

DOI: 10.5846/stxb201812052661

吕永龙, 王一超, 苑晶晶, 贺桂珍. 可持续生态学: 进展与展望. 生态学报, 2019, 39(10): - .

LÜ Y L, Wang Y C, Yuan J J, He G Z. The ecology of sustainability: Progress and prospect. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

可持续生态学: 进展与展望

吕永龙^{1,2,*}, 王一超^{1,2}, 苑晶晶¹, 贺桂珍^{1,2}

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 可持续生态学系用生态学原理和方法解决自然与社会经济协调发展问题, 或者说生态学不断将人类及其社会经济活动纳入研究范畴而形成的自然科学与社会科学的交叉学科。40 年来, 我国在可持续生态学研究 and 实践领域取得了丰硕的成果, 一是提出了“社会-经济-自然”复合生态系统理论; 二是构建了适应中国国情的可持续发展评价指标体系; 三是推进实施了国家可持续发展战略, 并在不同时空尺度进行了试点示范; 四是将可持续发展的区域生态安全格局和生态风险管理理论与方法应用于城市与区域发展规划中, 并利用生态补偿机制推进跨域的生态安全格局建设; 五是为国家生态文明建设规划纲要的出台提供了重要的科学支撑, 有力地推进了生态文明建设战略的实施; 六是系统地研究了全球气候变化对中国生态系统的影响, 科学评估了气候变化的现状、趋势及其影响, 提出了气候变化的生态适应对策; 七是不断推进国家和地方层面的生态省、生态市、生态县建设, 创建了不同层次和规模的可持续发展实验区、国家可持续发展议程创新示范区、生态农业试点示范县、生态工业示范园区等。本文从宏观生态学与可持续发展、生态城市与可持续发展、生态产业与可持续发展三个方面评述可持续性生态学的研究进展。可持续生态学的重点研究内容随着时代发展而不断更新, 生态文明建设、生态安全格局构建、落实联合国 2030 可持续发展目标、应对全球环境变化、新型城市化和工业化对生态系统的影响等是当前和未来一段时间的研究热点。

关键词: 可持续发展; 复合生态系统; 多尺度; 宏观生态学; 全球变化

The ecology of sustainability: Progress and prospect

LÜ Yonglong^{1,2,*}, WANG Yichao^{1,2}, YUAN Jingjing¹, HE Guizhen^{1,2}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The ecology of sustainability (or sustainability ecology) is an interdisciplinary discipline of natural science and social science, which is intended to harmonize nature and social development according to the principles and methods of ecology, or to incorporate humans and their social economic activities into the research framework of ecology. Great achievements have been made in research and applications of sustainability ecology over the past 40 years since the reform and opening-up policy was implemented in China. First, the theory of Social-Economic-Natural Complex Ecosystem (SENCE) was proposed. Second, an assessment index system of sustainable development was established based on national conditions of China. Third, the national strategy of sustainable development was implemented and pilot demonstrations in different temporal and spatial scales were carried out. Fourth, the theory and methods of regional ecological security pattern and regional ecological risk assessment of sustainable development were applied in urban and regional planning, and eco-compensation mechanism was built to promote the construction of ecological security pattern. Fifth, significant scientific

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505704); 国家自然科学基金重点国际合作与交流项目 (71761147001); 中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-322)

收稿日期: 2018-12-05; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yllu@rcees.ac.cn

support was provided for the formulation of guidelines and national planning of eco-civilization construction, which has promoted the implementation of eco-civilization construction strategy. Sixth, systematic research has been conducted on the impacts of global climate change on the ecosystems of China, and ecological adaptation options to climate change were proposed based on the scientific evaluation of the status, trends and impacts of climate change. Seventh, the construction of eco-province, eco-city and eco-county was strengthened at national and local levels, and sustainable communities, national sustainable development innovation demonstration zones, eco-agricultural demonstration counties, and eco-industrial parks were built at different levels and scales. Research progress in the ecology of sustainability was reviewed from three major aspects in this paper: macro-ecology and sustainable development, eco-city and sustainable development, and eco-industry and sustainable development. Along with time changes, priorities for the research of sustainability ecology will constantly be updated. Research focus in the near future will be the construction of eco-civilization, construction of eco-security pattern, implementation of the UN 2030 sustainable development goals, response and adaptation to global environmental change, and impacts of new-type urbanization and industrialization on the ecosystems.

Key Words: Sustainable development; Complex ecosystem; Multiple scale; Macro-ecology; Global change

1960 年代以来,人类社会经济的快速发展造成了全球性生态环境问题日益突出。1962 年《寂静的春天》的问世,引发了社会各界关于人类发展与自然生态相协调的热烈讨论。1980 年,世界自然保护联盟(IUCN)、联合国环境规划署(UNEP)和世界自然基金会(WWF)在《World Conservation Strategy》一书中,从生态学的角度将可持续发展定义为“强调人类利用生物圈的管理,使生物圈既能满足当代人的最大持续利益,又能保持其满足后代人的需求与欲望的潜力”^[1,2]。1987 年,《我们共同的未来》将可持续发展定义为“在满足当代人需要的同时,不损害人类后代满足其自身需要的能力”。1992 年,联合国环境与发展会议在巴西里约热内卢举行,会议通过了《关于环境与发展的里约热内卢宣言》和《21 世纪议程》,使可持续发展的理念得到了普遍接受。2000 年,联合国《千年宣言》中提出了共同实施包括消除极端贫困与饥饿、普及小学教育、促进性别平等和增强妇女权能等八项千年发展目标(Millennium Development Goals, MDGs)。2015 年,在千年发展目标时限到来之际,联合国举行的“2015 后发展议程”中通过了 2016-2030 年全球可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs),包括经济、社会和环境三个关键维度共 17 个目标和 169 个分目标,这意味着可持续发展将成为指导未来全球经济社会发展的核心理念,继续引导全球解决社会经济与环境领域的突出问题。我国于 1994 年发布了《中国 21 世纪议程-中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》,在全球率先制定国家层面的《21 世纪议程》,并将《中国 21 世纪议程》纳入国民经济计划予以实施。1996 年,我国政府将可持续发展上升为国家战略并全面推进实施。2003 年,提出了以人为本、全面协调可持续发展的科学发展观。此后,又先后提出了资源节约型和环境友好型社会、创新型国家、绿色发展、生态文明等理念,并不断开展制度建设和示范区创建实践^[3]。2011 年,国务院学位委员会将生态学升级为一级学科,新的生态学一级学科下设 7 个二级学科方向,即动物生态学、植物生态学、微生物生态学、生态系统生态学、景观生态学、修复生态学和可持续生态学,可持续生态学被正式列为一门新兴的生态学学科。

从方兴未艾的生态安全格局、生态补偿、生态承载力、生态产业、生态城市规划等研究领域^[4-10],到近年来兴起的生态文明建设、联合国 2030 年可持续发展议程、全球气候变化等研究议题^[11-14],可持续生态学在不断变化与拓展研究方向,但其研究重点始终聚焦在人类社会经济与自然生态系统的协调可持续发展。可持续生态学是一门应用性很强的学科,科学研究的过程也是应用实践的过程。为此,本文从宏观尺度生态系统、生态城市和生态产业三个维度展开,系统评述可持续生态学热点方向的研究进展,并提出可持续生态学未来需重点研究的方向,以期推动可持续生态学的理论创新和应用实践。

1 可持续生态学的基础理论与方法研究

工业革命以来,生物多样性丧失、环境污染、气候变化等在全球范围发生或具有全球性影响的问题不断加

剧。20 世纪 70 年代联合国科教文组织(UNESCO)开展的人与生物圈计划(MAB)把人类纳入到生态系统和生物圈中,并使之成为具有重要影响的组成部分,这是生态学发展历程中一次观念上的重大革新,是生态学研究投身于解决社会经济发展问题的一次重大进步^[15]。可持续生态学正是在这样的大背景下应运而生的,它是研究可持续发展中社会、经济、环境三个维度之间相互关系的一门学科,它用生态学原理和方法解决自然与社会经济协调发展问题,或者说它是生态学不断将人类及其社会经济活动纳入研究范畴而形成的自然科学与社会科学的交叉学科。

在理论研究方面,马世骏和王如松等学者在总结了以整体、协调、循环、再生为核心的生态控制论原理基础上,创造性地提出了基于“时”、“空”、“量”、“构”、“序”的生态关联以及生态整合的“社会-经济-自然”复合生态系统理论^[16]。它突破了单纯的自然生态系统理念,将社会与经济要素纳入复合生态系统中,探讨社会、经济、自然之间的相互关系,进而提出社会进步、经济增长与自然演化相协调的调控对策。随后,吕永龙、牛文元、叶文虎等学者对于可持续发展进行了深度的理论思考。吕永龙认为“可持续发展”的最终目标是调节好生命系统及其支持环境之间的相互关系,使有限的环境在现在和未来都能支撑起生命系统的良好运行。“可持续发展”必须遵循发展的公平性、区域分异规律、物质循环利用原则,资源再生与共生原则。分析与研究“可持续发展”,须用系统的观点,定性定量相结合的方法,把经济、社会、文化和生态因子结合起来综合分析。牛文元认为可持续发展理论的“外部响应”,是处理好“人与自然”之间的关系,这是可持续能力的“硬支撑”;可持续发展战略的“内部响应”,是处理好“人与人”之间的关系,这是可持续能力的“软支撑”。叶文虎等则认为可持续发展思想和模式的提出,是人类对进入工业文明时期以来所走过的发展道路进行反思的结果。这些反思为可持续发展理念在国内的生根发芽提供了有益的理论基础^[2,17-20]。近年来,国际上有关可持续性科学的研究有如下几个关键视角。一种视角是有关可持续性科学(Sustainability Science)的内涵和主要影响因素,促进了可持续性科学的诞生^[21-24];一种视角是可持续发展经济学(Economics of Sustainable Development),通过将经济学方法引入可持续发展领域,促成自然资本融入社会经济核算体系^[25],成为生态系统服务价值核算的重要方法论基础^[26];还有一种视角是将人类为主的社会经济系统和自然生态系统耦合,构建“人类-自然”耦合系统(CHANS)^[27],这种思路与“社会-经济-自然复合生态系统”理论有异曲同工之处。

生态经济学和社会生态学为可持续生态学提供了重要的分析工具和方法。生态经济学由美国经济学家 Kenneth Boulding 于 1968 年首次正式提出,主要研究生态破坏的经济成本、生态系统服务的经济效益、生态系统恢复的成本效益分析等^[3]。1972 年,英国生态学家 Edward Goldsmith 出版了生态经济学著作《生存的蓝图》^[28]。马中等(2013)认为,从研究历程上看,经济学家 Kenneth Boulding、Herman E Daly 和生态学家 H. T. Odum 等学者是当代生态经济学思想的奠基者和先行者,他们的观点形成于 20 世纪六七十年代,主要分析当时西方发达国家生态退化引起的经济价值变化,以及如何采取成本有效的措施恢复生态系统功能^[3]。1980 年代,国际生态经济学会成立,此时生态经济学的基础理论开始建立。Costanza 等创办了《生态经济学》国际期刊,深入研究生态与经济社会的相互关系、经济发展对自然生态系统的影响及其价值损益、生态系统退化对社会群体尤其是土著民生活的影响、生态系统服务功能及其价值核算、生态系统管理及其政策工具等^[26,29,30]。中国学者也同步开展了生态经济学研究。1984 年中国生态经济学会成立,许涤新在 1987 年主编出版了中国第一本《生态经济学》专著,试图在当时的计划经济为主的背景下探讨生态经济学的基本理论与方法^[31]。其后,刘思华、徐中民、欧阳志云等学者在生态经济学领域进行了较多探索,主要利用成本效益、价值核算的理论和方法分析中国的环境与发展问题^[32-34],特别是利用价值损益方法对中国的生态系统服务功能进行了核算^[35]。经济增长的生态效应、生态退化或恢复的经济学价值、物质-能量-信息流动的经济分析、基于生态系统的管理政策等依然是当前生态经济学的研究重点。对于在国际上已经兴起的社会生态学研究,国内的相关研究较少,主要涉及社会价值问题,即自然生态系统退化可能引发的社会生活方式的变化、社会价值损益、社会范式的变革等内容,体现环境变化的社会效应及环境与社会发展的协调关系。

可持续生态学涉及七大核心科学问题,主要包括:(1)如何将自然与社会经济之间的动态关系整合到“地

球系统-人类发展-可持续性”的耦合模式和概念框架中? (2) 环境与发展的长期变化趋势是如何改变自然与经济社会之间的相互关系,进而影响可持续发展的机制? (3) 哪些因素决定着“社会-经济-自然”复合生态系统的脆弱性和弹性? (4) 如何科学界定能够预警“社会-经济-自然”系统退化的极限条件和阈值? (5) 什么激励体系能够最有效地改善社会能力以引导自然和社会经济相互作用关系朝着更可持续的方向发展? (6) 如何整合并拓展现有的关于环境和社会经济的监测系统,以更有效地指导可持续性研究? (7) 如何将相对独立的各种研究规划、监测、评估和决策支持活动等整合为适应性管理和社会学习系统?^[21-24]。越来越多的学者试图对这些主要问题进行深入研究和详细阐述,包括对七个核心科学问题的改进和补充。

定量评价方法在可持续生态学研究占有重要地位。1992 年巴西里约热内卢举办的联合国环境与发展会议提出了要构建可持续发展评估方法。Ness 等(2007)依据“时间特征”、“研究焦点”和“整合程度”将可持续发展评估方法大致分为 3 类:(1) 指标和指数;(2) 基于产品的评估方法;(3) 基于动态模型的综合评估方法,模拟系统过程和功能,有助于理解、预测和调控人与环境耦合系统的行为^[36]。可持续发展指标和指数评价方法主要包括单指标与多指标两类评价方法。单指标法侧重于可持续发展评价的某一方面,如联合国开发计划署在 1990 年《人类发展报告》中提出的人类发展指数偏重于社会经济发展方面,而环境可持续发展指数则侧重于环境类指标。多指标评价方法通过构建指标体系的方式评价区域发展的可持续性,通常能更全面反映区域的综合性和协调性,但是在研究与实践中,多目标评价法存在指标庞杂且不均衡,指标权重确定具有较大主观性、指标难以量化导致操作性差等缺陷。中国科学院可持续发展战略研究组牛文元等学者构建了适应中国国情的可持续发展评价指标体系,从生存、发展、环境、社会和智力等五个支持系统选择了 200 多个基础指标构建评价指标体系,并陆续发布了《中国可持续发展战略报告》年度序列报告,对全国和各省的可持续发展能力进行了综合评估^[37]。

目前常用的定量评价方法有^[3,38]:

(1) 单指标法

经济类指标:人类发展指数,绿色 GNP 等;

环境类指标:环境可持续发展指数(ESI),环境绩效指数(EPI)等;

生态类指标:生态足迹^[39,40]等;

能源类指标:能量分析、能值分析^[41]、exergy 分析^[42]等;

物质流指标:物流分析(MA)等;

(2) 多指标评价方法

框架类指标体系:压力-状态-相应(PSR)框架,基于主题的框架(theme-based framework)、基于资本的框架(capital-based framework)、综合核算框架(integrated accounting framework)以及包容性财富框架(inclusive wealth framework)、反映-行动-循环(reflection-action-cycle)框架等;

生命周期评价:生命周期成本评估、生命周期环境影响分析等;

“社会-经济-环境”复合目标体系:联合国千年发展目标指标体系(Millennium Development Goals, MDGs),联合国 2030 年可持续发展目标指标体系(Sustainable Development Goals, SDGs)等。

国内典型的评价指标体系包括:王如松(2005)从发展状态、发展动态和发展实力三个方面对扬州城市生态系统进行的评价^[43];《2012 年中国可持续发展战略报告》从生存支持系统、发展支持系统、环境支持系统、社会支持系统和智力支持系统 5 个方面选择 234 个指标构建了指标体系,对全国 1995—2009 年可持续发展能力进行评估^[44]。

基于动态模型的可持续发展综合评估方法涉及研究系统的过程和动态机制,对“环境-经济-社会”耦合系统有更深入的认识,并且对将来可能发生的情况进行分析、模拟和预测,是近些年逐渐兴起的研究方法^[38]。例如,在捷克等国家的一些城市社区的可持续发展规划研究中运用的 SUNtool 模型^[45]。Threshold 21 模型是突出政策分析的国家尺度可持续发展的系统动力学模型,该模型涉及整个国家可持续发展的经济、社会和环境

等多方面,已应用于 20 多个国家^[46]。SCENE 模型是具有 4 个等级层次的可持续发展概念模型框架,可用于指导建立可持续性指标体系和发展“环境-经济-社会”耦合动态模型^[47]。但这些评价方法各有优缺点,适用于不同的社会经济或自然生态系统,尚无一种普适性的评价方法或模型,仍需进一步完善。

2 宏观尺度生态系统的可持续发展

宏观尺度生态系统的可持续发展,包括全球尺度、国家尺度和区域尺度生态系统的可持续发展。全球尺度可持续发展研究的一个热点是全球气候变化的生态效应,重点关注气候变化引起的自然生态系统变化、生态系统韧性、生态系统适应与管理及其对人类社会可持续发展的影响,相应地,能源可持续利用和碳排放也成为了热点研究方向。近年来,全球范围可持续发展研究和实践的一个热点是如何推进落实《联合国 2030 年可持续发展议程》,该议程通过设定 17 项目标指导全球各个国家在 2016—2030 年进行可持续发展实践活动。生态文明建设是近年来我国推进可持续发展战略的重要组成部分,通过一系列制度建设、科学研究和社会实践,将生态文明建设融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设的各方面和全过程,以全面实现经济社会与环境的可持续发展。区域生态安全格局的构建、优化和评估,对于完善国家 and 地区的主体功能区划、生态功能区划等空间利用规划,将可持续发展战略落实到时空尺度上至关重要,而跨域生态补偿则是协调处理地区间生态与生产生活矛盾、构建与维持区域生态安全格局的重要手段。

2.1 全国尺度的生态文明建设

生态文明建设是十八大以来我国可持续发展领域的热点话题。党的十八大做出了“五位一体”总体布局,要求将生态文明建设融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设的各方面和全过程。十八届三中全会通过的《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》明确指出,建设生态文明,必须建立系统完整的生态文明制度体系。十八届五中全会首次将生态文明建设纳入五年发展规划。2015 年,中共中央和国务院联合发布了《关于加快推进生态文明建设的意见》和《生态文明体制改革总体方案》。《生态文明体制改革总体方案》明确提出,到 2020 年,构建起由自然资源资产产权制度、国土空间开发保护制度、空间规划体系、资源总量管理和全面节约制度、资源有偿使用和生态补偿制度、环境治理体系、环境治理和生态保护市场体系、生态文明绩效评价考核和责任追究制度等八项制度构成的产权清晰、多元参与、激励约束并重、系统完整的生态文明制度体系。在《关于加快推进生态文明建设的意见》和《生态文明体制改革总体方案》的起草过程中,傅伯杰、方精云、吕永龙等多位生态学家参与了资深专家咨询和文本审议。

近年来,围绕《生态文明体制改革总体方案》提出的生态文明制度“四梁八柱”,国家陆续出台了《开展领导干部自然资源资产离任审计试点方案》、《党政领导干部生态环境损害责任追究办法(试行)》、《编制自然资源资产负债表试点方案》、《生态环境损害赔偿制度改革试点方案》、《自然资源统一确权登记办法(试行)》、《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》、《关于全面推行河长制的意见》、《关于加快建立流域上下游横向生态保护补偿机制的指导意见》、《关于构建绿色金融体系的指导意见》、《重点生态功能区产业准入负面清单编制实施办法》等生态文明建设相关文件。有关自然资源核算、生态环境损害鉴定方法、自然资源资产负债表编制方法、生态保护红线划定方法与技术指南、自然资源确权与审计方法、生态补偿机制等的研究成果不断涌现,为国家和区域生态文明建设提供了重要的科技支撑。

2.2 实施联合国 2030 年可持续发展议程

2015 年,联合国倡导的“千年发展目标”的 15 年时间期限已到。“千年发展目标”为全球尤其是欠发达国家的可持续发展发挥了重要推动作用,尤其是在减贫、教育、医疗、改善饮用水源等方面。但是,“千年发展目标”主要针对解决欠发达国家的贫困、粮食安全、水、健康等基本需求问题,而对发达国家存在的问题却没有关注。此外,贫困、医疗、青少年尤其是女性教育、饮用水、能源、卫生、生态保护等领域问题依然严峻。2015 年 9 月,联合国大会通过了 2016—2030 年全球可持续发展目标(SDGs),设立了 17 个大目标和 169 项分目标,来指导各个地区包括发达国家和发展中国家在未来 15 年(2016—2030)的可持续发展。

在联合国正式发布“2016—2030 年全球可持续发展目标”之前,联合国委托国际科联(ICSU)邀请 40 位国际科学家对 17 个 SDGs 进行科学评估,时任国际科联科学计划与评估委员会(CSPR)委员的吕永龙教授参与了这次科学评估,据此国际科联发表了《可持续发展目标评估-科学视角》的报告^[48]。近年来,国际上不同国家和组织也对联合国提出的 17 项目标开展了现状评估工作。例如,联合国可持续发展解决方案网络(SDSN)与德国贝塔斯曼基金会(Bertelsmann Foundation)自 2016 年起,连续发布了三版的《全球可持续发展目标指数与指示板报告,Global SDG Index and Dashboards Report》,推出在国家层面对于 SDGs 的测量标准——可持续发展目标指数(SDG Index)和通过颜色编码体现 17 项 SDGs 整体实施情况的可持续发展目标指示板(SDG Dashboards),评估对象涵盖联合国的绝大部分国家^[49]。经济合作与发展组织(OECD)在《衡量与 SDG 指标的差距—评估 OECD 国家所处的水平》中提出了 OECD 国家实现 2030 联合国可持续发展议程的主要行动计划纲要:包含在 OECD 的发展战略和政策工具中应用 SDG,利用 OECD 的数据帮助追踪可持续发展目标的实施情况,升级 OECD 对国家层面的综合规划和政策制定的支持,并为各国政府提供分享可持续发展目标管理经验的平台,反思 SDG 的实施对 OECD 国家外部关系的影响等四项行动计划^[50]。

2016 年 9 月,我国发布《中国落实 2030 年可持续发展议程国别方案》,对联合国的后发展议程落实工作进行了全面部署。为推动落实联合国 2030 年可持续发展议程,充分发挥科技创新对可持续发展的支撑引领作用,国务院于 2016 年 12 月 3 日颁布了《中国落实 2030 年可持续发展议程创新示范区建设方案》,正式启动国家可持续发展议程创新示范区建设,以打造一批可复制、可推广的可持续发展现实范例。吕永龙等从基本原则、推进方法和政策保障三个方面,阐述有关推进实施可持续发展创新示范区的基本思路,即以“问题导向、创新引领,明确目标、精准定位,政府主导、多元参与,绿色发展、和谐共生,开放共享、发展共赢”为基本原则,按照“统筹规划,分区推进,各有侧重,相互关联”的基本程序,实行地区差异化的可持续发展推进战略^[20]。

2.3 区域生态安全格局构建

国际应用系统分析研究所(IIASA)在 1989 年首次提出了生态安全的概念,生态安全是指人类在生活、健康、安乐、生活保障来源、基本权利、社会秩序、必要资源和适应环境变化的能力等方面不受到威胁的状态^[51]。生态安全评估是生态安全各项研究的基础,联合国经济合作开发署等国际组织分别制定了一些比较常用的生态安全评价模型,例如:压力—状态—响应(PSR);驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR);驱动力—状态—响应(DSR)等^[52]。俞孔坚在最小耗费距离模型基础上进行修正并将之运用于生态安全格局优化,之后该模型逐渐被应用到生态用地保护及景观安全格局优化,相比传统的模型其优点是能更好地表达景观格局和生态过程的相互关系^[53]。生态系统健康诊断和生态安全监测预警等是生态安全的重要研究方向。例如,傅伯杰等从区域生态环境预警的角度,提出了生态安全预警原理^[54]。肖笃宁等提出生态成熟度和生态价位的概念,通过生物量的大小划分生态成熟度,并对应相应的生态价位等级,以此来评估生态系统的健康状况^[55]。

生态安全格局研究经历了从早期的定性规划、定量格局分析,到近年逐步发展起来的空間数据演算、静态格局优化、动态格局模拟以及状态趋势分析等,相关研究方法主要包括生态适宜性/敏感性分析、景观格局指数、情景分析、综合指标体系等^[56]。俞孔坚等学者提出了可持续发展的生态安全格局和“反规划”理论与方法,生态安全格局思想在城市规划方面得到体现,“反规划”理论也广泛应用于城市与区域规划中,对国务院颁布实施的《全国主体功能区规划》产生了积极影响^[57]。生态安全格局研究已为国土空间规划提供了重要的决策支持,例如,近年来的国家主体功能区划、生态保护红线划定、生态功能区划等均包含利用土地生态功能评估结果来指导土地空间管制和区域可持续发展。

2.4 区域生态风险与生态补偿机制

对于生态风险的理解分为两种,一种从环境风险的角度,将环境风险分为健康风险和生态风险两类,侧重从污染物的生态效应角度理解生态风险;另一种认为生态风险是景观破碎化、水土流失等关于景观格局和生态过程的风险。这两种主要的生态风险评估分别开展,并且形成了比较成熟的评估体系。景观生态风险研究通过耦合景观格局与生态过程,将景观作为风险综合体,通过评价景观格局指数等开展研究^[58]。污染物的生

态风险具有多风险因子、多风险受体、多评价终点等特点,评价污染物对生物生理、种群、群落和生态系统等不同尺度受体的生态影响^[59]。随着城市化和工业化进程的不断加速,国土空间的景观格局不断发生变化,污染物向不同环境介质中的排放量也不断增加,生态风险逐渐成为学界的研究热点。近年来,区域生态风险评估相关研究丰富,涉及不同环境介质、不同类型污染物、不同区域等研究客体^[60-62]。

当存在区域环境损害的生态风险时,尤其是一方对另一方施加的风险或跨域产生的生态风险,如何对潜在的受害方进行生态补偿是研究热点之一。生态补偿是以保护和可持续利用生态系统服务为目的,以经济手段为主,调节利益相关者关系的制度安排。在中国,生态补偿的理论和实践经历了自发摸索、理论研究和理论与实践相结合三个阶段,建立生态补偿机制基本成为社会各界的共识,学术界在生态补偿理论和方法方面也开展了诸多研究工作,为生态补偿机制建立和政策设计提供了一定的理论依据和实践经验^[3]。

国际上与生态补偿含义接近的概念包含生态/环境服务付费(payment for ecological / environmental services, PES)、生态/环境服务市场(market for ecological/environmental services)和生态/环境服务补偿(compensation for ecological / environmental services)等。生态补偿在全球范围内有诸多实践。例如,2003年墨西哥实施了水文环境服务付费项目(payment for hydrological environmental services, PSAH),通过收取水资源使用税,为具有重要水文价值的森林生态系统保护付费^[63]。流域生态补偿领域是我国生态补偿实践中开展较多,成果也较为显著的^[64,65]。例如,从2003年开始,福建省政府主导在九龙江流域、闽江流域和晋江流域开展了下游受益方对上游保护方的经济补偿试点工作。发源于江西省赣州市的东江是珠三角和香港地区重要的饮用水源,然而东江源地区是我国重要的稀土矿产区,长年开发稀土导致自然植被破坏、水土流失和环境污染严重。2003年江西省开始对东江源自然保护区开展生态补偿,2014年制定了《江西东江源生态保护补偿规划(2013—2020年)》,设定了一系列关于经济发展、生态保护、环境治理和能力建设的约束目标,设计了生态环境功能分区,提出了基于重点生态功能区的生态补偿方案,如果东江源区生态环境质量评估结果合格,由中央和广东对东江源进行补偿;如果评估结果低于上一年,则不进行补偿。2017年初,江西-广东东江流域跨地区横向生态保护补偿试点正式启动。

2.5 全球气候变化的生态适应

20世纪70年代以来,随着全球增暖问题日益突出,气候变化研究得到迅速发展,成为当前国内外学术界乃至社会各界关注的热点。气候变化方面的研究大致可以归为三类:一方面,全球气候变化特征、机理、现状、趋势;第二方面,气候变化对各种类型生态系统和人类社会经济发展的影响;第三方面,如何应对气候变化,如约束碳排放的各种公约,替代能源、低碳经济、循环经济等可持续生产与消费模式。

自1990年联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布《IPCC First Assessment Report 1990 (FAR)》以来,IPCC已经发布了五次全球气候变化评估报告。近年来,观测证据表明全球气候变暖是毋庸置疑的事实。2012年之前的3个连续10年的全球地表平均气温,都比1850年以来任何一个10年更高,且可能是过去1400年以来最热的30年。1971年以来,全球几乎所有冰川、格陵兰冰盖和南极冰盖的冰量都在损失。20世纪80年代初以来,大多数地区的多年冻土温度升高^[66]。IPCC第五次评估报告还预估了气候变化对水资源、生态系统、粮食生产和粮食安全、海岸系统和低洼地区、人体健康、经济部门、城市和农村的影响与风险^[67]。近年来,我国陆续发布了三次气候变化国家评估报告,评估了气候变化对我国生态系统的影响。《第三次气候变化国家报告》显示,上世纪70年代至本世纪初,中国冰川面积退缩约10.1%,冻土面积减少约18.6%。评估报告包含了我国气候变化研究的最新成果,以及应对气候变化典型案例、中国二氧化碳利用技术评估报告等^[68]。

学术界关于气候变化以及碳循环方面的研究非常丰富,有利地促进了政府及社会各界对气候变化的认识。为了应对气候变化,积极落实巴黎气候变化协定,我国采取了一系列措施。我国政府部门编制并实施了《中国应对气候变化国家方案》、《“十二五”控制温室气体排放工作方案》、《国家适应气候变化战略》和《国家应对气候变化规划(2014—2020)》等,提出了加快推进产业结构和能源结构调整,大力开展节能减碳和生态

建设,积极推动低碳试点示范等措施。吴绍洪等(2017)编制了未来中国气候变化综合风险区划,在国土空间上划分不同风险区域,识别风险大小,有利于政府与社会各界制定应对气候变化的措施^[69]。方精云等(2018)在美国科学院院刊(PNAS)上发表系列文章,研究指出中国陆地生态系统在过去几十年一直扮演着重要的碳汇角色。例如,2001—2010年期间整个陆地生态系统年均固碳约2亿吨碳单位,相当于抵消了同期中国化石燃料碳排放量的14.1%;我国的重大生态工程(如天然林保护工程、退耕还林工程、退耕还草工程等)和秸秆还田等农田管理措施的实施,对中国陆地生态系统碳吸收做出了重要贡献,分别贡献了全国总碳汇的36.8%和9.9%。研究证实了加快植被恢复、实施生态工程可以有效增加碳汇应对气候变化^[70,71]。

3 生态城市与可持续发展

1970年代,联合国科教文组织发起的“人与生物圈(MAB)”计划中提出的“生态城市”,一般是指社会-经济-自然协调发展,物质、能量、信息高效利用,基础设施完善,布局合理,生态良性循环的人类聚居地^[15]。生态城市是人们对按生态学规律(包括自然生态、经济生态和人类生态)规划、建设和管理的一个行政单元(例如省、市、县)的简称,其三个支撑点是生态安全、循环经济、和谐社会^[72]。城市生态系统的特征是以人为核心,对外部具有强烈依赖性,城市系统需求的大部分能量和物质都需要从其它生态系统输入,产生的大量废物也必须输送到其它生态系统中。城市生态系统的物质流特征以及城市与周边地区的关系说明了城市属于低生态服务价值、高生态足迹地区,高密度的人类活动下如何协调人类与自然生态系统的关系成为城市可持续发展研究的重点。城市尺度的可持续发展首先面临着如何量化评估城市的生态承载力,以约束人类社会经济活动的容量。在认识了城市的生态承载力后,如何规划设计城市人居环境是另一个重要的研究领域。为了促进城市与区域的可持续发展,我国陆续推进了生态省、生态市、生态县等创建活动,以及可持续发展实验区和可持续发展议程创新示范区的建设。

3.1 城市生态系统承载力评估

上世纪末,生态系统服务价值评估相关研究开始兴起,人类渐渐开始全面量化评估生态系统对社会经济的价值^[25,26]。2001—2005年,联合国组织开展了全球的千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA),目的是评估生态系统为满足人类福祉而改变的后果,同时还为加强生态系统保护和可持续利用、以及生态系统对人类福祉的贡献所需采取的行动建立科学基础。千年生态系统评估涉及所有生态系统,并将生态系统服务归纳为四大类:(1)提供基本生活资料的服务,如粮食、木柴等;(2)调节服务,如气候、水质调节等;(3)文化服务,如提供娱乐和精神方面的享受等;(4)支持服务,如土壤形成、光合作用等^[73]。近年来,关于城市生态系统评估的研究日益增加,探究城市化过程与生态环境的关系,评估城市生态系统健康状况是认识城市生态系统结构与特征的重要方式。城市生态系统评估主要包括城市生态系统服务、城市生态承载力、城市生态系统健康、城市与生态环境耦合关系等的评估。例如,方创琳等认为城市化过程与生态环境之间存在着复杂的交互胁迫关系。根据耗散结构理论和生态需要定律,城市化与生态环境之间存在着一种开放的、非平衡的、非线性相互作用和具有自组织能力的交互胁迫关系,两者结合形成城市化与生态环境交互耦合系统^[74]。杨志峰等利用能值分析等方法,选取城市生态系统评价指标体系,结合模糊数学等知识形成评价方法,识别城市生态系统面临的主要健康问题并提出管理建议^[75]。

城市生态承载力主要考虑两个方面的因素,一个是自然界的供给,即自然生态系统提供的资源与服务;另一方面是人类社会经济发展需求。通过建立包含资源、环境、经济社会等方面的指标体系,来评估城市的生态承载力状态^[3]。早期的生态承载力概念,主要从种群生态学的角度,认为在食物、栖息地、竞争等因素共同作用下,生态系统中任何种群的数量均存在一个阈值^[76]。近年来,一种普遍认可的生态承载力的定义是:在生态系统结构和功能不受破坏的前提下,生态系统对外界干扰特别是人类活动的承受能力^[77]。城市生态承载力受社会系统建设能力、经济系统发展能力、人工智能管理能力及文化因素的影响^[78]。城市生态承载力的评估方法主要有净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)评估法、生态足迹法、供需平衡法、综合指标评价

法和系统模型法等,但是现阶段生态承载力的研究尚存在一些不足,例如缺乏科学完整的研究体系、承载力阈值的生态学指示意义不明确、动态演化与预测研究不够深入、空间尺度与格局分异研究涉足较少等^[79]。

3.2 生态城市设计与规划

早在 20 世纪初,国外便涌现了一批将生态学理念融入城市规划的学者。P. Geddes 在《演化中的城市》(Cities in Evolution)一书中将生态学原理应用于城市的环境、市政和卫生等综合规划研究中,强调城市规划过程需充分认识自然环境条件,制定与自然和谐的规划方案^[80]。Sarrinen 的“有机疏散理论”和芝加哥人类生态学派关于城市景观、功能、绿地系统方面的生态规划理论都为后来城市生态规划的发展奠定了基础^[81]。进入 20 世纪 60 年代之后,随着景观生态学和地理学等领域研究人员的介入,城市生态规划得到了进一步发展。1969 年, I. L. McHarg 在《Design With Nature》中提出了城市与区域土地利用生态规划方法的基本思路,并通过案例研究对生态规划的工作流程及应用方法作了较全面的探讨^[82]。I. L. McHarg 的生态规划框架深刻地影响了后来的城市生态规划研究与实践。近年来,随着地理信息系统、遥感等技术的广泛应用,城市生态规划向着空间量化、综合分析方向发展。

国内关于生态城市规划的研究起源于 1980 年代中后期。自马世骏、王如松于 1984 年提出的社会-经济-自然复合生态系统理论后,1988 年王如松出版了《高效 和谐—城市生态系统调控方法》,这是国内第一本关于城市生态学的专著,为城市生态设计与规划提供了重要理论和方法基础。1988 年至 1995 年间,由联合国教科文组织(UNESCO)人与生物圈(MAB)计划支持、中科院生态环境研究中心开展的“天津城市发展的生态对策研究”和“天津城市土地利用的生态规划”,开启了中国城市可持续发展和城市生态规划的理论、方法 and 应用实践研究^[15]。王如松认为生态城市规划包括生态概念规划、生态工程规划和生态管理规划,生态城市规划不同于城市生态环境规划,而是一种综合性的可持续发展规划,规划内容包含了生态环境、生态产业和生态文化三者相互关系的战略发展规划^[72]。生态城市规划的实践和理论基础主要包括:构建科学的评价指标体系和目标、城市与区域规划结合、产业规划与生态功能区划匹配、分层次规划与复合生态规划结合、与社会经济规划结合考虑以及管理机制研究等内容^[81]。我国城市生态规划起步虽较晚,但是与城市生态系统评估联系紧密,在政府部门的各项城市发展规划中也得到较好的应用,部分成果为国务院颁布实施的《全国主体功能区规划》、《生态功能区划》和生态保护红线划定等专项规划提供了重要的科技支撑作用。

3.3 生态文明和可持续发展示范区建设

生态城市创建是我国为推进城市可持续发展而开展的重要实践。从 2006 年开始,截止到 2016 年 6 月底,生态环境部已分 8 批命名了 144 个国家级生态县市区,其中地级市有 9 个,县级行政区有 135 个。为贯彻落实党中央、国务院关于加快推进生态文明建设的决策部署,指导和推动各地以市、县为重点全面推进生态文明建设,生态环境部将原有的国家级生态市县创建工作改为国家级生态文明建设示范区创新工作。生态环境部于 2016 年 1 月 22 日印发《国家生态文明建设示范区管理规程(试行)》、《国家生态文明建设示范县、市指标(试行)》,对国家生态文明建设示范县、市的申报与管理在制度上予以明确。对于创建工作在全国生态文明建设中发挥示范引领作用、达到相应建设标准并通过考核验收的市、县、乡镇,生态环境部按程序授予相应的国家生态文明建设示范区称号。2017 年 9 月 7 日,生态环境部公布了第一批国家生态文明建设示范市县初步名单:北京市延庆区,山西省右玉县,辽宁省盘锦市大洼区等 48 个县市入选。国家生态文明建设示范县、市是国家生态县、市的“升级版”,是推进区域生态文明建设的有效载体。遵循创新、协调、绿色、开放、共享等五项发展理念,围绕优化国土空间开发格局、全面促进资源节约、加大自然生态系统和环境保护力度、加强生态文明制度建设等重点任务,以促进形成绿色发展方式和绿色生活方式、改善生态环境质量为导向,从生态空间、生态经济、生态环境、生态生活、生态制度、生态文化六个方面设置指标体系作为示范区创建工作评价内容。

由科技部主导的可持续发展实验区、可持续发展议程创新示范区的创建工作也是我国可持续发展的重要实践内容。国家可持续发展实验区诞生于 1986 年,是我国针对改革开放后经济快速发展但社会建设相对滞

后、生态环境恶化等问题发起的一项地方试点工作,旨在依靠制度创新和科技推广应用,促进经济发展与社会进步、环境保护相协调。1997年,在1986年启动实施的“社会发展综合实验区”基础上创建“可持续发展实验区”。截止2016年底,已建立国家可持续发展实验区189个,遍布除港澳台外的31个省(区、市),实验主题覆盖经济转型、社会治理、环境保护等可持续发展各领域^[83]。30年来,国家可持续发展实验区的建设取得了显著的成就,促进了可持续发展理念在国内的普及、探索出了一批具有示范推广意义的地域可持续发展模式以及发挥了向世界展示中国可持续发展成就的窗口作用等三个方面。实验区科技创新能力显著提升,城乡协调发展状况明显好于全国平均水平,探索形成了城市生活垃圾处理的“广汉模式”,资源开发与保护并重的吉林“白山模式”,以“猪—沼—果”生态农业为特色的“恭城模式”等。近年来,为推动落实《联合国2030年可持续发展议程》,充分发挥科技创新对可持续发展的支撑引领作用,国务院于2016年12月3日颁布了《中国落实2030年可持续发展议程创新示范区建设方案》,正式启动国家可持续发展议程创新示范区建设,以打造一批可复制、可推广的可持续发展现实范例。截至2017年底,国务院已批准创建“以特大城市综合社会治理为主题”的深圳市、“以资源型城市转型为主题”的太原市、“以景观资源的可持续利用为主题”的桂林市等3个可持续发展议程创新示范区。

4 生态产业与可持续发展

生态产业是一类按循环经济规律组织起来的基于生态系统承载能力,具有完整的生命周期、高效的代谢过程及和谐的生态功能的网络型、进化型、复合型产业,是实现社会经济可持续发展的重要途径^[84]。其中,循环经济与清洁生产是生态产业研究和实践的重要理论基础和方法体系。在应用实践环节,生态产业涵盖了生态工业、生态农业、生态旅游等各种产业,研究热点集中于以生态产业园为重点的生态工业和生态农业。

4.1 生态工业

生态工业的基础是循环经济,它是按生态学原理和系统工程方法运行的具有整体、协调、循环、再生功能的复合生态经济,与传统经济“资源-产品-废弃物”的单向线性流程不同,循环经济要求把经济活动组成为一个“资源-产品-再生资源”的反馈式循环流程,其特征是减少原料(reduce)、再利用(reuse)、回收(recycle)为代表的3R原则。诸大建和钱斌华(2006)针对我国循环经济的发展理想模式提出了“C模式”,即适合我国国情的循环经济发展模式(China模式),该模式又称1.5—2.0倍数发展战略,通过给予我国GDP增长一个20年左右的缓冲阶段,并希望经过20年的经济增长方式调整,最终达到一种相对的减物质化阶段^[85]。循环经济涉及四个方面的创新:(1)改进生产工艺,提高生态效率;(2)设计更合理的产品,最大限度满足市场要求,达到生态效用(eco-effectiveness)的创新;(3)企业经营目标从产品导向变成服务导向,实现生态服务的创新;(4)企业生态文化的创新^[72]。

清洁生产是生态工业的另一个关键概念。1996年,联合国环境规划署(UNEP)完善了清洁生产的定义:清洁生产是一种新的创造性思想,该思想将整体预防的环境战略持续地应用于生产过程、产品和服务中,以增加生态效率和减少人类和环境的风险。核心内容包括:(1)生产过程要求节约原材料和能源,淘汰有毒原材料,减小所有废物的数量和毒性;(2)对于产品,要求减少从原材料提炼到产品最终处置的全生命周期的不利影响;(3)对于服务,要求将环境因素纳入设计和所提供的服务中^[3]。

国内外对于生态工业的研究重点包含两个方面:一方面是产业代谢与物质流分析。其重点是构建物质平衡表、测算物质流动、转化路线和动力学机制。如国际应用系统分析研究所(IIASA)对莱茵河流域重金属物质代谢的研究^[86],国内对砷、汞、铅、氯、氮等元素以及一些持久性有机污染物(POPs)开展的相关研究^[87-89];另一方面是生态工业园区建设。生态工业研究主要集中在钢铁业、电子业、生物质转化产业等,生态工业园区研究多见于法国、荷兰、日本等国家,研究内容涉及产业园设计、评估、案例研究等^[90]。

生态工业园的概念最早于1992年由美国Indigo发展研究所提出,该研究所将生态工业园(eco-industrial parks)定义为:一个由制造业和服务业组成的企业生态群落,通过调节与优化管理能源、水、原材料等环境与

资源基本要素,实现生态环境与经济的双重优化和协调发展,最终使该企业群落获得比每个公司优化个体表现实现的个体效益之和还要大得多的群体效益(“1+1>2”效应)^[3]。截至2017年1月,中国已批准建设和正式命名的国家级生态工业示范园区有93个,这些生态工业园以生命周期评价为基础理论方法,以园区设计、系统优化、制度建设、生态效率评估等为其主要建设内容,以期实现经济效益、社会效益和生态效益的最优化组合。

4.2 生态农业

生态农业的概念是由美国土壤学家 Albrecht W. 提出的,他认为农业生产应当多施用有机肥,少施用化肥,理想的替代农业,应该是生态上能自我维持,经济上高效的农业^[91]。1981年,英国农学家 Kiley-Worthington M. 将生态农业定义为“生态上能自我维持,低输入,经济上有生命力,在环境、伦理和审美方面可接受的小型农业”^[92]。生态农业与生态工业相似,同样遵循循环经济等原则,力图构建资源循环利用、环境影响最小化的农业生产模式。但是,农业属于开放式生产方式,资源利用和回收效率、环境排放等因素较生态工业而言相对不可控,难以精准量化物质流。此外,农业生产依赖于自然条件,同一生产模式在不同地区也表现出不同的资源利用效率和环境影响,具有强烈的地域特色,需要因地制宜构建生态农业。在国内,为应对日益加剧的农业生产与资源环境之间的矛盾,提倡生态农业有很强的现实意义。早在1980年代,马世骏提出促进农业可持续发展需要重点考虑四个方面:时、空、量、序,需要重点把握三种关系:生物与环境之间的相互关系、种间关系问题和与开放系统相关联的投入产出问题^[93]。

生态农业在中国的生根发芽,离不开国家相继出台的一系列旨在促进生态农业发展的政策措施^[94]。1993年,农业部等7个部委组成了“全国生态农业县建设领导小组”,启动第一批51个生态农业县建设工作^[95]。2000年,国家启动了第二批50个全国生态农业县建设工作。2002年,农业部向全国征集到了370种生态农业模式或技术体系,并遴选出具有代表性的10个生态模式类型,包括北方“四位一体”模式、南方“猪-沼-果(稻、菜、鱼)”模式、平原农林牧复合模式等^[96]。截止目前,在不同程度上开展生态农业建设的县超过300个,其中,国家级生态农业试点示范县102个,省级试点示范县200多个^[94]。生态农业示范县的建设有效地抑制了日益严峻的耕地质量下降、水体富营养化的趋势,有力地促进了农业和农村的可持续发展。

5 可持续生态学研究展望

可持续生态学是自然科学与社会科学的交叉学科,针对人类社会经济发展与自然生态系统之间的矛盾,研究如何促进两者的协调可持续发展问题,因此,其主要研究方向也将随着经济社会的发展而不断与时俱进。以下几个方面将是未来研究的重点内容:

(1) 生态文明建设相关的生态学理论和方法。生态文明建设已经写入我国宪法,是我国未来可持续发展领域的主导理念,在学术界必将持续保持研究热度。近年来,我国生态文明建设的相关制度建设成果显著,也开展了生态文明建设示范区的创建工作,提出了生态文明建设考核目标体系,并且开展了省域尺度的评估。但是,生态文明属于新理念,生态文明建设涉及的学科领域和时空范围较广,需要集成多学科的理论和方法。即使对于已经出台的八项制度,仍有许多值得深入研究的内容。如,如何界定自然资源资产产权?利益相关者如何获得和维持其资源产权权益?如何实现自然资源产权的转让?自然资源产权交易成本如何核算?国土空间开发的强度如何确定?多大强度是合适的?如何维持空间开发与保护的均衡?如何将生态因素有效纳入国土空间规划?如何建立资源总量的精准核算方法?资源利用效率及其提升途径是什么?资源有偿使用对人类福祉改善的影响如何?生态退化与损害如何界定与核算?生态补偿的对象、范围和价值如何科学确定?这些问题既需要基于试点的经验逐步解决,也需要依赖于理论、方法和技术的创新和突破。

(2) 落实联合国可持续发展目标的生态学研究。《联合国2030可持续发展议程》提出的17项可持续发展目标(SDGs)涉及社会-经济-生态环境的方方面面,不少学者已经指出该目标体系的不同目标之间存在或积极或消极的相互关系,如何落实也面临诸多挑战。吕永龙等学者提出推进落实SDGs的5项优先工作:(1)

设计权重值,完善可定量、可考核、可验证的指标体系;(2)建立监测机制,确定监测的阈值并确保获取相应数据;(3)评估实施进展,核查可持续发展目标是否纳入各个层面的规划和战略中并得到落实;(4)加强观测设施建设,扩展适应可持续发展目标的综合信息观测和处理能力;(5)加强数据的标准化和验证,建立数据采集和监测的标准、方法、范式和共享机制,发展空间观测与地面勘察相互核实的方法等^[97]。在中国推进实施SDGs方面,可持续生态学研究应重点关注“制定科学的衡量目标的指标体系”、“如何将SDGs纳入国民经济与社会发展规划”、“保障实施SDGs的融资能力”、“可持续发展指标的综合观测和获取能力”、“加强监测数据规范与评估能力”、“建立衡量社会进步的科学指标和方法”、“权衡不同目标间的冲突问题”、“如何将视角从陆地转向海洋和海岸带资源的可持续利用”等^[20]。

(3)多尺度生态风险与安全格局构建研究。在未来一段时期内,有关人类活动与全球环境变化胁迫下的生态风险的研究重点将主要集中于以下几个方面:多尺度生态风险监测与数据采集加工、指标体系的统一与整合、评价方法论、空间分布特征与表达、预警与快速应急响应。生态风险评价方法逐步从考虑单一风险源、单一受体、单一生境、小尺度向多风险源、多介质、生态系统水平及区域尺度发展。通过研究生态系统功能服务与经济社会发展的耦合关系,建立针对风险源和风险受体的风险管理信息库,形成基于风险信息库的生态风险评价与管理动态反馈过程,逐步建立多目标风险源的生态风险管理方法,加强生态风险预警和防范,形成跨域协调联动应对生态风险的管理体制和机制^[62]。分析高强度人类活动对周边区域的生态风险,辨识区域生态系统功能受损、生态退化的高风险区位,分析区域生态对各类土地利用的适宜性及承载能力,提出区域空间扩展、覆被变化、产业调整、绿色基础设施建设的布局方案,科学划定生态保护红线、自然保护区体系、生物多样性保护优先区、国家公园等建设用地、农业用地和生态用地,着力构建宏观尺度的生态安全格局。

(4)城市化与乡村振兴的可持续发展研究。城市可持续发展研究已经开始从注重城市经济发展转向注重生态环境或社会生态的视角,中国的城市化以及城市可持续发展问题已经成为国际合作研究的重点方向之一。研究重点包括:城市可持续发展的影响因素及其相互作用关系、城市可持续发展的模式、城市可持续发展规划、城市可持续发展评价、城市生态基础设施建设。城市的可持续发展问题不仅是城市自身的问题,也是城市与周边区域的协调发展问题,城市化与区域生态的耦合关系仍是重点方向^[98]。如何将乡村振兴与城市化结合起来,实现城市与乡村地区一体化的可持续发展也将是未来一段时间的研究热点。乡村振兴,需要利用城市的辐射作用,实现基础设施的全面更新和优化布局,形成农业原材料生产、农产品加工和基础工业的产业链,实现由农村向城市的产业集聚效应。乡村地区具有良好的生态环境,要探索将绿水青山转化为金山银山的途径,探索产业发展突破的重要途径则是逐步实现生态产业化。

(5)“未来地球”国际科学计划中有关可持续发展的生态学研究。为应对全球环境变化对可持续发展的挑战,国际科学理事会(ICSU)、国际社会科学理事会(ISSC)等国际组织联合发起了为期10年的“未来地球”科学计划。《未来地球计划2025年愿景》指出:“使人类生活在可持续发展、平等的世界是未来地球计划的愿景”。《战略研究议程2014》将“未来地球”计划的动态地球、全球可持续发展和向可持续发展转型三大研究主题细化为9个研究方向。动态地球优先研究方向包括:观测并解析变化;理解全球变化的过程、相互作用、风险和阈值;探索并预测未来变化。全球可持续发展优先研究方向:满足基本需求,消除不平等;治理可持续性发展;管理增长、协同和平衡。向可持续发展转型优先研究方向:理解和评估转型;确定和推广可持续发展行为;转型发展路径。基于九个研究方向,确定了全球变化与可持续发展的62个具体研究问题,供不同领域、学科和地区的研究机构和组织设立优先发展和资助领域时参考^[99]。为应对这一形势,应在新技术新手段的支持下,建立从观测到模拟和仿真的综合集成方法体系,布设密集的天、地、空一体化立体网络化生态观测系统,发展生态环境大数据科学平台,建设生态环境数值模拟装置,形成资源环境全要素的实时监测、精准模拟和动态分析能力,揭示社会-经济-自然复合生态系统整体运行和子系统之间的相互作用规律,预测多尺度生态系统的未来变化态势,提出适应全球环境变化的应对策略。

参考文献 (References):

- [1] IUCN. World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development. Gland, Switzerland: IUCN, 1980.
- [2] 吕永龙. 国外持续发展研究概况. 生态经济, 1993, (1): 14-18.
- [3] 李文华. 中国当代生态学研究. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] Zhang Y, Fath B D. Urban metabolism: measuring sustainable cities through ecological modelling. Ecological Modelling, 2019, 392: 6-7.
- [5] Peng B H, Li Y, Elahi E, Wei G. Dynamic evolution of ecological carrying capacity based on the ecological footprint theory: a case study of Jiangsu province. Ecological Indicators, 2019, 99: 19-26.
- [6] Wu Z N, Guo X, Lv C M, Wang H L, Di D Y. Study on the quantification method of water pollution ecological compensation standard based on emergy theory. Ecological Indicators, 2018, 92: 189-194.
- [7] Shang W X, Gong Y C, Wang Z J, Stewardson M J. Eco-compensation in China: theory, practices and suggestions for the future. Journal of Environmental Management, 2018, 210: 162-170.
- [8] Huang B J, Yong G, Zhao J, Domenech T, Liu Z, Chiu S F, McDowall W, Bleischwitz R, Liu J R, Yao Y. Review of the development of China's eco-industrial park standard system. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 137-144.
- [9] Song X Q, Geng Y, Dong H J, Chen W. Social network analysis on industrial symbiosis: a case of Gujiao eco-industrial park. Journal of Cleaner Production, 2018, 193: 414-423.
- [10] Martín Gómez A M, Aguayo González F, Marcos Bórcena M. Smart eco-industrial parks: a circular economy implementation based on industrial metabolism. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 135: 58-69.
- [11] Jiang B, Bai Y, Wong C P, Xu X B, Alatalo J M. China's ecological civilization program - Implementing ecological redline policy. Land Use Policy, 2019, 81: 111-114.
- [12] Xu X B, Yang G S, Tan Y. Identifying ecological red lines in China's Yangtze River economic belt: a regional approach. Ecological Indicators, 2019, 96: 635-646.
- [13] Salvia A L, Leal Filho W, Brandli L L, Griebeler J S. Assessing research trends related to sustainable development goals: local and global issues. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 841-849.
- [14] Searchinger T D, Wiersma S, Beringer T, Dumas P. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. Nature, 2018, 564(7735): 249-253.
- [15] Krause J, Wang R, Lu Y, et al. Towards a Sustainable City. UNESCO/MAB, Paris: 1995.
- [16] 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.
- [17] 吕永龙. 持续发展的理论思考. 科学与社会, 1996, (1): 28-32.
- [18] 牛文元. 中国可持续发展的理论与实践. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 280-289.
- [19] 叶文虎, 张辉. 可持续发展与环境影响评价. 环境保护, 2012, (22): 34-36.
- [20] 吕永龙, 王一超, 苑晶晶, 贺桂珍. 关于中国推进实施可持续发展目标的若干思考. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 1-9.
- [21] Kates R W, Clark W C, Corell R, Hall J M, Jaeger C C, Lowe I, McCarthy J J, Schellnhuber H J, Bolin B, Dickson N M, Faucheux S, Gallopin G C, Grübler A, Huntley B, Jäger J, Jodha N S, Kaspersen R E, Mabogunje A, Matson P, Mooney H, Moore III B, O'Riordan T, Svedin U. Environment and development: sustainability science. Science, 2001, 292(5517): 641-642.
- [22] Clark W C, Dickson N M. Sustainability science: the emerging research program. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8059-8061.
- [23] Clark W C. Sustainability science: a room of its own. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(6): 1737-1738.
- [24] Kates R W. What kind of a science is sustainability science? Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(49): 19449-19450.
- [25] Daly H E. Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development. Boston, MA: Beacon Press, 1997.
- [26] 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. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [27] 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.
- [28] Edward G. Blueprint for Survival. Boston, USA: Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company, 1972.

- [29] Costanza R. Embodied energy and economic valuation. *Science*, 1980, 210(4475): 1219-1224.
- [30] Martinez-Alier J, Schlupmann K. Ecological economics: energy, environment, and society. *Land Economics*, 1990, 66: 484-486.
- [31] 许涤新. 生态经济学. 杭州: 浙江人民出版社, 1987.
- [32] 刘思华. 可持续发展经济学. 武汉: 湖北人民出版社, 1997.
- [33] 徐中民. 生态经济学集成框架的理论与实践(II): 理论框架与集成实践. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1344-1353.
- [34] 刘思华. 关于发展可持续性经济科学的若干理论思考. *经济纵横*, 2008, (7): 27-33.
- [35] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [36] Ness B, Urbel-Piirsalu E, Anderberg S, Olsson L. Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 2007, 60(3): 498-508.
- [37] 牛文元, 马宁, 刘怡君. 可持续发展从行动走向科学——《2015 世界可持续发展年度报告》. *中国科学院院刊*, 2015, 30(5): 573-585.
- [38] 邬建国, 郭晓川, 杨劼, 钱贵霞, 牛建明, 梁存柱, 张庆, 李昂. 什么是可持续性科学? *应用生态学报*, 2014, 25(1): 1-11.
- [39] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [40] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 61-83.
- [41] Jorgensen S E. *Eco-Exergy as Sustainability*. Boston: WIT Press, 2006.
- [42] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [43] 王如松, 徐洪喜. 扬州生态市建设规划方法研究. 北京: 中国科学技术出版社, 2005.
- [44] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2012 中国可持续发展战略报告. 北京: 科学出版社, 2012.
- [45] Robinson D, Campbell N, Gaiser W, Kabel K, Le-Mouel A, Morel N, Page J, Stankovic S, Stone A. SUNtool - A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, 2007, 81(9): 1196-1211.
- [46] Barney G O. The global 2000 report to the president and the threshold 21 model: influences of Dana meadows and system dynamics. *System Dynamics Review*, 2002, 18(2): 123-136.
- [47] Grosskurth J, Rotmans J. The scene model: getting a grip on sustainable development in policy making. *Environment, Development and Sustainability*, 2005, 7(1): 135-151.
- [48] International Council for Science (ICSU), International Social Science Council (ISSC). *Review of the Sustainable Development Goals: The Science Perspective*. Paris: International Council for Science, 2015.
- [49] Sachs J, Schmidt-Traub G, Kroll C, Durand-Delacre D, Teksoz K. *SDG Index and Dashboards Report 2017*. New York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2017.
- [50] OECD. *Measuring Distance to the SDG Targets: An Assessment of Where OECD Countries Stand*. Paris: OECD, 2017.
- [51] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551-1556.
- [52] 吴平平. 我国生态安全评价研究进展. *环境与发展*, 2018, 30(3): 190-191, 193-193.
- [53] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型. *地理学报*, 1998, 53(S1): 11-20.
- [54] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用. *应用生态学报*, 1993, 4(4): 436-439.
- [55] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 354-358.
- [56] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [57] 俞孔坚, 李迪华. 论反规划与城市生态基础设施建设//中国科协 2002 年学术年会第 22 分会场论文集. 成都: 中国风景园林学会, 四川省建设厅, 成都市建设委员会, 成都市园林局, 2002.
- [58] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [59] 陈春丽, 吕永龙, 王铁宇, 史雅娟, 胡文友, 李静, 张翔, 耿静. 区域生态风险评价的关键问题与展望. *生态学报*, 2010, 30(3): 808-816.
- [60] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [61] Shi Y J, Wang R S, Lu Y L, Song S, Johnson A C, Sweetman A, Jones K. Regional multi-compartment ecological risk assessment: establishing cadmium pollution risk in the northern Bohai Rim, China. *Environment International*, 2016, 94: 283-291.
- [62] 吕永龙, 王尘辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. *生态学报*, 2018, 38(2): 359-370.
- [63] Muñoz-Piña C, Guevara A, Torres J M, Braña J. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: analysis, negotiations and results. *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 725-736.
- [64] 毛显强, 钟瑜, 张胜. 生态补偿的理论探讨. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(4): 38-41.
- [65] 王金南, 万军, 张惠远. 关于我国生态补偿机制与政策的几点认识. *环境保护*, 2006, (10A): 24-28.

- [66] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.
- [67] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 151.
- [68] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告(第二版). 北京: 科学出版社, 2015.
- [69] 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 邓浩宇, 焦珂伟, 陆晴, 冯爱青, 岳溪柳, 尹云鹤, 赵东升, 高江波. 中国综合气候变化风险区划. 地理学报, 2017, 72(1): 3-17.
- [70] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [71] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin III F S. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [72] 王如松. 生态安全·生态经济·生态城市. 学术月刊, 2007, (7): 5-11.
- [73] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- [74] 方创琳, 鲍超, 乔标. 城市化过程与生态环境效应. 北京: 科学出版社, 2008.
- [75] Su M R, Fath B D, Yang Z F. Urban ecosystem health assessment: a review. Science of the Total Environment, 2010, 408(12): 2425-2434.
- [76] Smaal A C, Prins T C, Dankers N, Ball B. Minimum requirements for modelling bivalve carrying capacity. Aquatic Ecology, 1997, 31(4): 423-428.
- [77] 沈渭寿. 区域生态承载力与生态安全研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [78] 张林波. 城市生态承载力理论与方法研究——以深圳为例. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [79] 向芸芸, 蒙吉军. 生态承载力研究和应用进展. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2958-2965.
- [80] Geddes P. Cities in Evolution: An Introduction to the Town Planning Movement and to the Study of Civics. London: Williams & Norgate, 1915.
- [81] 刘洁, 吴仁海. 城市生态规划的回顾与展望. 生态学杂志, 2003, 22(5): 118-122.
- [82] McHarg I L. Design with Nature. New York: Doubleday/Natural History Press, 1969.
- [83] 孙新章. 国家可持续发展实验区建设的回顾与展望. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 10-15.
- [84] 王如松. 循环经济建设的产业生态学方法. 产业与环境, 2003, (S1): 48-52.
- [85] 诸大建, 钱斌华. 循环经济的 C 模式及保障体系研究. 铜业工程, 2006, (1): 6-10.
- [86] Stigliani W M, Anderberg S, Jaffé P R. 莱茵河流域中积累的化学品的工业代谢与长期风险. 陈定茂, 译. 产业与环境, 1994, 16(3): 30-35.
- [87] 陈跃, 邓南圣. 面向二十一世纪的环境管理工具——物质与能量流动分析. 重庆环境科学, 2003, 25(3): 1-5.
- [88] 陈定江, 李有润, 沈静珠, 胡山鹰. 工业生态学的系统分析方法与实践. 化学工程, 2004, 32(4): 53-57.
- [89] Xie S W, Wang T Y, Liu S J, Jones K C, Sweetman A J, Lu Y L. Industrial source identification and emission estimation of perfluorooctane sulfonate in China. Environment International, 2013, 52: 1-8.
- [90] 朱蓓, 肖军. 国内外产业生态学研究进展述评. 安全与环境工程, 2015, 22(6): 7-10.
- [91] Albrecht W. Foundation concepts//The Albrecht Papers: Vol. 1. Greeley, USA: Acres USA, 1975.
- [92] Kiley-Worthington M. Ecological agriculture. What it is and how it works. Agriculture and Environment, 1981, 6(4): 349-381.
- [93] 马世骏. 加强生态建设促进我国农业持续发展. 农业现代化研究, 1987, (3): 2-5.
- [94] 巩前文, 严耕. 中国生态农业发展的进展、问题与展望. 现代经济探讨, 2015, (9): 63-67.
- [95] 全国生态农业示范县建设专家组. 发展中的中国生态农业. 北京: 中国农业科技出版社, 2001: 1-10.
- [96] 李文华. 生态农业——中国可持续农业的理论与实践. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-11.
- [97] Lu Y L, Nakicenovic N, Visbeck M, Stevance A S. Five priorities for the UN sustainable development goals. Nature, 2015, 520(7548): 432-433.
- [98] 吕永龙, 曹祥会, 王尘辰. 实现城市可持续发展的系统转型. 生态学报, 2019, 39(4): 1125-1134.
- [99] 国际科学理事会未来计划临时秘书处. 2014 未来地球计划战略研究议程. 王传艺, 林征, 译. 北京: 气象出版社, 2015.