



因应中国城市化特质,生态安全格局构建实质是一种被动适应的、底线式的宏观生态系统管理,当前面临重要阈值设定、有效性评价、多尺度关联和生态过程耦合等核心科学问题。

区域生态安全格局构建研究进展与展望

彭建^{1,2}, 赵会娟², 刘焱序¹, 吴健生^{1,2}

(1. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 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)

摘要: 近年来,城市化的不断推进使得生态系统面临巨大压力甚至诱发生态灾难,而另一方面人类对于生态系统服务福祉的提升提出了新要求,因此经济发展和生态保护两者之间的矛盾不断激化。生态安全格局作为沟通生态系统服务和人类社会发展的桥梁,目前被视为区域生态安全保障和人类福祉提升的关键环节。在系统梳理生态安全格局与城市增长边界、生态网络、绿色基础设施和生态控制线等概念内涵异同的基础上,从热点区域、生态源地指标筛选、生态阻力面设置与修正、相关研究成果应用等方面阐释区域生态安全格局构建的现今研究进展,并指出当前研究的主要不足;同时提出了区域生态安全格局构建的重点方向,即生态安全格局构建的重要阈值设定、有效性评价、多尺度关联和生态过程耦合等四个方面。

关键词: 生态安全格局;生态源地;生态廊道;阻力面;研究进展与展望

DOI: 10.11821/dlj201703001

1 引言

快速的城市化进程已成为20世纪以来人类社会发展的最显著特征;在这个过程中伴随着高强度的土地开发与土地利用方式的快速转变,使原本脆弱的生态环境更趋恶化^[1,2],直接影响区域景观格局与可持续发展^[3-5],以及全球化背景下的经济竞争与国家安全^[6]。随着社会经济与生态环境问题的广泛关注,20世纪80年代初期生态安全开始成为国际生态系统研究的热点领域和人类社会可持续发展面临的新主题^[7,8];90年代后期,生态安全主题也逐渐受到国内学者的高度重视,相关研究迅速展开^[9]。生态安全理念旨在确保资源、环境和生态系统服务的安全、健康和可持续发展,通过强化有利的生态过程、控制有害的生态过程,寻求生态安全保障途径^[10-12]。而通过何种途径实现这一目标,成为生态安全研究亟需解决的现实问题。景观生态学以格局与过程的相互作用作为其核心研究内容,为生态安全的保护与生态系统的有效管理提供了重要的空间途径;生态安全格局这一概念的提出,正适应了生态安全研究对生态过程进行合理调控的理论诉求,也成为景观生态学空间格局—生态过程耦合理论指引实践的有效方式^[13]。

收稿日期: 2016-06-21; 修订日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271195)

作者简介: 彭建(1976-),男,四川彭州人,博士,副教授,研究方向为综合自然地理学、景观生态与土地利用、生态系统综合评估。E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

407-419 页

生态安全格局理论依据格局与过程的互馈作用,通过构建区域生态安全格局,达到对生态过程的有效调控,从而保障生态功能的充分发挥,实现区域自然资源和绿色基础设施的有效合理配置,确保必要的自然资源的生态和物质福利,最终实现生态安全^[9]。因而,生态安全格局目前已成为缓解生态保护与经济发展之间矛盾的重要空间途径之一^[14,15],也是从末端生态治理走向前端生态管理的必然选择,为中国新常态下寻求更加契合区域发展需求的生态保护提供了有力支撑。但是,目前对生态安全格局构建研究尚缺乏系统梳理,对于重要阈值确定和阻力面设置等关键问题仍未形成有效的解决方案,且存在对其构建结果缺乏有效性评价和对多尺度、跨行政边界的生态安全格局构建研究、耦合生态过程的关联解析关注不足等问题,尤其缺乏对重点研究方向的凝练与明晰。因此,本文在系统梳理生态安全格局及其相关概念内涵异同的基础上,从热点区域、源地识别和阻力面设置以及相关研究成果应用等方面,重点阐释生态安全格局构建研究的近今进展,并基于当前研究存在的不足,指出未来研究中应当重点推进的方向,以期有效推动生态安全格局构建的理论研究及其在中国新型城镇化路径下的实践应用。

2 生态安全格局相关概念辨析

目前,国际上与生态安全格局(Ecological Security Pattern, ESP)内涵相似或相关的概念,主要有城市增长边界(Urban Growth Boundary, UGB)、生态网络(Ecological Network, EN)、绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)和生态控制线(Ecological Control Line, ECL)等,本文对这些概念的内涵、起源、关注点和主要应用领域进行对比分析,便于更好地理解生态安全格局内涵(表1)。具体来看,UGB是在20世纪60-70年代美国的精明增长运动中,西方国家为防止城市蔓延而提出来的技术方案和管理手段^[16,17]。EN于20世纪80年代在欧洲出现,是为了应对区域生态功能区面积增加和质量提高有限,但人类活动导致的景观破碎化和生境面积萎缩已成为威胁野生生物生存的全球性问题^[18,19]。GI是20世纪90年代美国提出的与交通、桥梁等“灰色基础设施(Gray Infrastructure)”相对的国家自然生命保障系统^[20]。ECL是指为了维持生态系统服务,禁止或者限制开发建设的区域生态保护范围界线,而生态红线是比生态控制线的保护力度更为严格、更为特殊的底线式生态系统保护界线。生态安全格局缘起于景观生态规划方法,明确的景观生态安全格局概念则提出于20世纪90年代,最初是基于格局与过程的相互作用机制和格局优化与干扰分析途径,综合集成地理信息系统、空间模拟及预案分析等技术方法,识别适应生物保护和生态恢复的区域发展空间。随着2011年《国务院关于加强

表1 生态安全格局相关概念辨析

Tab. 1 Contrast between ecological security pattern and related concepts

名称	概念内涵	起源	关注点	主要应用
UGB	阻止城市无序蔓延,划分城市和乡村的分界线	20世纪60-70年代,精明增长运动	城市边界及土地扩展与游憩	城市规划
EN	由生态节点、廊道、缓冲区及自然保护区等组成的网络状景观	20世纪80年代,欧洲	生物多样性与自然保护	生态规划
GI	由一系列生态要素组成的自然生命保障系统	1999年,美国保护基金会和农业部林业局	自然保育与生态系统服务支撑	城市规划
ESP	维持生态系统健康及可持续服务的关键空间点、线、面	20世纪90年代,中国	生态系统健康及服务的可持续性	生态规划
ECL	阻止建设用地扩展,保育生态	2005年,中国	可开发区与生态保育区	生态与城市规划

环境保护重点工作的意见》(国发[2011]35号)的出台,重要生态安全空间的识别与保护已经提升为国家生态保护战略的核心组成^[21,22]。

宽泛地讲,生态安全格局构建可以被视为对已存在的或者潜在的对于维护、控制特定地段某种生态过程有着重要意义的关键生态要素,如节点、斑块、廊道乃至整体网络的空间识别及其生境恢复与重建;通过区域生态安全格局的构建,可以达到对特定生态过程的有效调控,从而保障生态系统功能及服务的充分发挥。因此,生态安全格局与上述四个概念有着共同的生态保护目标,即保障区域生态系统服务的可持续供给,提升区域发展的人类福祉。对比来看,生态安全格局构建理念在国外多以GI和EN等形式出现,而UGB和ECL近年来在国内则逐渐成为研究热点。基于生态保护视角,可以狭义地认为UGB和ECL是生态安全格局的线状边界,同时UGB、GI和EN的概念、设计与实施也丰富了生态安全格局的理论和实践内涵。但上述概念之间仍存在一定差异,产生这种分异的原因,既与提出者的学科背景、关注点和拟解决问题的差异不无关联,也与不同国家和地区面临生态环境问题的特征及严峻性有着直接联系。在中国复杂而脆弱的生态环境基底条件下,规模巨大的、短时期内快速的城乡建设活动使脆弱的城市生态环境面临巨大的生态灾害风险,而突发的灾害一旦发生其恢复的可能性极小或代价极大。同时,随着新型城镇化和生态文明建设这一国家战略的稳步推进,人们对于自然生态和文化休闲的需求日益增强,生态安全格局构建其实质成为一种被动适应的、底线式的宏观生态系统管理。另一方面,在欧美国家,尽管生境破碎化、生态多样性丧失被视为社会—生态系统可持续发展面临的核心瓶颈,但其生态安全问题的严重性远不及中国,漫长的、渐进式城市化过程亦有助于生态环境问题的缓解与消纳,产生的生态后果仍在可控或可恢复范围内,因此重在城市发展过程中的生态恢复及可持续性能力提升,以满足人类生态需求、保障社会福祉,其核心生态系统管理理念强调人的主动调控和事前规避。

近年来,城市生态安全(Urban Ecological Security, UES)和弹性基础设施(Secure Urbanism and Resilient Infrastructure, SURI)等理念也引起了国际学者的关注,有学者提出将关键的基础设施建设融入到生态安全研究中来,优先保护对于人类社会发展和生态维持具有关键意义的城市区域^[7],如Sutton-Grier等提出通过建设自然和人工混合的基础设施来增强海岸带生态系统的韧性^[23];也有学者采用星球边界(Planetary Boundary, PB)的概念框架,基于调控地球系统运行的关键过程,识别决定人类社会发展和生存的、可恢复的安全土地空间^[6]。在未来的研究中,实现这几个相关概念的有效衔接和相互补充,是生态安全格局理论深化和实践应用拓展的重要基础。随着全球化过程中国内外生态安全问题的趋同性和生态保护理念的相互渗透,不同国家、不同领域和不同关注点的生态安全格局相关概念在未来终会从交叉走向融合。

3 区域生态安全格局构建研究进展

综合来看,经过二十余年的发展,区域生态安全格局构建研究基于土地利用优化^[24]、生态基础设施建设^[20]、生态红线划定^[15]等视角,经历了从最初的定性规划、定量格局分析,到近年逐步发展起来的空数据演算、静态格局优化、动态格局模拟以及状态趋势分析等快速发展历程,其研究方法则主要涉及生态适宜性/敏感性分析、景观格局指数、情景分析、综合指标体系等。

当前,区域生态安全格局的构建模式仍在不断完善,指标与方法不一而足。但越来越多的研究采用“源地—廊道”的组合方式识别、构建生态安全格局,初步形成区域生

态安全格局的构建范式, 本文将其概括为以下三大基本步骤 (图1): ① 源地的确定。将对区域生态过程与功能起决定作用的, 以及对区域生态安全具有重要意义或者担负重要辐射功能的生境斑块, 识别为确保区域生态安全的关键地块, 即源地; 而源地的选取方法, 则主要包括定性的生态系统结构判定, 以及定量的生境重要性、生态敏感性、景观连通性等准则。② 廊道的识别。生态廊道是指生态网络体系中对物质、能量与信息流动具有重要连通作用, 尤其是为动物迁徙提供重要通道的带状区域。由于数据需求简单、运算效率高, 并具有可视化的分析结果, 最小累积阻力模型成为识别生态廊道的主要方法, 阻力面设置则成为廊道准确识别的关键。③ 战略点的设置。阻力面在源地所处位置下陷, 在最不容易到达的区域高峰突起, 两峰之间会有低阻力的谷线、高阻力的脊线各自相连; 而多条谷线的交汇点, 以及单一谷线上的生态敏感区、脆弱区, 则构成影响、控制区域生态安全的重要战略节点。将以上各种存在的、潜在的景观组分进行叠加组合, 就形成特定安全水平下的生态安全格局。整体而言, 生态源地的确定和生态廊道的识别是生态安全格局构建过程中两个核心环节, 而战略点设置目前尚未受到足够关注。

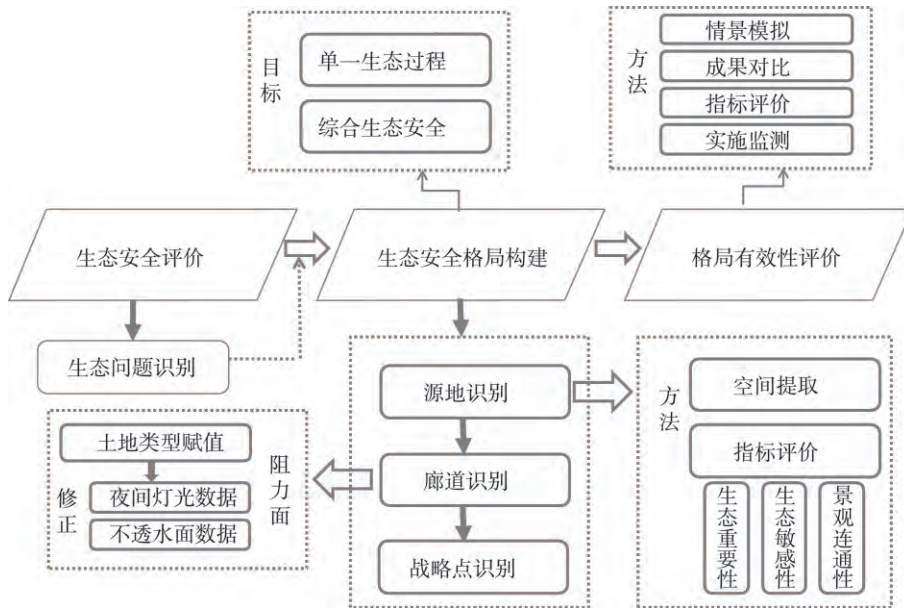


图1 区域生态安全格局构建逻辑范式

Fig.1 Logical paradigm for constructing regional ecological security pattern

3.1 热点区域

生态安全格局构建研究的空间层次, 主要包括全球、国家和区域等尺度, 其中区域被视为生态安全格局研究的重点尺度; 而按照研究对象的组织层次来划分, 还可以包括个体、种群、群落和生态系统等不同层次的生态安全格局研究。自20世纪90年代提出以来, 生态安全格局构建研究目前已经开展了不少个案研究。总体而言, 这些研究涉及面较广、尺度跨度大。按照生态保护目标来看, 具体涉及土地利用^[24]、生物多样性保护^[25]等研究对象; 按照研究区域的空间范围大小, 则涵盖景观^[13]、区域^[26]和国家^[27]等不同尺度; 按照研究区域的类型特征来看, 涉及城市化区域^[28,29]、农牧交错带^[30]、干旱/半干旱区^[31]、风景名胜區^[32]等多个社会—生态系统特征显著差异的区域。其中, 城市作为人类活动最为密集和改变地表最为强烈的区域单元, 生态安全问题尤为突出, 其生态安全格

局构建受到高度关注。

相对于大量针对人为活动剧烈区域的生态安全格局构建研究,目前以森林、草原等自然地域为对象的生物物种保护安全格局研究相对较少,水安全格局的研究近年来则逐渐引起重视^[33]。同时,由于人类活动和自然干扰,黄土丘陵区、喀斯特地区等生态环境较为脆弱、全球变化响应敏感区域的景观整体格局相对较为破碎、稳定性及恢复力差,针对这些特色地域关键生态过程的生态安全格局构建研究仍有待继续深入。而从景观空间格局及其生态过程交互作用出发,分析区域生态安全状况,明确对于物种生境和环境可持续性具有重要意义的生态过程和重要斑块、廊道、节点,即明晰区域生态安全格局,将为这些区域的生物多样性保护、水土保持等特定景观服务及其可持续性管理提供重要决策支持。

3.2 源地识别指标筛选

生态安全格局构建是以最小面积的生态用地保护来满足城市与区域社会经济发展的生态需求,是区域社会经济功能和生态系统服务的权衡结果,能够更好地协调区域生态安全与社会经济发展之间的矛盾。目前,生态源地识别通常基于生物多样性丰富度及生态系统服务重要性的考虑,大致可以分为两种途径:①直接识别,即选取自然保护区、风景名胜区的核心区等直接作为生态源地^[34]。这一方法具有很高的便捷性,但也有其固有的缺陷。例如,自然保护区或风景名胜区的设立本身即有强烈的行政管制因素,且随着时间的推移其内部的空间差异逐渐增强,尤其是随着旅游业在自然保护区的迅速发展,局部地区已经出现明显的生态退化、景观破碎化和生态系统服务下降等现象。此外,也有学者选择土地利用类型长期稳定且面积较大的斑块,如林地、耕地等作为生态源地^[35-37],但这一做法忽略了相同地类的内部差异。②构建综合评价指标体系识别生态源地。指标体系的有效性是区域生态安全源地识别的核心问题之一,由于对生态安全内涵理解的不一致和区域面临生态安全问题的具体差异,不同研究方案所选取的指标大不相同。总体来讲,已有研究所采用的指标可分为生态敏感性^[38,39]、景观连通性^[40]、生境重要性^[40]等维度,各类指标的适用性各有优劣。其中,生境重要性指标应用较为广泛,主要关注土壤保持、生物多样性保护、水源涵养和固碳释氧等具体生态系统服务。

从发展脉络来看,自生态安全格局构建研究开展以来,学者们对生态源地识别指标的筛选进行了重点完善,主要体现为从最初只考虑生态用地斑块自身功能属性^[41],到逐步关注斑块自身属性的动态变化趋势^[42],再到强调斑块在整个景观格局中的连通重要性等^[43]。而具体研究中,通常选择某个视角或多个视角相结合的方法,来进行源地的定量识别。例如,李宗尧等^[35]将生态系统敏感性、生态系统服务、生物多样性和水源地保护等指标结合起来构建生态安全格局;吴健生等^[43]基于景观连通性分析、生物多样性服务评估和生境质量评估来提取生态源地斑块;陈昕等^[40]基于生态系统服务重要性、生态敏感性及景观连通性识别生态源地。此外,由于城市景观具有高度的人类主导性^[44],在城市发展需求胁迫下,城市地域生态用地普遍面临着面积缩小、人工化严重、异质性下降、生态系统服务退化等结构与功能问题。基于生态经济学视角,生态保护必须同时考虑“成本”与“效益”两方面因素;由于生态用地受人类活动干扰越强,功能退化风险越大,其保护成本相应增大;因此,对应于斑块保留的生态收益与投入成本,城市生态用地保留价值评估需要综合权衡不同生态用地斑块的功能重要性与其功能退化风险。同时,生态安全格局的构建旨在提升生态系统服务水平、促进人类福祉的增益,因此源地的识别应当将满足人类需求作为首要目标,考虑其为人类提供有效服务的能力。

3.3 阻力面设置与修正

廊道是区域内能量和物质流动的载体,是保持生态流、生态过程、生态功能在区域内连通的关键生态组分;提取关键生态廊道,对于保障生态斑块之间的物质和能量流动的畅通,实现区域生态系统功能的完整性具有重要意义^[45]。目前,已发展了多种生态廊道的定量识别方法,如最小累积阻力模型^[46]、斑块重力模型^[19]、综合评价指标体系^[47]。其中,最小累积阻力模型能较好模拟景观对空间运动过程的阻碍作用,相比传统概念模型和数学模型能更好地表达景观格局和生态过程的相互作用关系,目前广泛应用于生态网络和生态安全格局构建^[48-49]。该方法的关键在于生态阻力面的设定,已有研究大多基于土地覆被类型,依据专家咨询打分直接赋值。由于城市景观的高度破碎化与土地利用方式的多样性,以及土地利用与生态过程相互作用的复杂性^[50],基于土地覆被类型的均一化赋值,必然会掩盖同一土地覆被类型下不同土地利用方式与强度对生态阻力系数的影响差异,难以真实反映生态阻力的空间分异。另一方面,对于不同地类的阻力值相对大小难以形成统一范式。例如,孔繁花等^[51]认为对于物种迁移的阻力可以设置为道路1000~5000,水体10000,城市建设区50000;也有学者的阻力赋值为道路景观300、河流水域500、建设用地1000、绿地系统0.7~20^[36];还有学者直接采用了不同地类阻力的相对大小,认为生态阻力值林地<灌草丛<水域和湿地<冰雪地<农田<城镇用地^[34]。

囿于数据精度,城市土地覆被分类体系不可能无限细分,因此有必要选取能够定量表征不同空间单元生态阻力差异的指数,修正基于土地覆被类型赋值的生态阻力面。近年来,已有学者尝试引入不同的空间数据对不同土地覆被类型生态阻力系数进行修正,而不透水表面指数(Impervious Surface Index, ISA)和夜间灯光(Nighttime Light, NTL)数据为该问题的解决提供了很好的途径,能够有效提升廊道提取的准确性与合理性。通过计算单位面积内不透水表面地表所占的面积比例,不透水表面指数可以定量表征自然生态流在城市景观中的可流通性,与城市地表生态过程紧密相关,能够有效度量城市生态/建设格局^[52];而夜间灯光数据能够基于栅格连续表征地表受人类干扰的空间分布特征,是城市化水平、经济状况、人口密度等人类活动强度的综合表达,体现同一用地类型内部受人类影响水平的差异^[53]。因此,应用不透水表面比例和夜间灯光数据修正传统基于土地覆被类型赋值的生态阻力面,将是未来关键生态廊道识别中生态阻力面设置的重要趋向。

3.4 相关研究成果应用

目前,基于生态安全格局构建方法的研究成果已大量涌现,但在中国多以生态网络、主体功能区、生态功能区和相关生态规划等形式出现,其实质是整合生态系统服务的生态空间异质性识别与管治。这些研究成果在中国的空间管制和区域主体功能识别与保护中发挥着重要作用,为国土生态管理提供战略决策支撑。例如,贾良清等在生态系统类型、生态敏感性和生态系统服务重要性等指标的基础上提出安徽省生态功能区划方案^[54],燕乃玲等考虑了水源涵养等7项生态系统服务将长江源区划分为五个一级生态功能区^[55],樊杰主持编制的主体功能区规划通过对可利用土地、环境容量等10项指标的适宜性评价形成中国首部主体功能区划方案^[56]。对比分析可以发现,这些研究其方法的实质均是基于生态敏感性、生态重要性指标体系对区域生态“源地”的空间识别和保护规划。此外,也有学者将生态安全格局的构建方法应用在城市增长边界和生态红线划定中,如周锐等以4种单一生态过程的生态安全格局为城镇增长的阻力因子划定城市增长边界,是对综合生态安全格局构建方法在城市增长边界中的直接应用^[57]。还有学者尝试基于单一要素的生态功能分区^[58],其实质也是针对单一要素生态安全格局的分级分类保护体系。

但目前的生态功能区划研究,大多基于生态环境现状及敏感性、重要性指标,对于景观空间格局考虑不足,强调空间异质而非保护的重要性或优先性。对于廊道这一对于区域物质、能量和信息输送及区际连通性具有重要意义的关键要素没有纳入考量体系。此外,功能区划与相关生态环境保护规划分别出自不同部门,各有不同的制度框架和内涵特征,彼此之间的政策和权能边界尚不清晰,对于生态保护实践的指导作用有限。因此,在未来的研究中,应有效借鉴和运用生态安全格局概念及其构建理论与方法,形成以生态安全格局构建为主导的生态功能区划体系,从而实现由主体功能区划、生态功能区划和空间管制区划向综合国土(生态)安全格局区划的转变,构建统一的城乡生态安全格局空间管治框架。

通过上述从热点区域、源地识别、阻力面设置以及相关研究成果应用等方面对区域生态安全格局构建研究进展的梳理,可以发现:①从生态安全格局构建对象的类型选择来看,主要集中在省域、市域和县域等区域,且已有研究中研究区多囿于特定的行政边界,缺乏城市群以及更大范围的跨尺度、跨行政边界研究;②评价指标的选取,已有研究大多仅考虑评价对象本身的特性,较少考虑与周边地域的关系和在整个区域中所处的地位和承担的功能,忽略了生态过程的耦合关联以及生态用地与人类福祉的相互关系,极少从人类生态需求角度去衡量生态用地的重要性;③从生态阻力面的设定来看,主要基于土地利用类型进行均一化赋值,掩盖了相同土地利用类型下的内部空间差异,基于不透水表面指数和夜间灯光数据的修正案例仍较少;④从相关研究成果应用来看,中国目前的主体功能区划、生态功能区划与生态安全格局构建的思路较为相似,相互交叉融合,均强调生态空间的异质性识别。但现有研究成果对于景观连通性和廊道识别考虑不足,且存在政策和权能边界不明等问题,对生态保护实践指引有限。

4 区域生态安全格局构建研究展望

城市扩展和剧烈的人类活动快速且高强度地改变着地表景观的结构与功能,造成经济发展与生态保护的矛盾日益激化,而区域生态安全格局的构建可以有效地保护重要生态斑块,是目前陆地生态安全屏障建设的有效途径之一,得到了公众与学界的普遍关注。目前,中国区域生态安全格局构建研究工作虽已大量开展,但对于某些问题或亟需高度关注,或尚未形成有效的解决方案,在未来的工作中仍需重点推进(图2):重要阈值的确定在源地识别、廊道宽度设定和保护区划分等各个环节都高度制约研究结果的有效性,是区域生态安全格局构建的基础要点;尽管生态安全格局构建难以通过可控实验的途径对照完成,有效性评价仍是生态安全格局构建的关键环节,应引起高度关注;基于多尺度、跨行政边界的生态安全格局构建对于解决多层次的生态安全问题具有重要意义,应作为生态安全格局构建研究的核心内容重点探讨;而深入解析生态过程之间的耦合关联,实现山水林田湖生命综合体一体化管理,是生态安全格局构建的重点突破方向。

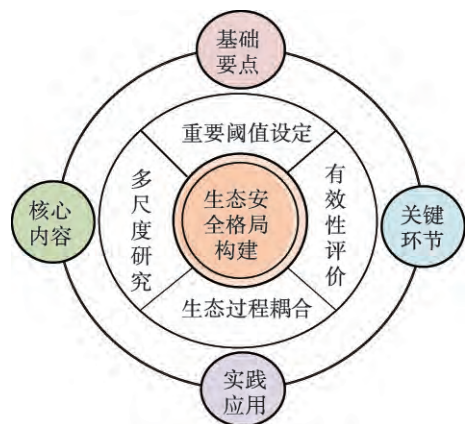


图2 区域生态安全格局构建研究框架
Fig.2 Research framework for regional ecological security pattern construction

4.1 区域生态安全格局构建重要阈值设定

区域生态安全格局强调在自然过程/生物过程及人文过程等多过程中存在一系列不同层次的阈值, 以此为依据确定维护生态过程的关键组分及其构成, 并对其进行空间上的格局优化与类型组合, 能够保障自然生态过程的可持续发展^[59]。确定生态安全的标准, 即评价指标的阈值, 不仅对生态安全格局构建本身极其重要, 而且直接关涉生态安全研究, 是生态安全格局构建研究的基础要点。但是, 生态安全标准究其实质是一个人类标准, 评判某个状态是否安全在很大程度上取决于相关社会群体的人类福祉期望。面向同一生态系统, 由于人类期望值的差异, 其生态安全评估的结果也会迥然不同; 同时, 由于人类的主观期望是动态变化的, 安全更是一个时间维度上的相对概念, 绝对的安全标准是不存在的。因此, 在相关研究中, 不仅要关注重要指标和过程的阈值, 还要探讨生态安全格局构建中阈值的时间动态变化与空间分异, 增加对时空动态演变规律的认知与把握。

人类活动维持和生态系统服务保持“双赢”的景观优化方案是当前景观生态规划长期努力的目标^[60,61], 权衡利弊以获取整体最优一直以来都是可持续性战略的基本指导思想。因此, 城市最小生态用地需求测算或生态源地识别及其阈值确定, 其实质是对生态用地保护和建设用地扩张, 以及城市社会经济功能和生态系统服务之间的权衡。目前, 生态安全格局阈值设定仍未形成统一范式, 基本为主观判断的结果, 对生态安全的指示意义并不明确。例如, 廊道是具有一定宽度的现状景观类型, 一般认为生态廊道越宽越好; 但在土地资源高度紧缺的城市化地区, 城市生态廊道宽度的确定既要考虑生态效益的充分发挥, 又要兼顾经济发展的需求, 因此设置合理的城市生态廊道宽度就显得尤为重要^[62]。但是, 目前对于其宽度的阈值设定及其指标选取、方法等方面仍未形成共识^[63,64]。此外, 生态安全格局分区管控是对生态风险进行有效控制的策略之一, 其分区比例的设置是影响当地政府和保护者能否以最小的财力投入而收益最大化地保护生态斑块的直接因素, 这一关键阈值如何准确设定在未来的研究中亟需关注。

4.2 区域生态安全格局构建有效性评价

当前大多数已有研究多依据不同的标准、不同的生态保护目标或者不同的安全格局水平, 构建相应的生态安全格局, 但对所构建生态安全格局的有效性或合理性缺少评价, 尤其是定量评价极为少见。一方面, 是由于该问题尚未引起学者们的足够重视; 另一方面, 也与动态监测进而定量化评价的代价大、风险高、时间长等困难有着密切关系。但是, 在设计方案实施后, 动态监测、评价方案的实施效果, 对照初始目标差异, 反馈调整设计方案, 是可持续的生态安全格局构建的基本途径。因此, 有效性评价是区域生态安全格局构建研究的关键环节, 应引起广泛重视。

目前, 已有研究大多将已构建的区域生态安全格局与现有的用地方式及区域发展需求对比, 定性地评价已构建格局的优劣; 不过, 也有学者开始探索生态安全格局构建有效性的定量化评价方法。例如, 俞孔坚等^[28]将“无、低、中、高”等不同生态安全水平下的土地利用方式作为城市空间发展的预案, 对比不同水平生态安全格局下生态保护、农业生产、城市增长等多目标实现的可能性和程度; 李阳菊等^[65]则以景观格局指数作为生态安全格局构建优劣评价的定量依据。在未来的研究中, 采用动态的监测方法实时评估生态安全格局构建的有效性、发展定量的评估方法, 是重要的目标指向。此外, 采用成果对比法, 将生态安全格局构建结果与生态控制线、绿色基础设施等研究成果对比, 从数量和质量的双重角度评估不同构建方法和不同保护策略下的实施效果异同, 也是生态安全格局构建有效性评价的可能途径之一, 同时也有助于实现不同生态保护理念和途

径的有效衔接。

4.3 区域生态安全格局构建多尺度关联

为生态环境保护提供理论依据和决策支持是生态安全格局构建的重要实践意义之所在。以行政区作为分析单元、对象,不仅在数据获取方面有很大的便利性,也有利于决策者针对不同行政区的生态安全问题制定针对性政策,更有利于获得生态保护的地方财政支持。因此,目前已有生态安全格局构建多以行政区界线为分析边界。但是,生态安全问题的产生和发展并不完全受行政边界制约,自然地理基底的空间连续性、生态系统服务与环境污染的空间流动性,都决定了特定行政区生态安全格局的构建需要考虑更大自然地域空间范围内相关因素的影响。同时,区域生态安全问题存在于一个多要素的复杂耦合系统中,其应对与解决也理应是在一个跨尺度、多等级的系统中,因此生态安全格局的构建不能仅仅局限于一定的空间尺度,在景观等小尺度和生态功能区、城市群等大尺度的生态安全格局分析更有助于对区域生态安全问题的微观细节认知和宏观背景把握,多尺度关联由此成为生态安全格局构建的核心内容。

随着中国城市群不断发育及其对区域社会经济发展和生态环境保护的支撑作用越来越显著,城市群作为未来城镇化的主体形态,其快速发展背后的资源环境效应也引起了人们的高度关注,因此城市群将成为生态安全格局构建的重点尺度。但是,生态环境问题的存在并不以一定的行政边界为界线,城市群也只是生态安全问题存在的空间载体之一,如同生态功能区、国土与地区、大洲范围的生态安全格局构建一样,需要突破行政边界的制约。目前,中国已经开展了国土尺度的生态安全格局构建工作,保障了国土空间关键生态系统运行、维持了重要生态要素和过程。而随着区域合作和国际交流的不断深入,以及“一带一路”战略的实施,跨地区、国家的生态安全战略合作将为全球生态环境问题的解决提供良好契机。

4.4 基于生态过程耦合的区域生态安全格局构建

景观格局与生态过程的耦合是景观生态学研究的核心内容,而区域生态安全格局构建其实质就是依循格局与功能的互馈,通过特定空间斑块、廊道的景观结构保护,来实现特定或综合生态功能/过程的保育。但在区域综合生态安全格局的构建过程中,单一生态过程机理解析及多过程耦合方法的不同,将对区域生态安全格局构建的最终结果有着直接影响。目前,已有基于重要生态过程的生态安全格局构建多采用权重法进行不同生态过程的耦合,将生态用地斑块在不同生态过程准则下的重要性得分按照不同的权重来综合叠置。也就是说,在区域生态安全格局构建中,假定不同生态过程之间相互兼容,彼此之间不存在协同或权衡关系。但事实上,不同生态过程之间存在密切的相互作用、相互影响,其与整体生态功能的耦合关联可能大相迥异。因此,有必要深入解析不同生态过程的耦合关联,构建面向山水林田湖生命共同体一体化管理的区域生态安全格局。

在未来的研究中,有必要在深入解析多种生态过程耦合机制的同时,采用多元数据融合和多学科、跨学科整合的方式,寻找更契合生态安全格局构建的耦合途径;将不同生态过程和生态要素当作一个生命共同体,强调生命共同体的相互作用和影响。同时,关注不同群体的利益诉求,开展长期的统一计划、行动和管理,做到整体保护、系统修复、综合治理,切实构建区域生态安全的空间保障。

参考文献(References)

- [1] Naveh Z. From biodiversity to ecodevity: A landscape-ecology approach to conservation and restoration. *Restoration Ecology*, 1994, 2(3): 180-189.
- [2] 蒋艳灵,刘春腊,周长青,等.中国生态城市理论研究现状与实践问题思考. *地理研究*, 2015, 34(12): 2222-2237. [Ji-

- ang Yanling, Liu Chunla, Zhou Changqing, et al. Overview of theoretical research and practical considerations on ecocities of China. *Geographical Research*, 2015, 34(12): 2222-2237.]
- [3] 侯鹏, 王桥, 申文明, 等. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. *地理研究*, 2015, 34(10): 1809-1823. [Hou Peng, Wang Qiao, Shen Wenming, et al. Progress of integrated ecosystem assessment: Concept, framework and challenges. *Geographical Research*, 2015, 34(10): 1809-1823.]
- [4] Li Y F, Sun X, Zhu X D, et al. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China. *Ecological Modeling*, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [5] Su S L, Li D, Yu X, et al. Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(6): 737-746.
- [6] Hodson M, Marvin S. 'Urban ecological security': A new urban paradigm?. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(1): 193-215.
- [7] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [8] Wu J G. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125(2): 209-221.
- [9] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述. *地理科学进展*, 2005, 24(6): 8-20. [Chen Xing, Zhou Chenghu. Review of the studies on ecological security. *Progress in Geography*, 2005, 24(6): 8-20.]
- [10] Dabelko G D, Dabelko D D. Environmental security: Issues of conflict and redefinition. *Environmental Change and Security Project Report*, 1995, 1(1): 3-13.
- [11] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. *地理研究*, 2010, 29(3): 383-396. [Fu Bojie. Trends and priority areas in ecosystem research of China. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 383-396.]
- [12] Liu D, Chang Q. Ecological security research progress in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 111-121.
- [13] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [14] 李月辉, 胡志斌, 高琼, 等. 沈阳市城市空间扩展的生态安全格局. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 875-881. [Li Yuehui, Hu Zhibin, Gao Qiong, et al. Ecological safety pattern of spatial extension in Shenyang City. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(6): 875-881.]
- [15] 欧定华, 夏建国, 张莉, 等. 区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 163-173. [Ou Dinghua, Xia Jianguo, Zhang Li, et al. Research progress on regional ecological security pattern planning and discussion of planning technique flow. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 163-173.]
- [16] Cho S H, Poudyal N, Lambert D M. Estimating spatially varying effects of urban growth boundaries on land development and land value. *Land Use Policy*, 2008, 25(3): 320-329.
- [17] 张润朋, 周春山. 美国城市增长边界研究进展与述评. *规划师*, 2010, 26(11): 89-96. [Zhang Runpeng, Zhou Chunshan. Urban growth boundary research in America. *Planner*, 2010, 26(11): 89-96.]
- [18] Esbah H, Cook E A, Ewan J. Effects of increasing urbanization on the ecological integrity of open space preserves. *Environmental Management*, 2009, 43(5): 846-862.
- [19] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1-2): 16-27.
- [20] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 2002, 20(3): 12-17.
- [21] 李明晶, 刘洁贞, 李颖, 等. 新型城镇化背景下生态控制线划定与管控方法: 以肇庆市生态控制线规划为例. *规划师*, 2015, 31(9): 51-55. [Li Mingjing, Liu Jiezheng, Li Ying, et al. Ecological line control and governance in new urbanization: Zhaoqing ecological control line planning. *Planner*, 2015, 31(9): 51-55.]
- [22] 林勇, 樊景凤, 温泉, 等. 生态红线划分的理论和技术. *生态学报*, 2016, 36(5): 1244-1252. [Lin Yong, Fan Jingfeng, Wen Quan, et al. Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological redline zones. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5): 1244-1252.]
- [23] Sutton-Grier A E, Wowk K, Bamford H. Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environmental Science and Policy*, 2015, 51: 137-148.
- [24] 蒙吉军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. *生态学报*, 2012, 32(21): 6755-6766. [Meng Jijun, Zhu Likai, Yang Qian, et al. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6755-6766.]
- [25] Zhao X Q, Xu X H. Research on landscape ecological security pattern in a eucalyptus introduced region based on biodiversity conservation. *Russian Journal of Ecology*, 2015, 46(1): 59-70.
- [26] 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. *生态学报*, 2013, 33(5): 1524-1534.

- [Su Yongxian, Zhang Hongou, Chen Xiuzhi, et al. The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1524-1534.]
- [27] MacMillan R A, Moon D E, Coupé R A. Automated predictive ecological mapping in a forest region of BC, Canada, 2001-2005. *Geoderma*, 2007, 140(4): 353-373.
- [28] 俞孔坚, 王恩思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长前景. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204. [Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua, et al. The function of Ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1189-1204.]
- [29] 方淑波, 肖笃宁, 安树青. 基于土地利用分析的兰州市城市区域生态安全格局研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2284-2290. [Fang Shubo, Xiao Duning, An Shuqing. Regional ecosecurity pattern in urban area based on land use analysis: A case study in Lanzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2284-2290.]
- [30] 王让虎, 李晓燕, 张树文, 等. 东北农牧交错带景观生态安全格局构建及预警研究: 以吉林省通榆县为例. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(2): 111-115. [Wang Ranghu, Li Xiaoyan, Zhang Shuwen, et al. Research for landscape ecological security pattern and early warning in farming-pastoral zone of northeast China: A case study of Tongyu county in Jilin province. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(2): 111-115.]
- [31] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. *生态学杂志*. 2016, 35(3): 791-799. [Pan Jinghu, Liu Xiao. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule River basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 791-799.]
- [32] 张玉虎, 于长青, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 风景区生态安全格局构建方法研究: 以北京妙峰山风景区为例. *干旱区研究*, 2008, 25(3): 420-425. [Zhang Yuhu, Yu Changqing, Tashpolat Tiyip, et al. Methodology for constructing the landscape ecological security pattern in scenic area: A case study in the scenic area in the Miaofeng Mountain. *Arid Zone Research*, 2008, 25(3): 420-425.]
- [33] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架. *生态学报*, 2016, 36(11): 3137-3145. [Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Progress and conceptual framework of regional water security pattern construction. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3137-3145.]
- [34] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936. [Li Hui, Yi Na, Yao Wenjing, et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 5928-5936.]
- [35] 李宗尧, 杨桂山, 董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建: 以安徽沿江地区为例. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 106-113. [Li Zongyao, Yang Guishan, Dong Yawen. Establishing the ecological security pattern in rapidly developing regions- A case in the AYRAP. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 106-113.]
- [36] 许文雯, 孙翔, 朱晓东, 等. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. *生态学报*, 2012, 32(4): 1264-1272. [Xu Wenwen, Sun Xiang, Zhu Xiaodong, et al. Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1264-1272.]
- [37] 李晶, 蒙吉军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建: 以鄂尔多斯市准格尔旗为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(4): 707-715. [Li Jing, Meng Jijun, Mao Xiyan. MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: A case study of Jungar Banner, Ordos. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(4): 707-715.]
- [38] 曹玉红, 曹卫东, 吴威, 等. 基于自然生态约束空间差异的区域生态安全格局构建. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 106-109. [Cao Yuhong, Cao Weidong, Wu Wei, et al. Constructing regional ecological security pattern based on the spatial difference of eco-environmental restriction. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 106-109.]
- [39] 钱颖, 杨建军. 基于生态敏感性和景观格局的城市生态带规划探究. *中国园林*, 2014, (6): 107-111. [Qian Ying, Yang Jianjun. Research on urban ecological belt planning based on ecological sensitivity and landscape structure. *Chinese Landscape Architecture*, 2014, (6): 107-111.]
- [40] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮山市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484. [Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [41] 赵筱青, 王海波, 杨树华, 等. 基于GIS支持下的土地资源空间格局生态优化. *生态学报*, 2009, 29(9): 4892-4901. [Zhao Xiaqing, Wang Haibo, Yang Shuhua, et al. GIS-based ecological optimization of spatial patterns of land resources. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4892-4901.]
- [42] 黎燕琼, 张海鸥, 龚固堂, 等. 成都市景观生态安全格局动态变化. *西南林业大学学报*, 2012, 32(6): 48-53, 58. [Li Yanqiong, Zhang Haiou, Gong Gutang, et al. The dynamic change of landscape ecological security pattern in Chengdu Municipality. *Journal of Southwest Forestry University*, 2012, 32(6): 48-53, 58.]
- [43] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133. [Wu Jiansheng, Zhang Liqing, Peng Jian, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4125-4133.]

- [44] 彭建, 王仰麟, 景娟, 等. 城市景观功能的区域协调规划. 生态学报, 2005, 25(7): 1714-1719. [Peng Jian, Wang Yanglin, Jing Juan, et al. Research on integrated regional planning of urban landscape functions. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1714-1719.]
- [45] 李卫锋, 王仰麟, 彭建, 等. 深圳市景观格局演变及其驱动因素分析. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1403-1410. [Li Weifeng, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Landscape spatial changes in Shenzhen and their driving factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1403-1410.]
- [46] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [47] 张小飞, 李正国, 王如松, 等. 基于功能网络评价的城市生态安全格局研究: 以常州市为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 728-736. [Zhang Xiaofei, Li Zhengguo, Wang Rusong, et al. Study on network analysis for urban ecological security pattern in Changzhou City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4): 728-736.]
- [48] Wang Y H, Yang K C, Bridgman C L, et al. Habitat suitability modelling to correlate gene flow with landscape connectivity. *Landscape Ecology*, 2008, 23(8): 989-1000.
- [49] Huck M, Jędrzejewski W, Borowik T, et al. Analyses of least cost paths for determining effects of habitat types on landscape permeability: Wolves in Poland. *Acta Theriologica*, 2011, 56(1): 91-101.
- [50] HepcanÇ C, Özkan M B. Establishing ecological networks for habitat conservation in the case of Çeşme-Urta Peninsula, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 174(1-4): 157-170.
- [51] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719. [Kong Fanhua, Yin Haiwei. Developing green space ecological networks in Jinan city. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1711-1719.]
- [52] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征: 以深圳市为例. 地理学报, 2011, 66(7): 961-971. [Liu Zhenhuan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971.]
- [53] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, et al. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2016, DOI: 10.1007/s11252-016-0629-y.
- [54] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 安徽省生态功能区划研究. 生态学报, 2005, 25(2): 254-260. [Jia Liangqing, Ouyang Zhiyun, Zhao Tongqian, et al. The ecological function regionalization of Anhui Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 254-260.]
- [55] 燕乃玲, 赵秀华, 虞孝感. 长江源区生态功能区划与生态系统管理. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 598-602. [Yan Nailing, Zhao Xiuhua, Yu Xiaogan. Ecosystem delineation on priority ecosystem services and ecosystem management in the upper Yangze river. *Resources and Environment in the Yangze Basin*, 2006, 15(5): 598-602.]
- [56] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201. [Fan Jie. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [57] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012. [Zhou Rui, Wang Xinjun, Su Hailong, et al. Identification and security pattern of ecological land in Pingdingshan newly developed area. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 2003-2012.]
- [58] 黄艺, 蔡佳亮, 吕明姬, 等. 流域水生态功能区划及其关键问题. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1995-2000. [Huang Yi, Cai Jialiang, Lv Mingji, et al. Aquatic ecological function regionalization at watershed scale and its key issues. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1995-2000.]
- [59] Groffman P M, Baron J S, Blett T, et al. Ecological thresholds: The key to successful environmental management or an important concept with no practical application? *Ecosystems*, 2006, 9(1): 1-13.
- [60] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: From theory to implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(28): 9455-9456.
- [61] Tallis H, Kareiva P, Marvier M, et al. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *PNAS*, 2008, 105(28): 9457-9464.
- [62] Peng J, Zhao H J, Liu Y X. Urban ecological corridors construction: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 23-30.
- [63] Hobbs R J. The role of corridors in conservation: Solution or bandwagon? *Trends in Ecology and Evolution*, 1992, 7(11): 389-392.
- [64] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412. [Zhu Qiang, Yu Kongjian, Li Dihua. The width of ecological corridor in landscape planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.]
- [65] 李阳菊, 马立辉, 赖杨阳, 等. 重庆合川区城乡绿地系统景观生态安全格局分析. 西南农业大学学报: 社会科学版, 2010, 8(3): 1-4. [Li Yangju, Ma Lihui, Lai Yangyang, et al. Urban and rural landscape ecological security pattern of the green space system analysis in Hechun, Chongqing. *Journal of Southwest Agricultural University: Social Science Edition*, 2010, 8(3): 1-4.]

Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction

PENG Jian^{1,2}, ZHAO Huijuan², LIU Yanxu¹, WU Jiansheng^{1,2}

(1. Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: In recent years, due to the continuous urbanization, natural ecosystems are under enormous pressure, even resulting in ecological catastrophes. Moreover, with the start of the New Urbanization and Ecological Civilization Construction work in China, the demand for improvement of ecosystem services to promote human well-being is increasing. Hence, there is an intensifying contradiction between economic development and ecological protection. Ecological security patterns (ESPs) as a bridge linking ecosystem services and human society, has become one of the effective ways of constructing the protective barriers for terrestrial ecosystems. The ESPs construction directly affects the balance between social development and ecological conservation, and thus it has become the key to solving ecological problems and improving human well-being. To improve and enrich the theory of ESPs, we systematically combed the similarities and differences in the connotation of ESPs and other four main relevant concepts, namely urban growth boundary (UGB), ecological networks (EN), green infrastructure (GI), and ecological control lines (ECL). Furthermore, a research paradigm of regional ESPs construction was proposed based on literature review. According to this paradigm, research progresses on four main aspects were summarized systematically. These four aspects were research hotspots, ecological sources identification, ecological resistance surface setting, and practical application. Then the main deficiencies were indicated and summarized as follows: (1) The research objects selected in previous studies were mainly concentrated in the province, city and county levels, and were more confined to a specific administrative region, lacking larger-scale researches across administrative boundaries. (2) The selection of ecological index was mostly based on the intrinsic characteristics of ecological patches, less considering its relationship with surrounding objects and its status and functions in the whole pattern. And many studies ignored the coupling of human ecological demand and ecological processes. (3) The ecological resistance surface was assigned mainly based on land-use type, which covered up the difference between the internal space of the same land use type. The amended case studies based on impervious surface area and nighttime light were still insufficient to reveal the real situation. (4) Most of the provided policy recommendations for the protection and management of ESPs were broad and lack of the effective real-time monitoring and comparison to ecological security pattern. Based on the main disadvantage of regional ESPs construction in the current researches, we put forward four main directions for future research: setting important thresholds, evaluating the effectiveness of ESPs, constructing ESPs across multi-scales, and coupling the ESPs with ecological processes.

Keywords: ecological security patterns; ecological source; ecological corridor; resistance surface; research progress and prospect