
4	英国研究创新署	193	14	加拿大科学与工程研究理事会	105
5	中国国家自然科学基金委员会	158	15	英国研究创新署经济与社会研究理事会	90
6	加拿大社会科学与人文学研究理事会	144	16	欧洲研究理事会	85
7	澳大利亚研究理事会	131	17	法国国家研究署	85
8	英国自然环境研究理事会	128	18	美国农业部	85
9	德国联邦教育研究部	127	19	澳大利亚政府	75
10	美国卫生与公共服务部	126	20	德国研究基金会	75

2.3.2 中国国家自然科学基金资助趋势

国内社会-生态系统研究历史受资助数量和力度均较低,但近年来上升趋势显著(图 5)。NSFC 对社会-生态系统研究的资助起步于西北大学王俊 2005 和 2006 年主持的青年科学基金项目和国际(地区)合作与交流项目;到 2010 年,NSFC 相关项目资助数量和力度才开始持续增加。2019 年以前,以青年科学基金、面上项

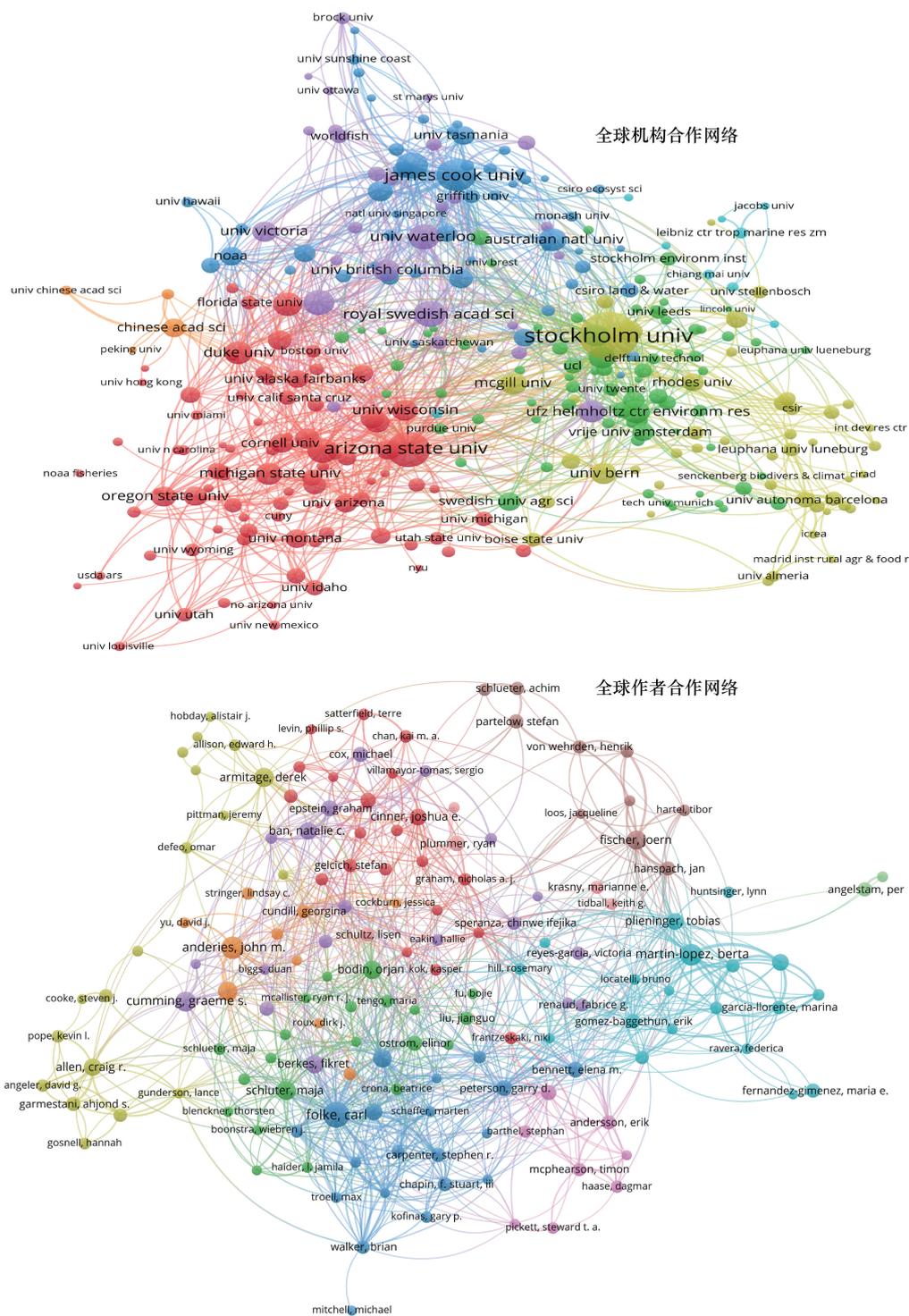


图 4 社会-生态系统研究主要机构作者合作网络

Fig.4 Collaborative networks of social-ecological systems research institutions and authors

目、地区科学基金等为主的资助类型表明 NSFC 对社会-生态系统探索性研究的鼓励。2019 年以来,由中国科学院环境生态中心傅伯杰和孙然好、北京大学王仰麟等团队牵头主持的重点项目、联合基金项目等受到资助,一定程度上表明社会-生态系统研究已开始成为优先发展领域和学科发展重点。

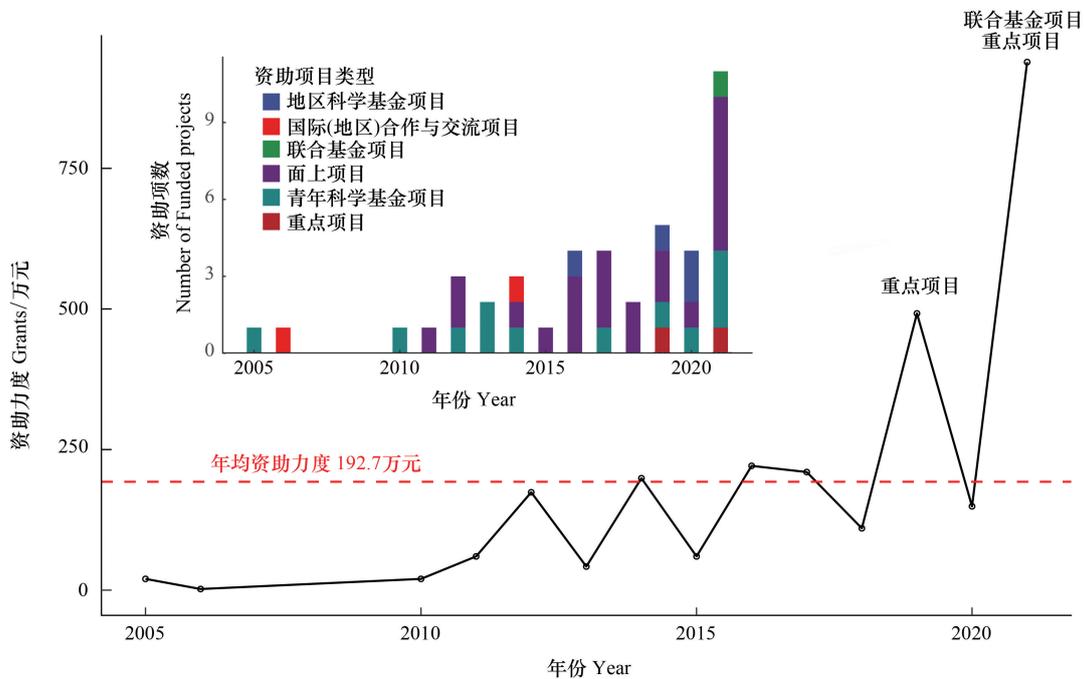


图5 国家自然科学基金委(NSFC)对社会-生态系统研究项目的年资助趋势

Fig.5 Annual trends of social-ecological systems research projects funded by the National Natural Science Foundation of China

3 社会-生态系统主题演进

3.1 社会-生态系统研究关键词

3.1.1 已发表文献关键词共现网络

选择检索文献中累计出现频次 ≥ 20 的关键词作为关注项,构建社会-生态系统研究文献关键词共现网络(图6)。社会-生态系统研究涵盖了自然生态系统、气候变化、土地利用、治理与管理政策等诸多主题,核心关键词节点包括 Social-Ecological Systems(社会-生态系统)、Resilience(韧性)、Management(管理)、Sustainability(可持续性)、Governance(治理)、Conservation(保护)、Ecosystem Service(生态系统服务)、Adaptation(适应性)、Vulnerability(脆弱性)等。关键词共现网络表明人类社会系统治理与自然生态系统问题的综合是社会-生态系统研究的核心。以上述核心关键词为中心节点,形成了多个相对独立的关键词群,多样化且跨度较大的关键词群显示社会-生态系统研究领域具有综合性、复杂性和交叉性的特征。

3.1.2 国家自然科学基金项目词频

通过计算2005至2021年受NSFC资助的43项社会-生态系统研究项目的名称和摘要的分词词频,构建主题词云图(图6),以直观反映我国社会-生态系统研究中重点关注的议题。NSFC资助的研究项目侧重从脆弱性、适应性、恢复力、韧性等角度,解析社会-生态系统的结构和过程,进而对其演化、耦合、权衡等问题进行过程、机制、影响等综合研究。干旱区-半干旱区、海岸带、城市、乡村、旅游地、保护地、牧区、贫困山区、少数民族聚居区等生态环境脆弱或者社会环境特殊的区域为相关项目的主要案例地区,这显示了国内社会-生态系统研究问题的地域性和多样性。管理、合作、应对等适应性治理手段是国内社会-生态系统研究实践探索的主要出口。

3.2 社会-生态系统研究演进

3.2.1 社会-生态系统的概念内涵

地学领域的相关学科通过不同时空尺度的研究,逐步建立起涵盖大气、水、生物、陆地等子系统相互联系、

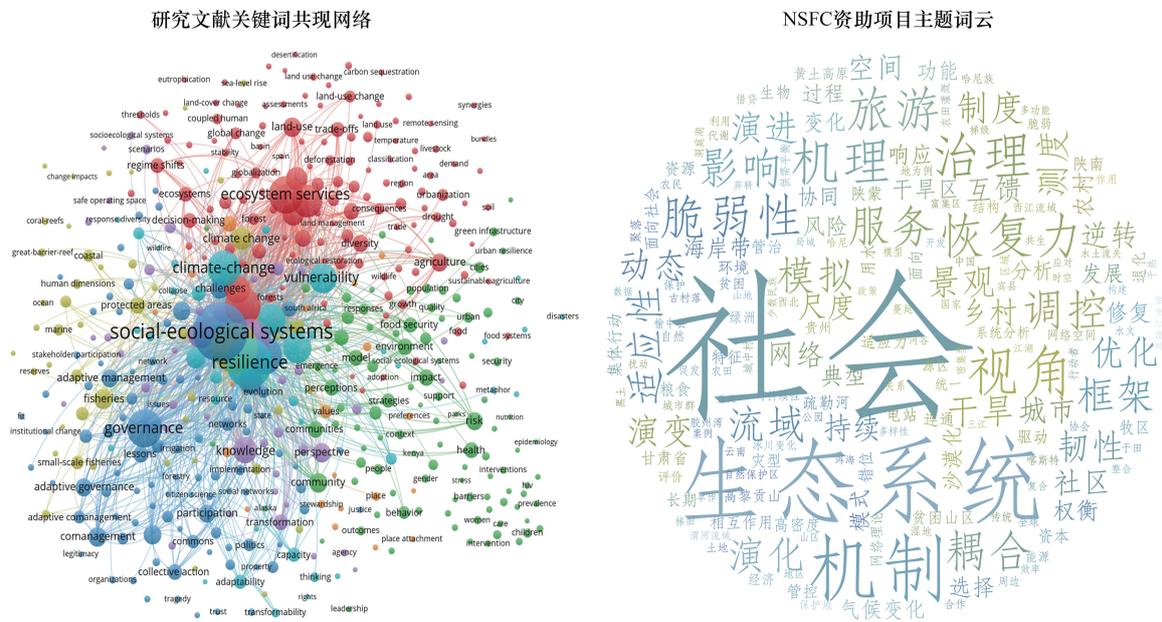


图 6 社会-生态系统研究文献关键词共现网络与 NSFC 资助项目主题词云图

Fig.6 Keywords co-occurrence network and of social-ecological systems research papers

相互作用机制的地球系统科学体系^[35-38],为认识人类与自然系统交互作用^[39-40],实现人类社会可持续发展提供支撑。在研究过程中,人(Man)、人类(Human)、社会(Society)、地球(Earth)、土地(Land)、自然(Nature)、环境(Environment)等词汇及其组合先后被作为本体来指代人地系统(表 4),但在各类研究中相关概念常被混用,不同表述的应用语境仍存着较大差异。随着人地关系认识的深入,系统要素相互依存、相互作用的关系以及错综复杂的系统过程逐渐被研究人员发现并得到重视,“社会-生态系统”的概念逐渐形成。社会-生态系统一词指的是社会系统与生态系统两者关联而成的人地系统,其中“社会”指代人类社会及其活动的本体,“生态”既指代自然生态系统本体,也指代社会系统和生态系统两者的作用过程^[41],是包含人地系统要素组成和其过程的综合性表述。

表 4 人类与自然系统的多样化概念表述及其内涵

Table 4 Diversified concepts and contexts of human and natural systems

概念表述 Concepts	常见应用语境及内涵 Contexts and Connotations
人地系统 ^[42] Human-Earth System	以人类活动为一方,以大气、岩石、水、生物、土壤等自然环境为另一方,表述两者在地球表层相互作用、相互调整、相互适应形成的复杂关系系统综合时使用,是最综合性的表述。
人类-环境 ^[43] Human-Environment	始于土地覆盖与土地利用变化(LUCC)研究,后内涵扩大,常在描述人类活动驱动的地球陆地表面变化对生态系统的结构和功能产生的作用时使用。
自然-社会 ^[44] Nature-Society	以人类围绕自然资源的社会活动建立了自然与社会的重要连接为前提,侧重于自然资源利用问题,在自然资源的资本化、不平衡发展、公地悲剧等研究中常常被使用。
社会-环境 ^[45] Socio-Environment	用于地理学、社会学、医学等领域,表达与研究问题相关的社会因素与自然因素时使用,如描述以人为核心的健康、疾病、文化等现象与所处地理环境关系等。
人类与自然耦合系统 ^[46] Coupled Human and Natural System	侧重于从复杂相互作用的角度表达人类与自然是一个由人与自然两个系统组成的整体,近似于人地系统的表达内涵,但是突出了两者的互相作用。

3.2.2 社会-生态系统的核心理论

社会-生态系统是一种兼具组分功能性(Constituted Relationally)、自适应能力(Adaptive Capacities)、动态交互性(Dynamic Interactions)、模糊边界性(Unclear Boundaries)、语境依赖性(Contextual Dependency)和复杂因果性(Complex Causality)等特性的复杂适应性系统(Complex Adaptive System, CAS)^[47]。为此,Holling 等从

系统科学的角度分析人类与自然演化过程,建立扰沌理论(Panarchy Theory)来解释人类与自然环境之间广泛发生的变化^[48]。扰沌理论包含了反馈循环、非线性、阈值、诧异、遗留影响与时间滞后、韧性与异质性等概念体系,为理解人类与自然系统复杂的相互作用,尤其是人地系统中快速与慢速的跨尺度交互、局部与全球变化提供了基础^[49]。

盆地模型^[50]和杯球模型^[51]等概念模型常被用来具象表达社会-生态系统的状态空间,系统外的作用被隐喻为引力,从而以机械运动的概念图形简化表达社会-生态系统面临干扰时的阈值效应^[52]和反馈机制^[53-54]。以此为基础,社会-生态系统理论研究围绕适应性变化(Adaptive Change)、学习(Learning)、转化力(Transformability)等隐喻(Metaphor)^[55]的数学描述和过程构建,形成了干扰响应、系统自组织、学习与适应性三个核心议题^[56-57]。单个适应性循环(Adaptive Cycle)由开发(r)、保护(K)、释放(Ω)和更新(α)四个基本阶段组成^[49]。多个快速与慢速的适应性循环在跨时空尺度的相互作用,通过记忆(Remember)和反抗(Revolt)的正负反馈发生联结,构成多层次的系统自组织、学习与适应过程,推动社会-生态系统体制转换(Regime Shift)的形成^[58]。

3.2.3 社会-生态系统的研究发展

社会-生态系统研究是贯穿和综合传统人地关系认识与研究发展的综合性领域。对社会系统与自然生态系统脆弱性(Vulnerability)、韧性(Resilience)的定性定量分析是社会-生态系统研究领域形成的起点。脆弱性研究始于社会科学,其关注特定地域的人类对灾害尤其是自然灾害的暴露^[59]、人类社会系统内部结构面对灾害或干扰的恢复力^[60]或韧性^[61],研究突变与压力导致的系统组分、结构及其状态的变化,侧重从消极角度衡量系统受到干扰后产生不利影响的程度^[62-63]。韧性研究源于生态学中对生态系统在应对变化时的适应性和维持性的关注^[64],是从积极角度对系统演变到新的状态之前可承受干扰、自我组织和适应新环境能力的量化^[65-66]。但从社会科学或者自然科学单一角度无法阐明人类与自然系统耦合与发展的复杂模式和过程^[67]。

最早,驱动力-压力-状态-影响-响应框架^[68]从人地相互作用因果链出发,奠定了人类活动与自然环境互动联系分析的经典框架。从自然生态系统对人类社会系统的作用角度,生态系统服务研究从经济学视角将自然环境提供的满足人类物质与精神需求的自然资源和生态过程抽象为生态系统服务,构建了自然生态系统对人类社会发展的价值核算理论与方法体系^[69-70]。面对复杂的人地矛盾,社会-经济-自然复合生态系统与人地关系地域系统等工作抓住粮食、能源、人口三个关键要素,从自然、经济和社会三个维度形成了对人地系统组分与结构还原论认知^[71],并逐步认识到地域特性是人类对自然投入与产出活动的显著特点^[72]。随后,生态足迹考虑人类社会系统对自然生态系统的影响,从特定地区人类生存和发展所依赖自然资源的消耗及自然环境对人类活动排放废物的消纳所需要的土地面积^[73]入手,建立了人类活动对自然生态系统影响状态评估的量化途径,同时资源环境适宜性与承载力^[74]、行星边界^[75-76]等研究工作从区域与全球角度提供了对自然资源约束与人类发展需求的状态分析工具。至此,人类社会系统与自然生态系统两者相互作用的量化成为人地关系研究的重点。

进一步地,以人地耦合圈层为代表的研究^[77-78]从供给与需求角度筛选表征指标来衡量自然生态系统与人类社会关系中的依赖、协调、促进的耦合程度。全球化进程中,人们逐渐认识到社会系统与自然生态系统除了在特定地点发生耦合作用也在区域与全球各个时空尺度上存在的复杂近-远距离关联。元耦合理论^[79]将系统内耦合与系统间的近、远程耦合相统一,建立了以发送系统、接收系统、外溢系统为主体,代理、流等为分析工具的人类与自然系统跨区域交互研究的方法体系。基于上述工作,同样关注人类社会对水资源、粮食、能源等关键需求的水-能-粮纽带研究^[80]重点考虑了相关社会过程对自然生态系统服务中的权衡(Trade-off)与协同(Synergy)关系,将人地关系的认知从还原认识论提升到了系统认识论,在解析社会系统与生态系统复杂相互作用方面进行了较好地尝试。

整体上,地理学、生态学等学科从系统组分(Component)、结构(Structure)、过程(Process)、状态(State)和联系(Relation)等不同层次的跨学科人地关系研究,为社会-生态系统综合研究范式的形成提供了方法支

撑,推动了以过程、状态和联系为关注重点的社会-生态系统综合研究的形成和发展。Olsson 以渔业生态系统为例建立了生态知识、生态系统与管理实践的动态连接分析框架^[81]。该框架认为人们依靠本地化的生态知识对生态系统进行认知,而生态知识反馈影响制度与管理实践。社会系统的管理实践活动通过对土地利用决策作用于生态系统过程,从而产生新的生态系统认识,循环往复形成新的动态连接。Redman 进一步提出社会模式与过程和生态格局与过程的组合是推动社会-生态系统形成和演化的关键,两部分通过交互作用产生联系,在空间、时间维度上组织发展成具有韧性、可持续性和复杂联系的系统^[82]。Ostrom 将社会-生态系统分为资源系统(Resource System)、资源单元(Resource Unit)、管理系统(Governance System)、用户(Users)或行动者(Actors)四个一级子系统和多个二级子系统,指出子系统通过交互作用产出结果,与社会、经济、政治环境和其他生态系统两大类外部环境产生连接,为社会-生态系统的公共资源治理提供了一个通用的多层次分析框架^[83]。

4 社会-生态系统研究地域实践

4.1 海岸带社会-生态系统

海岸带是世界上人口最密集居住的地区,频繁遭受洪水、海啸、飓风及传染病等灾害的干扰,人类社会与生态系统相互作用强烈,是国外社会-生态系统研究关注的重点地域^[84]。全球化进程促进了世界各地尤其是沿海地区经济商品、生态系统服务的紧密联系^[85],海岸带地区社会系统中经济、制度、市场、技术、文化与价值观等通过渔业活动、污染与气候变化等代理驱动因素,对生态系统产生作用。沿海自然生态系统因此在海岸带御灾保护^[86]、食物与资源安全^[87]、海洋旅游业与海洋生计^[88]、生物化学循环^[89]等方面的服务和功能发生变化。增强海岸带社会-生态系统韧性和降低其脆弱性是社会-生态系统领域相关研究的核心,已有研究揭示了建立海洋保护区、合理规划渔业活动与捕捞规模、减少向海洋中排放污染物、发展珊瑚礁等脆弱要素保护技术等综合治理方案,是实现联合国提出的保护和可持续利用海洋资源可持续发展目标(SDG14)^[90]的科学途径。

4.2 干旱区社会-生态系统

干旱区生态系统的结构与功能既影响人类福祉也易受人类活动干扰。全球干旱灾害日益严重^[91],典型干旱区黄土高原面临水土流失、荒漠化面积扩大、经济发展迟缓等问题,人口、资源与环境矛盾突出,是国内社会-生态系统研究关注的重点^[92]。干旱区社会-生态系统研究主要关注在人类活动与环境变化的共同扰动下干旱与半干旱地区的社会-生态系统的脆弱性、韧性与适应性风险的变化过程和驱动机制^[93]。具体研究中,农户生计常被作为社会系统问题的核心,植被恢复作为生态系统的关键监测指标。宏观的研究工作常以行政区为基本单元,建立包含社会、经济和生态子系统的韧性综合评估指标体系^[94],通过识别关键社会-生态要素构建社会-生态网络^[95],解析社会-生态系统的脆弱性、韧性的时空变化及驱动因素。微观的研究工作主要是综合运用气象、遥感、统计年鉴等数据与农户访谈等方法^[96],关注农户对干旱区社会-生态系统变化的适应性过程,从而建立综合指标体系评估农户生计适应性^[58,97]。相关研究显示了综合实施乡村建设、退耕还林与水土保持等社会工程和生态工程^[98-99],有利于降低干旱区社会-生态系统的脆弱性^[100],增强生态系统连通度从而强化社会-生态系统抗干扰能力^[101]。

4.3 城市社会-生态系统

城市以近、远程的生态系统过程与服务为基础^[102],通过区域贸易活动与城市体系形成城市服务供给网络,为人类提供交通、居住、医疗、工作、市场等全面的社会服务^[103],是复杂社会-生态系统过程集中的地区。城市社会-生态系统研究一方面关注从城市系统^[104]、城市代理^[105-106]和城市制度体系^[107-108]等角度认识阈值与系统治理在城市社会-生态系统跨尺度复杂交互过程中的作用;另一方面侧重于从要素与规划实践层面,评估城市环境风险、自然灾害、人口分布等导致的脆弱性^[109],通过建设绿色基础设施等手段增加城市韧性^[110]和气候适应性^[111]。

4.4 其他社会-生态系统

森林^[112]、农田^[113]、湿地^[114]、湖泊^[115]、极地^[116]等也是社会-生态系统研究的典型地域。围绕上述生态环境关键或敏感区域的研究工作共同揭示了信息流、新知识、社会治理决策过程、管理机构和生态文化理念对协调社会过程与生态过程、提升社会-生态系统韧性和适应性的重要作用。

5 总结与展望

社会-生态系统综合自然生态系统与人类社会可持续发展问题的研究视角,为理解复杂耦合的人地系统和化解人地矛盾提供了新途径。国际社会-生态系统研究起步较早,近年来聚焦于社会-生态系统脆弱性、韧性、适应性等综合特性研究,形成了以扰沌为关键理论、多种人地关系认知研究为方法论支撑的综合领域。我国地域广阔,自然生态系统类型丰富,地区社会发展水平各异,人地关系矛盾复杂多样。以我国社会-生态系统面临的实际问题为切入点,开展多维度的社会-生态系统研究,有助于丰富其理论与实践体系。

但目前社会系统与生态系统的联系与作用认识仍不完善,社会-生态系统构成要素、演化过程、风险评估与韧性提升等研究还不够深入。未来工作需围绕社会-生态系统的要素组成与时空边界确定,社会过程与生态过程互动的复杂机制建模解析,社会-生态系统综合风险与演变趋势研判及整合社会-生态系统适应性治理理念参与可持续发展决策等关键问题,重点关注社会环境与生态环境敏感地区社会系统过程与生态系统过程的关联。同时深入参与地域社会治理与生态环境保护的政策设计与管理活动,以加强对人地关系认知框架的整合,完善社会-生态系统的基础理论、方法理论和应用理论体系。此外,在相关科研管理工作中需借鉴国外经验,加强人地关系研究的顶层设计和组织性,设立综合项目、丰富资助途径,发挥人地关系研究对增进人类福祉的决策参考作用,提升和支撑我国在国际相关领域的学术话语权。

参考文献 (References):

- [1] Vitousek P M. Global environmental change: an introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23: 1-14.
- [2] Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, Crutzen P. The new world of the anthropocene. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2228-2231.
- [3] Foley J A, Defries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [4] Shanguan W, Gong P, Liang L, Dai Y J, Zhang K L. Soil diversity as affected by land use in China: consequences for soil protection. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 913852.
- [5] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *CATENA*, 2014, 121: 151-163.
- [6] Deng X Z, Liu J Y, Ma E J, Jiang L, Yu R, Jiang Q O, Zhao C H. Impact assessments on water and heat fluxes of terrestrial ecosystem due to land use change // Zhan J Y eds. *Impacts of Land-use Change on Ecosystem Services*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015:149-209.
- [7] Cao Q, Liu Y P, Georgescu M, Wu J G. Impacts of landscape changes on local and regional climate: a systematic review. *Landscape Ecology*, 2020, 35(6): 1269-1290.
- [8] Sun Y, Zhang X B, Ding Y H, Chen D L, Qin D H, Zhai P M. Understanding human influence on climate change in China. *National Science Review*, 2021, 9(3): nwab113.
- [9] Tian H Q, Lu C Q, Melillo J, Ren W, Huang Y, Xu X F, Liu M L, Zhang C, Chen G S, Pan S F, Liu J Y, Reilly J. Food benefit and climate warming potential of nitrogen fertilizer uses in China. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 044020.
- [10] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Gao Y H, Zhu D, Yang G, Tian J Q, Kang X M, Piao S L, Ouyang H, Xiang W H, Luo Z B, Jiang H, Song X Z, Zhang Y, Yu G R, Zhao X Q, Gong P, Yao T D, Wu J H. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [11] Li J S, Guo X M, Chuai X W, Xie F J, Yang F, Gao R Y, Ji X P. Reexamine China's terrestrial ecosystem carbon balance under land use-type and climate change. *Land Use Policy*, 2021, 102: 105275.
- [12] Fernandes M, Vieira da Silva C, Frazão Santos C. Climate-related vulnerability and risk assessment of main ocean uses: an overview. *Frontiers in*

- Marine Science, 2022, 9: 787882.
- [13] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, MacE G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486: 59-67.
- [14] Xu Y J, Si Y L, Yin S L, Zhang W Y, Grishchenko M, Prins H H T, Gong P, de Boer W F. Species-dependent effects of habitat degradation in relation to seasonal distribution of migratory waterfowl in the East Asian-Australasian Flyway. *Landscape Ecology*, 2019, 34(2): 243-257.
- [15] Huang J L, Andrello M, Martensen A C, Saura S, Liu D F, He J H, Fortin M J. Importance of spatio-temporal connectivity to maintain species experiencing range shifts. *Ecography*, 2020, 43(4): 591-603.
- [16] Wen Z, Zheng H, Zhao H, Liu L, Ouyang Z Y. Species compositional, structural and functional diversity exerts different effects on soil erosion caused by increased rainfall intensity in Chinese tropical forests. *Plant and Soil*, 2021, 465(1): 97-108.
- [17] Brown K. Global environmental change I: a social turn for resilience?. *Progress in Human Geography*, 2014, 38: 107-117.
- [18] Anderies J M, Folke C, Walker B, Ostrom E. Aligning key concepts for global change policy: robustness, resilience, and sustainability. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): art8.
- [19] Costanza R. *The Science and Management of Sustainability*. New York: Columbia University Press, 1992.
- [20] Turner B L, Kasperson R E, Matsone P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [21] Huber P R, Thorne J H, Roth N E, McCoy M M. Assessing ecological condition, vulnerability, and restorability of a conservation network under alternative urban growth policies. *Natural Areas Journal*, 2011, 31(3): 234-245.
- [22] 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: art14.
- [23] Engle N L. Adaptive capacity and its assessment. *Global Environmental Change*, 2011, 21(2): 647-656.
- [24] Luo F H, Liu Y X, Peng J, Wu J S. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 125-134.
- [25] Chaffin B C, Gosnell H, Cosens B A. A decade of adaptive governance scholarship: synthesis and future directions. *Ecology and Society*, 2014, 19(3).
- [26] Gao J X, Tian M R. Analysis of over-consumption of natural resources and the ecological trade deficit in China based on ecological footprints. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 899-904.
- [27] Potschin M B, Haines-Young R H. Ecosystem services: exploring a geographical perspective. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(5): 575-594.
- [28] Alexander K, Hettiarachchi S, Ou Y X, Sharma A. Can integrated green spaces and storage facilities absorb the increased risk of flooding due to climate change in developed urban environments? *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124201.
- [29] Zheng H, Wang L J, Wu T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: a review of the approaches. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82: 103-112.
- [30] Emmer A. GLOFs in the WOS: bibliometrics, geographies and global trends of research on glacial lake outburst floods (Web of Science, 1979-2016). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(3): 813-827.
- [31] 熊巨华, 吴浩, 孙维君, 刘小茜, 刘建宝, 杨刚, 张中浩, 毛德华, 高阳. 国家自然科学基金视角下地理科学融合发展路径探索. *地理学报*, 2022, 77(08): 1839-1850.
- [32] Su H N, Lee P C. Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in Technology Foresight. *Scientometrics*, 2010, 85(1): 65-79.
- [33] Van N J, Waltman L. *VOSviewer manual*, Leiden: Univeriteit Leiden. Leiden, The Netherlands, 2019.
- [34] Chen X W, Chen J M, Wu D S, Xie Y J, Li J. Mapping the research trends by Co-word analysis based on keywords from funded project. *Procedia Computer Science*, 2016, 91: 547-555.
- [35] 巢清尘. 地球系统科学、全球变化与可持续发展. *气象科技*, 1999, 27(4): 9-13.
- [36] 陈泮勤. 地球系统科学的发展与展望. *地球科学进展*, 2003, 18(6): 974-979.
- [37] Bastian O, Grunewald K, Khoroshev A V. The significance of geosystem and landscape concepts for the assessment of ecosystem services: exemplified in a case study in *Russia*. *Landscape Ecology*, 2015, 30(7): 1145-1164.
- [38] van Ree C C D F, van Beukering P J H. Geosystem services: a concept in support of sustainable development of the subsurface. *Ecosystem Services*, 2016, 20: 30-36.
- [39] 毕思文. 地球系统科学——21 世纪地球科学前沿与可持续发展战略科学基础. *地质通报*, 2003, 22(8): 601-612.

- [40] 葛全胜, 赵名茶, 郑景云, 狄小春. 中国陆地表层系统分区——对黄秉维先生陆地表层系统理论的学习与实践. 地理科学, 2003, 23(1): 1-6.
- [41] de Vos A, Biggs R, Preiser R. Methods for understanding social-ecological systems: a review of place-based studies. *Ecology and Society*, 2019, 24(4): 16.
- [42] 陈传康, 牛文元. 人地系统优化原理及区域发展模式的研究. 地球科学信息, 1988, 3(6): 41-43.
- [43] Turner B L II, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [44] Roberts R S, Emel J. Uneven development and the tragedy of the commons: competing images for nature-society analysis. *Economic Geography*, 1992, 68(3): 249.
- [45] Gesler W M. Therapeutic landscapes: medical issues in light of the new cultural geography. *Social Science & Medicine*, 1992, 34(7): 735-746.
- [46] 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.
- [47] Preiser R, Biggs R, De Vos A, Folke C. Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches. *Ecology and Society*, 2018, 23(4): 46.
- [48] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Washington: Island Press, 2002.
- [49] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
- [50] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A P. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): art5.
- [51] Gunderson L H. Ecological resilience--in theory and application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000: 425-439.
- [52] Walker B, Meyers J A. Thresholds in ecological and social-ecological systems: a developing database. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): art3.
- [53] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: socio-ecological feedback *versus* socio-economic change. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 108-118.
- [54] Long H L, Qu Y. Land use transitions and land management: a mutual feedback perspective. *Land Use Policy*, 2018, 74: 111-120.
- [55] Folke C, Carpenter S R, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockström J. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 2010, 15(4): art20.
- [56] 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.
- [57] 王奕佳, 刘焱序, 宋爽, 姚莹, 傅伯杰. 社区尺度社会——生态系统适应途径述评. 地理科学进展, 2022, 41(5): 935-944.
- [58] 蒋维, 杨新军, 王俊. 基于农户尺度的黄土高原农村社会-生态系统体制转换. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 37-41.
- [59] McCarthy J J. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [60] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 杨新军, 黄馨. 社会-生态系统恢复力研究进展——基于 CiteSpace 的文献计量分析. 生态学报, 2019, 39(8): 3007-3017.
- [61] 汪辉, 徐蕴雪, 卢思琪, 任懿璐, 象伟宁. 恢复力、弹性或韧性? ——社会-生态系统及其相关研究领域“Resilience”一词翻译之辨析. 国际城市规划, 2017, 32(04): 29-39.
- [62] Adger W N. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 268-281.
- [63] Berkes F. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Natural Hazards*, 2007, 41(2): 283-295.
- [64] Brand F S, Jax K. Focusing the meaning (s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. *Ecology and Society*, 2007, 12(1): art23.
- [65] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, Gunderson L, Holling C S, Walker B. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(5): 437-440.
- [66] Carl F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [67] Kapsar K, Frans V F, Brigham L W, Liu J G. The metacoupled arctic: human-nature interactions across local to global scales as drivers of sustainability. *AMBIO: A Journal of Environment and Society*, 2022, 51(10): 2061-2078.
- [68] Gari S R, Newton A, Icely J D. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 103: 63-77.
- [69] Daily, G C. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington: Island Press, 1997:1-10.
- [70] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [71] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984(01): 1-9.

- [72] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6.
- [73] Costanza R. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 341-345.
- [74] 樊杰, 王亚飞, 汤青, 周侃. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程. *地理科学*, 2015, 35(1): 1-10.
- [75] Schlesinger W H. Planetary boundaries: thresholds risk prolonged degradation. *Nature Climate Change*, 2009, 1(910): 112-113.
- [76] Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, McNeill J. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 842-867.
- [77] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架. *地理学报*, 2019, 74(8): 1489-1507.
- [78] 方创琳. 区域持续圈与发展圈相互作用理论. *自然辩证法研究*, 1999, 15(2): 31-33.
- [79] Liu J G. Integration across a metacoupled world. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): art29.
- [80] Flammini A, Puri M, Pluschke L, Dubois O. Walking the nexus talk: assessing the water-energy-food nexus in the context of the sustainable energy for all initiative. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome., Fao, 2014.
- [81] Olsson P, Folke C. Local ecological knowledge and institutional dynamics for ecosystem management: a study of Lake Racken watershed, Sweden. *Ecosystems*, 2001, 4: 85-104.
- [82] Redman C L, Grove J M, Kuby L H. Integrating social science into the long-term ecological research (LTER) network: social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 161-171.
- [83] Ostrom E. A diagnostic approach for going beyond panaceas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(39): 15181-15187.
- [84] Adger W N, Hughes T P, Folke C, Carpenter S R, Rockström J. Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 2005, 309(5737): 1036-1039.
- [85] Purcell S W, Mercier A, Conand C, Hamel J F, Toral-Granda M V, Lovatelli A, Uthicke S. Sea cucumber fisheries: global analysis of stocks, management measures and drivers of overfishing. *Fish and Fisheries*, 2013, 14(1): 34-59.
- [86] Barnett J, Adger W N. Climate dangers and atoll countries. *Climatic Change*, 2003, 61(3): 321-337.
- [87] Pollnac R, Christie P, Cinner J E, Dalton T, Daw T M, Forrester G E, Graham N A J, McClanahan T R. Marine reserves as linked social-ecological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(43): 18262-18265.
- [88] Cinner J E, McClanahan T R, Graham N A J, Daw T M, Maina J, Stead S M, Wamukota A, Brown K, Bodin Ö. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 12-20.
- [89] Hughes T P, Barnes M L, Bellwood D R, Cinner J E, Cumming G S, Jackson J B C, Kleypas J, van de Leemput I A, Lough J M, Morrison T H, Palumbi S R, van Nes E H, Scheffer M. Coral reefs in the anthropocene. *Nature*, 2017, 546(7656): 82-90.
- [90] Wright G, Schmidt S, Rochette J, Shackeroff J, Unger S, Waweru Y, Müller A. Partnering for a sustainable ocean: The role of regional ocean governance in implementing SDG14. PROG; IDDRI, IASS, TMG & UN Environment, 2017.
- [91] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [92] 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.
- [93] 王俊, 刘文兆, 汪兴玉, 白红英. 黄土高原农村社会-生态系统适应性循环机制分析. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 94-99.
- [94] Quinlan A E, Berbé-Bláquez M, Haider L J, Peterson G D. Measuring and assessing resilience: broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 677-687.
- [95] Keyes A A, McLaughlin J P, Barner A K, Dee L E. An ecological network approach to predict ecosystem service vulnerability to species losses. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-11.
- [96] 温晓金, 杨新军, 王子侨. 多适应目标下的山地城市社会—生态系统脆弱性评价. *地理研究*, 2016, 35(2): 299-312.
- [97] 尹莎, 陈佳, 杨新军. 社会—生态系统重构背景下农户适应行为及影响机理. *人文地理*, 2020, 35(2): 112-121.
- [98] 汪兴玉. 黄土高原典型农村社会—生态系统适应性循环机制及对干旱的恢复力[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [99] 杨新军, 石育中, 王子侨. 道路建设对秦岭山区社会-生态系统的影响——一个社区恢复力的视角. *地理学报*, 2015, 70(8): 1313-1326.
- [100] 侯彩霞, 周立华, 文岩, 赵敏敏, 陈勇. 社会-生态系统视角下沙漠化逆转定量评价——以宁夏盐池县为例. *生态学报*, 2017, 37(18): 6186-6195.
- [101] 叶文丽, 杨新军, 吴孔森, 王银. 黄土高原社会-生态系统恢复力时空变化特征与影响因素分析. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 912-924.
- [102] Hansen R, Pauleit S. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *AMBIO: A Journal of Environment and Society*, 2014, 43(4): 516-529.
- [103] Ernstson H, van der Leeuw S E, Redman C L, Meffert D J, Davis G, Alfsen C, Elmqvist T. Urban transitions: on urban resilience and human-dominated ecosystems. *AMBIO: A Journal of Environment and Society*, 2010, 39(8): 531-545.

- [104] Cash D W, Adger W N, Berkes F, Garden P, Lebel L, Olsson P, Pritchard L, Young O. Scale and cross-scale dynamics; governance and information in a multilevel world. *Ecology and Society*, 2006, 11(2): art8.
- [105] Brondizio E S, Ostrom E, Young O R. Connectivity and the governance of multilevel social-ecological systems; the role of social capital. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34: 253-278.
- [106] 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.
- [107] Lebel L, Anderies J M, Campbell B, Folke C, Hatfield-Dodds S, Hughes T P, Wilson J. Governance and the capacity to manage resilience in regional social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): art19.
- [108] Paavola J. Institutions and environmental governance: a reconceptualization. *Ecological Economics*, 2007, 63(1): 93-103.
- [109] Meerow S, Newell J P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? *Urban Geography*, 2019, 40(3): 309-329.
- [110] Jabareen Y. Planning the resilient city: concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. *Cities*, 2013, 31: 220-229.
- [111] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [112] Ostrom E, Nagendra H. Insights on linking forests, trees, and people from the air, on the ground, and in the laboratory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(51): 19224-19231.
- [113] van der Lee J, Kangogo D, Gülzari Ş Ö, Dentoni D, Oosting S, Bijman J, Klerkx L. Theoretical positions and approaches to resilience assessment in farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 2022, 42(2): 27.
- [114] Olsson P, Folke C, Hahn T. Social-ecological transformation for ecosystem management; the development of adaptive co-management of a wetland landscape in southern Sweden. *Ecology and Society*, 2004, 9(4): art2.
- [115] Wang R, Dearing J A, Langdon P G, Zhang E L, Yang X D, Dakos V, Scheffer M. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. *Nature*, 2012, 492(7429): 419-422.
- [116] Forbes B C, Stammler F, Kumpula T, Meschtyb N, Pajunen A, Kaarlejärvi E. High resilience in the Yamal-Nenets social-ecological system, west Siberian Arctic, Russia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(52): 22041-22048.