DOI: 10.20103/j.stxb.202210283063
王悦露, 董威, 张云龙,傅伯杰, 赵正嫄,吕一河,张建军,伍星.基于生态系统服务的生态安全研究进展.生态学报,2023,43(19):7821-7829.
Wang Y L, Dong W, Zhang Y L, Fu B J, Zhao Z Y, Lü Y H, Zhang J J, Wu X.Research progress and prospect of ecological security based on ecosystem services.Acta Ecologica Sinica,2023,43(19):7821-7829.

基于生态系统服务的生态安全研究进展

王悦露[1,2], 董 威[3], 张云龙[1], 傅伯杰[1,2], 赵正嫄[1,2], 吕一河[1,2], 张建军[3,4], 伍 星[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
3 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083
4 自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035

摘要:生态安全是全球环境变化背景下人类可持续发展面临的重要问题之一。生态系统服务作为自然环境中人类赖以生存的环境条件与效用,成为人们感知和评价生态系统结构或功能变化的重要指标,同时为研究自然生态与社会-经济两大系统之间的交互作用提供了连接路径。目前,国内外对基于生态系统服务的生态安全研究尚处于起步阶段。在大量查阅国内外相关文献的基础上,总结了生态安全的理论内涵及方法体系,并从基于生态系统服务内在关系和基于生态系统服务拓展的生态安全研究,以及将生态系统服务与生态安全结合应用的综合研究等 3 个方面系统性梳理了目前国内外基于生态系统服务的生态安全研究进展。结果表明,发展初期的生态安全研究主要基于各种生态系统服务之间的供需关系、权衡/协同关系和服务重要性等内在关系,二者的结合效果能通过耦合生态系统服与生态系统状态指标和相关模型得到改善,近年来将生态系统服务与生态安全结合应用的综合研究在区域规划管理等领域已呈现良好的发展趋势。在此基础上,本文指出了目前研究过程中所存在的一些不足与未来发展的方向,为进一步深入开展生态系统服务与生态安全的耦合研究提供理论依据。

关键词:生态安全;生态系统服务;方法体系;人地耦合

Research progress and prospect of ecological security based on ecosystem services

WANG Yuelu[1,2], DONG Wei [3], ZHANG Yunlong[1], FU Bojie[1,2], ZHAO Zhengyuan[1,2], LÜ Yihe[1,2], ZHANG Jianjun[3,4], WU Xing[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*
3 *School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
4 *Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resource, Beijing* 100035, *China*

Abstract: Ecological security is one of the primary problems that human is facing in the context of global environmental changes. Ecosystem services, as a significant perception index in the variation of the ecosystem structure and functions, provided a path to connect the nature ecosystem and the society-economy system in the background of human-earth coupling. Although the theory and application of ecosystem services have made great progress in recent years, the studies of ecological security based on ecosystem services are still with large uncertain. In this study, we review the research progress of ecological security based on ecosystem services from three aspects as following: the ecological security research based on the

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFF1303204);国家自然科学基金项目(42041005, 42271099)
收稿日期:2022-10-28; **网络出版日期**:2023-05-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xingwu@ rcees.ac.cn

intrinsic relationships among various ecosystem services, and on the combination of ecosystem services and other models or indexes, as well as the application study of the integration between ecological services and ecological security in the regional planning and management. The results show that the research on ecological security in the preliminary stage were mainly refer to the supply and demand relationship, the trade-off/synergy analysis and the importance analysis among various ecosystem services. The development of ecological security study could be significantly improved by combining ecosystem services with ecosystem status indicators and related models. In recent years, the comprehensive research on the combination of ecosystem services and ecological security was constantly being applied in other fields and has especially shown a good development trend in the field of regional planning and management. On this basis, some deficiencies in current research are pointed out, and some challenges and research directions are also suggested to provide a theoretical basis for further research on the coupling of ecosystem services and ecological security.

Key Words: ecological security; ecosystem services; methodology; human-earth coupling

20 世纪 60 年代以来,世界人口快速增长,城镇化发展迅速[1]。高强度土地开发利用、资源开采以及工农业生产等社会经济活动造成了温室气体大量排放、生态系统破坏与环境污染严重等一系列问题[2—4],对生态系统服务功能造成了显著的负面效应,严重威胁和制约了人类的生存与发展。全球生态安全的相关问题日益受到关注,以人类福祉与自然生态系统之间关系协调稳定为核心的生态安全理念及相关研究得到了快速的发展[5]。近年来,生态安全理论方法为各国合理制定经济发展目标及生态环境保护策略提供了重要的决策依据,与政治安全、军事安全、经济安全等共同组成了现代国家稳定发展的基石。

生态系统服务是指生态系统形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用,稳定协调的生态系统服务供给是维持区域自然生命系统、保障区域生态安全的基础[5—6]。随着生态系统服务的内涵、形成和维持机制以及评估方法等的不断发展,生态系统服务成为耦合自然生态系统功能与人类福祉的桥梁以及人类感知和评价生态安全状态最主要的途径之一[7]。近年来逐渐有研究将生态系统服务体系与生态安全研究进行结合,以构建更科学、与社会发展结合更紧密的生态安全研究方法体系。目前国内的主要研究区域分布与经济发展关系密切,相关研究在闽三角、粤港澳大湾区、长三角、京津冀等城市群以及长江、黄河流域等重点生态研究区均有开展,如黄智洵等[8]以闽三角城市群为背景,通过构建生态系统服务供需关系动态模型框架,利用供需关系象限区划表征生态安全格局。此外,在典型生态区如黄土高原、西北干旱区及东北沿海区等,常结合能够反映当地重要生态特征的生态系统服务开展生态安全研究。生态系统服务概念和方法的融入,为人-地耦合背景下生态安全研究提供了新的有效途径和发展方向,但目前仍未形成较为统一的方法体系,缺乏有效的梳理以开展更高效的融合应用。因此,通过对国内外文献进行总结,本文分别从基于生态系统服务内在关系和基于生态系统服务拓展的生态安全研究,以及将生态系统服务与生态安全结合应用的综合研究等 3 个方面,对生态系统服务在生态安全研究中的应用进行系统阐述,并对未来研究中值得重点关注和深入研究的问题进行探讨与展望,以期通过对相关研究的梳理与综述为二者开展更高效的融合应用提供参考。

1 生态系统服务与生态安全的内涵及相互关系

1.1 生态系统服务与生态安全的内涵

生态系统服务是人类从自然界中获得的最基本的福祉,是对人类生存及生活质量有贡献的生态系统产品以及生态系统功能,作为人地结合的重要桥梁支撑着人类的生存与发展[9],据其对人类的作用特征分为供给、调节、支持、文化四类[10]。“生态安全”的定义到目前仍不统一。综合文献,其内涵主要包含两大方面,一方面是自然生态系统的自我调节与维持,为生态安全的核心物质基础提供保障;另一方面是社会经济系统与自然生态系统两大系统之间关系的协调稳定,为人类社会发展的可持续性提供支撑[5,11—12]。目前生态安全的主要研究内容主要集中于生态安全评价、生态安全格局构建与优化两大方面。在人地耦合背景下,为更好

地实现人类福祉和自然环境的可持续发展,生态安全的主要关注范围从生态退化与资源短缺问题对人类发展的威胁扩展为整个社会-经济-生态系统的结构完整与安全稳定,要求将人类福祉和自然生态安全放在同等重要的位置上并找到二者均衡点[13]。

1.2　生态系统服务与生态安全的关系

生态系统服务是生态安全的表征[13],能对生态系统状态与人类社会间的关系进行反映[7]。生态安全的研究重心沿人地结合方向的逐渐移动,一方面要求生态系统保证自身有良好的服务供给条件,另一方面要与包含人类社会在内的环境关系稳定,两方面的含义均与生态系统服务紧密联系,因此,生态系统服务是生态安全研究中连接人与环境关系的最好的纽带[14],将生态系统服务应用于生态安全研究是必然趋势。此外,生态系统服务能为生态安全研究提供更便利的条件。首先,生态系统服务成熟的理论内涵与丰富的内容方法体系可直接应用于生态安全的研究框架中,通过在生态系统服务的受益者(社会经济系统)与提供者(自然生态系统)之间建立数量和空间上的关联,体现其供需匹配程度、生态安全空间格局及其时空变化特征,为生态安全研究提供依据[15]。其次,生态系统服务有多样完整的分类体系以及多样的量化评估方法,能够与生态系统其他指标或模型相耦合并开展更多拓展研究,为生态安全研究提供更多研究方法[16],如目前 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade- offs)、ARIES(ARtificial Intelligence for Ecosystem Services)等模型以及 3S 技术等的发展应用,能够对多种生态系统服务进行整体的评估、模拟及预测,讨论其复杂性与产生的效应,有较强的空间化、可视化与动态化的特点。此外,生态系统服务也能与生态安全相结合,为区域规划管理等提供理论指导与方法依据[17],进而指导或应用于其他综合问题的解决。

2　基于生态系统服务的生态安全研究进展

2.1　基于生态系统服务内在关系的生态安全研究

将生态系统服务应用于生态安全评价的核心在于综合生态系统服务与社会、经济、生态组分的评价指标体系的构建。由于生态系统服务具有多维性,常通过各服务间内在关系的形式(供需关系、权衡/协同关系以及服务重要性等)应用到生态安全研究中(图 1)。在当前生态安全评价过程中,仍普遍以“压力-状态-响应”框架(PSR)及其衍生模型为基础综合构建生态安全多维度评价指标体系[18]。多数研究将生态系统服务作为指标应用到 PSR 评价模型及其衍生模型等中[14],或利用生态系统服务价值与生态安全耦合模型等进行社会-经济-生态复合系统的生态安全评价指标的建立。之后通过主观赋权、客观赋权或二者综合的方法对评价指标进行赋权,最后以数学模型、生态模型、景观模型、数字地面模型或计算机模拟法等对生态安全进行评价[19]。在较大尺度上常结合“供-需-流”生态网络格局对整体生态安全进行评估[20]。

生态安全格局的构建过程中,主要将服务间内在关系与“源-汇”理论结合,从而对生态过程的阻力及景观组分的重要性等进行表征。通常基于“源地识别—阻力面构建—廊道提取”的典型研究范式进行构建[21],其中生态系统服务常应用于生态源地的识别以及阻力面的构建两方面[22—25]。相较于直接选择自然保护区核心区域等重要生态用地为生态源地,基于生态系统服务识别生态源地的方法更丰富地考虑了生态需求的影响,选择依据更为充分[21]。阻力面是生态廊道提取的重要依据[21,26],利用专家经验及土地覆被类型直接赋值易忽略相似土地类型内部阻力差异[22]。除了可以后期采用不透水面指数、夜间灯光数据等研究地特征指标加以修正外[26],有学者认为生态系统服务与生态过程流阻力呈负相关,可据此进行阻力面的构建[23,27—29]。在生态源地及阻力面构建的基础上,常结合最小阻力模型(MCR)等提取重要生态廊道,结合关键点识别等方法进行分析,进而构建出功能完整、状态稳定的生态安全格局[30—31]。

2.1.1　基于生态系统服务供需匹配的生态安全研究

通常通过价值系数法、直接市场法、替代成本法、偏好法等对生态系统服务进行量化计算[13,32],以所得供给度、供需比、生态安全指数[33]等指标表征景观单元供需关系,从而构建生态安全格局,或以此建立生态安全评价体系进行整体生态安全的评估(表 1)。此外,还有研究利用实际与潜在生态系统服务供给差异表征潜在

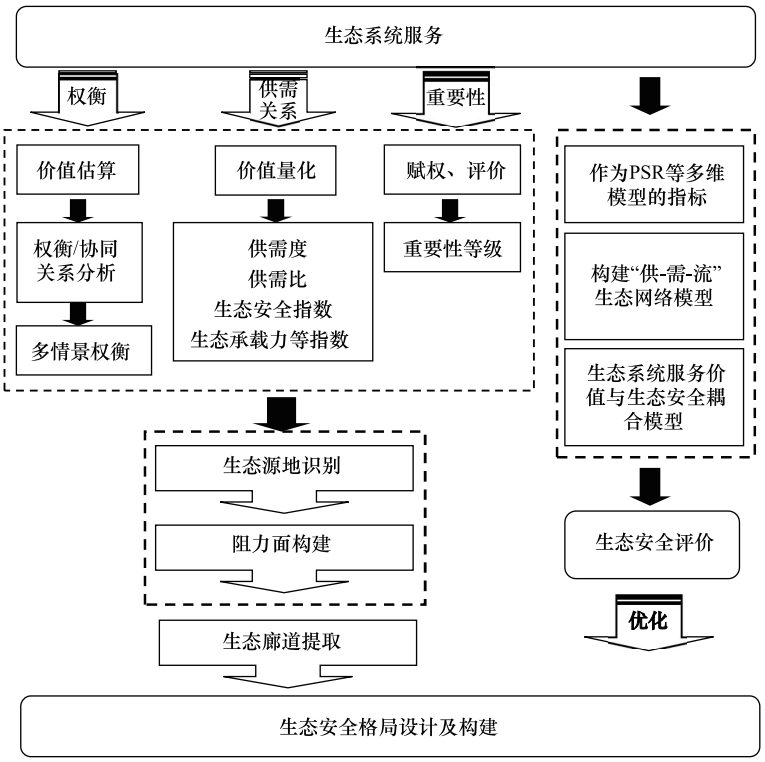

图 1 基于生态系统服务内在关系的生态安全研究框架

Fig.1 Ecological security research framework based on the intrinsic relationships among various ecosystem services

PSR:"压力-状态-响应"模型

生态承载能力,以对生态安全程度进行评估[42]。在较大尺度上,跨景观尺度的生态系统服务供需驱动形成生态系统服务流,在生态系统与人类社会之间建立联系。在生态系统服务自生态系统传递到人类社会的过程中,分布式系统结构模型是进行相关研究的重要工具[43—44]。而在针对生态系统服务实际为人所使用过程(发挥最终效用)的研究中,黑箱理论的应用更为广泛[20,45]。生态系统服务供需平衡状态是生态安全状况的直接要素之一,与生态系统服务供给与需求关系的结合能为解决生态系统供需空间分异日益增大和生态系统服务流通路径受阻等生态安全问题提供支撑[16,32]。

2.1.2 基于生态系统服务权衡/协同的生态安全研究

一种生态系统服务可能的变化可能会造成多种其他生态系统服务正向的(即协同)或负向的(即权衡)的变化,如何权衡多种生态系统服务以得到最大效益,成为当前生态安全格局构建决策过程中一个不可忽视的问题[46]。学者们尝试采用不同方法将生态系统服务权衡关系纳入到生态安全格局研究中(表 1)。较普遍的方法是在生态系统服务核算的基础上,采用生态系统服务权衡度、生态保护效率等指标进行比较分析,选择综合生态效益最大的决策风险情景,据此制定生态安全格局构建方案[37]。生态系统服务的核算常通过 InVEST 模型与土地利用变化及效应(CLUE-S)模型[47]、元胞自动机-马尔科夫(CA-Markov)[48]模型及 OWA[38]进行结合应用。OWA 与 CA-Markov 模型分别能对未来不同情景下生态系统服务聚合规则及土地利用状态进行模拟,近而判断服务间权衡/协同关系变化。InVEST 模型与 OWA 等模型的结合,有利于理清生态系统服务间作用机制及特征,这在确定生态源地及保护区等、进行生态安全评价与格局构建过程中起到重要作用。

2.1.3 基于生态系统服务重要性的生态安全研究

筛选出具有重要生态价值的关键斑块,能够为生态安全格局的构建及生态系统科学管理与生态保护等提供直接依据[49](表 1)。针对典型生态系统,通常利用表征各服务能力的主要因子进行计算,得到生态系统服务能力指数,从而实现重要性评价。根据对多种服务重要性评价结果进行分权叠加、按照自然断点法等进行

分级等处理,实现生态源地的选取。如周汝波等[40]通过分析粤港澳地区多种生态系统服务的物质量及空间格局,综合生态系统服务的重要性进行生态源地的识别。彭建等[27]以生态系统服务评估所得的自然生境重要性为依据,针对区域生态环境基底特征识别生态源地构建玉溪市生态安全格局。有研究将多种生态系统服务重要性进行综合,以其倒数表征阻力大小,从而构建生态阻力面[23,28—29,50],如宋婷等[29]与韩增林等[23]分别在秦巴山脉地区及辽宁瓦房市的生态安全格局构建中利用研究区生态系统服务重要性的倒数构建基本阻力面。

表 1　基于生态系统服务内在关系的生态安全研究类别与方法

Table 1　Overview of Ecological Security Research Based on Intrinsic Methodology of Ecosystem Services

类别 Category	方法及用途 Methods and uses	参考文献 References
生态系统服务供需 Ecosystem services supply and demand	用价值系数法、直接市场法、替代成本法、偏好法等对生态系统服务进行价值核算,进而通过计算供给度、供需比、生态安全指数等或分析生态承载力,建立生态安全评价体系,大尺度上通过“供-需-流”生态网络格局,评估区域整体生态安全程度及其空间格局。选取综合供给水平和综合生态供需比最重要区域的交集为备选生态源地构建格局。	[13,16,32,34—36]
生态系统服务权衡 Ecosystem service trade-offs	基于 InVEST 模型等对生态系统服务价值进行估算,结合有序加权平均算子(OWA)模型等理清相关生态系统服务间的权衡与协同关系以及特征、确定生态源地及保护区等解决多属性决策问题,进行生态安全评价与格局构建。	[37—39]
生态系统服务重要性 Importance of ecosystem services	对各种类生态系统服务功能在整体生态资产价值中的占比赋权:1、进行生态源地的识别或基于生态系统服务重要性构建基本阻力面,构建生态安全格局。2、明确各种生态系统服务的重要区域,筛选出具有重要生态价值的关键斑块加以管理。	[29,40—41]

2.2　基于生态系统服务拓展的生态安全研究

除了仅基于生态系统服务内在关系,还可将生态系统服务与生态系统状态指标以及其他方法模型等相结合进行生态安全评估。在复杂的生态环境研究背景下,单一方法难以进行全面的研究。生态系统服务的理论内涵较为成熟,研究方法体系丰富,为生态安全研究提供了多种评估指标,能配合其他生态指标或模型,进一步提升生态安全研究的准确性与深入性(图 2)。

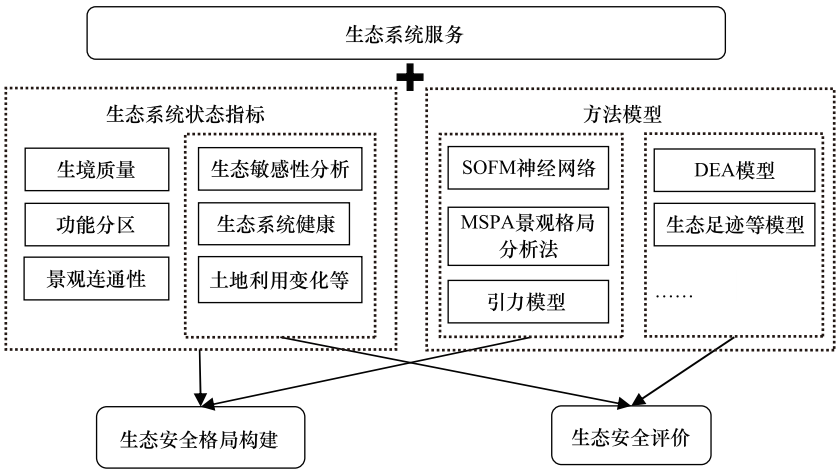

图 2　基于生态系统服务拓展的生态安全研究框架

Fig.2　Ecological security research framework based on the combination of ecosystem services and other methods

SOFM:自组织特征映射网络模型;DEA:数据包络分析模型;MSPA:景观形态空间格局分析方法

在生态安全评价方面,通常在生态系统服务与 PSR 模型结合的基础上结合其他指标或模型进行应用。生态系统服务与 PSR 模型依据生态系统服务流及人类社会的相互作用进行耦合,形成驱动-压力-状态-影响-

响应反馈机制(DPSIR)模型[14],Ruan 等[51]将 DPSIR 模型结合“数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)”构造出 DPSIR-DEA 模型对旅游生态安全进行衡量。郑洋等[52]以“土地利用变化-生态系统服务-生态系统安全”为研究主线,基于研究样地特征及 PSR 框架构建生态安全评价模型。除此之外,还可结合生态系统服务与其他理论模型及生态系统指标重构生态安全评价体系。张雪琪等[53]基于生态系统服务价值理论对生态足迹模型进行改进,定量评价 1991—2016 年叶尔羌河平原绿洲生态安全状况,潘竟虎等[54]以生态系统服务与生态系统健康共同构建“贡献力-活力-组织力-恢复力”(CVOR)的生态安全评价体系。在生态安全格局构建过程中,生态系统服务的结合拓展主要依据“重要性-连通性-敏感性”框架进行[55]。通常采用生态系统服务重要性[40,56]、景观连通性[57—58]、生态敏感性[55,58—60]中的一种或多种指标进行评价并选取生态源地。在生态脆弱区,基于耦合生态系统服务的生态敏感性评价结果进行生态源地选取的研究尤为广泛[59,61—64]。除此之外,还有研究将生态系统服务与其他指标(生境质量[65]、功能区划、土地利用变化[66]等),以及其他生态方法模型(引力模型、景观形态空间格局分析方法(MSPA)[67—68]、自组织特征映射网络模型(SOFM)[69]等)相结合进行生态安全格局的构建,结合方式较为丰富。

2.3 将生态系统服务与生态安全结合应用的综合研究

生态系统服务与生态安全内涵联系紧密,二者的耦合能为其他人-地问题提供更丰富的研究方法与突破角度,目前已在区域规划管理研究中有所应用,主要集中在生态资源的合理分配、研究区管理规划等方面,如土地利用格局的构建[17]及生态网络的优化[70]等。常通过将二者耦合作为土地利用等模型的影响因素,或利用分析叠加法重构网络空间的方式应用到综合研究中。何玲等[17]基于生态系统服务价值构建生态安全格局,以生态安全格局为影响因素,利用 CA-Markov 模型进行不同情境土地利用格局模拟得最佳土地利用格局。胡其玉等[70]基于生态系统服务供需理论,综合生态系统服务最重要区域和生态红线边界构建生态安全格局,采用分层叠加分析重构厦漳泉地区生态网络空间。除此之外在生态修复方面也有应用,如袁媛等[71]依据基于生态系统服务构建的生态安全格局得到遵化市的功能分区,提出不同分区下生态保护修复策略。此类研究方法和结果为应用生态系统服务与生态安全的进一步深入结合、综合应用范围的扩展的可行性的提供了参考,对提高环境资源利用率,改善生态系统服务质量及时空分布不均衡性等有所帮助,结合当下研究热点,二者的结合对未来生态安全屏障建设、国土空间开发规划、生态系统保护与恢复等方面的发展有重要意义。

3 不足与展望

在人地耦合的背景下,生态系统服务与生态安全的紧密结合对地区生态安全状况、功能维持与生态发展等意义重大。而从已有的基于生态系统服务的生态安全研究来看,其方法体系、二者耦合深度、研究尺度及范围等方面仍有诸多需要进一步完善和发展的地方。

3.1 耦合生态系统服务与生态安全的方法体系需进一步完善和创新

基于生态系统服务的生态安全研究尚不深入,其研究指标及方法体系仍有待进一步改善。当下对生态安全评价标准仍不统一[72],主观性较强,需根据实际的生态安全问题分类构建生态阈值数据库,制定科学、统一的评价标准[19]。在生态安全格局构建过程中,采用的模型与指标应满足生态系统服务与生态安全的动态性与复杂性等特性[21]。InVEST 模型对人-地系统中的需求方面的应用较薄弱,而 ARIES 模型对生态系统服务流动的时空动态及需求方面更加关注,能更好的反映人-地系统间关系的复杂性、过程的动态性及由变化产生的影响[73],但该模型开发较晚,仍在不断完善。在深化生态系统服务与生态安全的结合过程中,可考虑依据具体生态过程,将 ARIES 与 InVEST 进行结合使用,或逐渐完善基于 ARIES 模型的应用体系。在生态廊道的建设中,也可灵活地采用基于生物随机游走特性的电路理论补充最小阻力法在替代路径、廊道范围及关键节点识别等方面的不足[22],此外,单独依据生态系统服务取倒数等形式构建阻力面提取生态廊道进行的可靠性也有待进一步考证。

3.2 未来多情景预测的研究需要加强

全球气候变化对人类社会及地表过程已造成显著的持续性影响[5],生态安全状态受气候、社会发展以及

人类活动强度等动态性环境因素的影响,不断地发生着变化,探讨生态安全在这些变化的情境中的响应机制对生态安全状态的改善与维持有重要意义。然而目前的生态安全研究大多针对现状,针对未来气候变化和社会发展情景或不同人类活动强度情景下生态安全格局如何适应与调整等方面的研究较为缺乏。CA-Markov 模型、改进的细胞自动机 MOLAND 模型、RBF 神经网络、GM 模型以及集对分析[74—75]等情景分析、模型模拟预测方法各有优缺。未来应加强各格局模型、格局过程关系模型、空间统计模型等不同模型之间的耦合,发挥不同模型优势,提高模拟的效率和准确性,以更好的发展生态安全多情景预测[11]。

3.3　生态安全研究的尺度效应需进一步强化

生态安全问题存在于一个多要素的复杂耦合系统中,涉及的生态过程并不是封闭独立的,仅强调某一特定区域的规律不能反映生态系统在更高尺度上的特征[76],所以要进行跨尺度、多等级的研究[19,77—78]。景观等小尺度和生态功能区、城市群等大尺度生态安全格局的共同分析有助于认知和把握区域生态安全问题微观细节及宏观背景,因此多尺度关联是生态安全格局构建的核心内容之一[26]。在单一尺度水平上,需要明确各尺度典型的生态系统服务格局特征及生态安全问题以正确选择适合该尺度水平的指标及方法;而在跨尺度的研究中,则需注意各指标在不同尺度上能否进行直接应用或推绎,以加强点线面、多尺度、多等级分析与融合,建立跨尺度-多尺度-多等级的集成生态安全研究范式。

参考文献(References):

[1] Zhou D, Lin Z L, Ma S M, Qi J L, Yan T T. Assessing an ecological security network for a rapid urbanization region in Eastern China. Land Degradation & Development, 2021, 32(8): 2642-2660.

[2] Qiu M, Yang Z L, Zuo Q T, Wu Q S, Jiang L, Zhang Z Z, Zhang J W. Evaluation on the relevance of regional urbanization and ecological security in the nine provinces along the Yellow River, China. Ecological Indicators, 2021, 132: 108346.

[3] Cao Y H, Liu M Y, Zhang Y, Chen C, Cao W D. Spatiotemporal evolution of ecological security in the Wanjiang city belt, China. Chinese Geographical Science, 2020, 30(6): 1052-1064.

[4] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 薛雄志. 生态安全研究进展. 生态学报, 2005, 25(4): 861-868.

[5] 应凌霄, 孔令桥, 肖燚, 欧阳志云. 生态安全及其评价方法研究进展. 生态学报, 2022, 42(5): 1679-1692.

[6] 刘浩, 舒昶, 周婷婷, 刘鹏. 阿勒泰地区基于土地覆被变化的生态系统服务协同与权衡关系及驱动力分析. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(6): 777-790.

[7] Wang Y, Bilsborrow R E, Zhang Q, Li J F, Song C H. Effects of payment for ecosystem services and agricultural subsidy programs on rural household land use decisions in China: Synergy or trade-off? Land Use Policy, 2019, 81: 785-801.

[8] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.

[9] White J D. Extinction; the causes and consequences of the disappearance of species, Paul Ehrlich and Anne Ehrlich. The American Biology Teacher, 1984, 46(6): 350.

[10] Che L, Zhou L, Xu J G. Integrating the ecosystem service in sustainable plateau spatial planning: a case study of the Yarlung Zangbo River Basin. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(2): 281-297.

[11] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.

[12] 何建华. 生态安全基本概念和研究内容. 山西水利, 2006, 22(1): 42-43.

[13] 王晓峰, 吕一河, 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 自然杂志, 2012, 34(5): 273-276, 298.

[14] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. 地理科学, 2018, 38(3): 361-367.

[15] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.

[16] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4121-4131.

[17] 何玲, 贾启建, 李超, 张利, 许皞. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟. 农业工程学报, 2016, 32(3): 275-284.

[18] 王耕, 王利, 吴伟. 区域生态安全概念及评价体系的再认识. 生态学报, 2007, 27(4): 1627-1637.

[19] 曹秉帅, 邹长新, 高吉喜, 何萍. 生态安全评价方法及其应用. 生态与农村环境学报, 2019, 35(8): 953-963.

[20] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展. 应用生态学报, 2018, 29(1): 335-342.

[21] 易浪, 孙颖, 尹少华, 魏晓. 生态安全格局构建:概念、框架与展望. 生态环境学报, 2022, 31(4): 845-856.

[22] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 王炎, 周旺明, 周莉, 于大炮, 赵福强. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为

例. 生态学报, 2020, 40(18): 6486-6494.

[23] 韩增林, 赵文祯, 闫晓露, 钟敬秋, 孟琦琦. 基于生态系统服务价值损益的生态安全格局演变分析——以辽宁沿海瓦房店市为例. 生态学报, 2019, 39(22): 8370-8382.

[24] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. Science of the Total Environment, 2018, 644: 781-790.

[25] Huang J M, Hu Y C, Zheng F Y. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: a case study of Jinan City. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 12414-12427.

[26] 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.

[27] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.

[28] 王云, 潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3455-3467.

[29] 宋婷, 李岱青, 张林波, 王光镇, 高艳妮, 杨春艳, 冯朝阳, 马欢. 秦巴山脉区域生态系统服务重要性评价及生态安全格局构建. 中国工程科学, 2020, 22(1): 64-72.

[30] Wang D C, Chen J H, Zhang L H, Sun Z C, Wang X, Zhang X, Zhang W. Establishing an ecological security pattern for urban agglomeration, taking ecosystem services and human interference factors into consideration. PeerJ, 2019, 7: e7306.

[31] 刘芳, 张星梓, 任静, 刘岳雄, 王万宾. 基于生态系统服务评价与最小阻力模型的生态安全格局构建——以临沧市为例. 环境科学导刊, 2021, 40(4): 78-83.

[32] 贺祥. 生态系统服务供给安全阈值视域下喀斯特地区生态安全演变. 地理科学, 2021, 41(11): 2021-2030.

[33] 王川. 基于生态系统服务供需匹配的兰州市生态安全格局构建[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.

[34] 林婧兰. 永春县森林生态系统服务功能评估及生态安全评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.

[35] 赵宇豪, 罗宇航, 易腾云, 王振宇, 王娜, 吴健生. 基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2475-2484.

[36] Jiang M, Jiang C, Huang W M, Chen W L, Gong Q H, Yang J, Zhao Y, Zhuang C W, Wang J G, Yang Z Y. Quantifying the supply-demand balance of ecosystem services and identifying its spatial determinants: a case study of ecosystem restoration hotspot in Southwest China. Ecological Engineering, 2022, 174: 106472.

[37] 陈田田, 彭立, 王强. 基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3956-3968.

[38] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 钟敬秋. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例. 自然资源学报, 2020, 35(3): 546-562.

[39] 彭立, 邓伟, 黄佩, 刘颖. 四川盆地多重生态系统服务景观指数评价与服务簇识别. 生态学报, 2021, 41(23): 9328-9340.

[40] 周汝波, 林媚珍, 吴卓, 刘汉仪, 钟亮. 基于生态系统服务重要性的粤港澳大湾区生态安全格局构建. 生态经济, 2020, 36(7): 189-196.

[41] 肖杨, 周旭, 蒋啸, 张继, 李洪广. 基于生态系统服务功能评价的贵阳市生态安全格局维护研究. 生态科学, 2020, 39(4): 244-251.

[42] 吴承祯, 洪伟, 洪滔. 基于改进的投影寻踪的森林生态系统生态价位分级模型. 应用生态学报, 2006, 17(3): 3357-3361.

[43] Jansson Å, Folke C, Rockström J, Gordon L, Falkenmark M. Linking freshwater flows and ecosystem services appropriated by people: the case of the Baltic Sea drainage basin. Ecosystems, 1999, 2(4): 351-366.

[44] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, Villa F. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: a case study in the Puget Sound, Washington, USA. Landscape and Urban Planning, 2016, 149: 31-42.

[45] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. Land Use Policy, 2016, 57: 405-417.

[46] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.

[47] 吴蒙. 长三角地区土地利用变化的生态系统服务响应与可持续性情景模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.

[48] 税伟, 杜勇, 王亚楠, 杨海峰, 付银, 范冰雄, 黄梦圆. 闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5188-5197.

[49] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于"重要性—敏感性—连通性"框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.

[50] Wang Y, Pan J H. Building ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: a case study in Ganzhou District, NW China. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118337.

[51] Ruan W Q, Li Y Q, Zhang S N, Liu C H. Evaluation and drive mechanism of tourism ecological security based on the DPSIR-DEA model. Tourism

Management, 2019, 75: 609-625.

[52] 郑洋, 于格, 钟萍丽, 王友霄. 基于土地利用变化和生态系统服务的海岸带生态安全综合评价——以胶州湾为例. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4097-4105.

[53] 张雪琪. 基于生态足迹模型的叶尔羌河平原绿洲生态安全研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2019.

[54] 潘竟虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595.

[55] Jin X X, Wei L Y, Wang Y, Lu Y Q. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: a case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(1): 563-590.

[56] 刘美娥, 唐柏梁, 程依凤. 基于生态系统服务重要性的生态安全格局构建——江西省上饶市玉山县为例. 南方国土资源, 2021,(10): 34-40.

[57] Xu J Y, Fan F F, Liu Y X, Dong J Q, Chen J X. Construction of ecological security patterns in nature reserves based on ecosystem services and circuit theory: a case study in Wenchuan, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(17): 3220.

[58] 周亚东. 基于景观格局与生态系统服务功能的海南岛森林生态安全研究[D]. 海口: 海南大学, 2014.

[59] 方臣, 匡华, 贾琦琪, 陈曦, 朱正勇, 叶琴. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的武汉市生态安全格局评价. 环境工程技术学报, 2022, 12(5): 1446-1454.

[60] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 宋荣. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建——以广西河池为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2596-2608.

[61] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(5): 1705-1715.

[62] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 赵丽, 郑宇, 魏明欢, 简卿. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2675-2684.

[63] 王李睿, 邓西鹏, 王晨, 穆振北, 李颖, 何东进, 游巍斌, 巫丽芸. 基于生态系统服务重要性与生态敏感性的生态空间划设——以福建省永春县为例. 生态学杂志, 2022, 41(1): 166-173.

[64] 张旭. 基于海绵城市的株洲市主城区生态空间格局构建研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.

[65] 刘双嘉. 基于生态系统服务供需与生境质量的京津冀生态安全格局构建研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.

[66] 王敏, 宋昊洋. 耦合功能分区的上海崇明岛生态安全格局构建. 园林, 2022, 39(3): 78-86.

[67] 李伊彤, 荣丽华, 李文龙, 程磊. 生态重要性视角下东北林区县域生态安全格局研究——以呼伦贝尔市阿荣旗为例. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1615-1625.

[68] 杜文武, 任超群, 张志杰, 骆畅. 基于生态系统服务供需的重庆市主城区生态安全格局构建. 园林, 2022, 39(3): 30-38.

[69] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 王振宇. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究. 生态学报, 2020, 40(23): 8417-8429.

[70] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化. 自然资源学报, 2021, 36(2): 342-355.

[71] 袁媛, 白中科, 师学义, 赵雪娇, 张嘉楠, 杨博宇. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复优先区确定——以河北省遵化市为例. 生态学杂志, 2022, 41(4): 750-759.

[72] 邓淏丹, 叶露锋, 刘丽香, 杨科, 韩永伟. 城市生态安全研究进展. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 248-259.

[73] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.

[74] Petrov L O, Lavalle C, Kasanko M. Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: applying the MOLAND model to Algarve, Portugal. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(1): 10-23.

[75] Gong J Z, Liu Y S, Xia B C, Zhao G W. Urban ecological security assessment and forecasting, based on a cellular automata model: a case study of Guangzhou, China. Ecological Modelling, 2009, 220(24): 3612-3620.

[76] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.

[77] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 刘勤, 高一薄, 衡嘉尧, 张惠婷. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例. 生态学报, 2022, 42(1): 91-104.

[78] Li Z T, Yuan M J, Hu M M, Wang Y F, Xia B C. Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP-DEMALTE model: a case study of the Pearl River Delta urban agglomeration. Ecological Indicators, 2019, 101: 595-602.