

DOI: 10.5846/stxb201803090469

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的理论框架. 生态学报, 2018, 38(12): - .

Jing Y C, Chen L D, Sun R H. A theoretical research framework for ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建的理论框架

景永才^{1,2}, 陈利顶^{1,2,*}, 孙然好¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:近年来,生态系统服务供需失调引发的一系列问题,诸如城市热岛、生态用地流失、环境污染、生物多样性减少等生态风险问题,已成为威胁生态安全、制约社会经济可持续发展的重要因素。因此生态系统服务供需平衡是生态安全健康发展的保障和关键。梳理了生态系统服务评价、生态安全格局构建的研究现状,指出了存在的不足,同时构建了基于生态系统服务的城市群生态安全格局基本框架,并提出了生态安全格局未来的研究重点:城市群区域和城市内部生态系统服务的多尺度综合评价、城市功能区的划分及对生态安全的胁迫作用、生态过程与生态系统服务与生态安全的耦合、基于生态系统服务流的生态安全格局构建、模拟和优化。通过耦合社会经济数据、卫星遥感数据、城市地图大数据,评价城市内部和外部不同尺度的生态系统服务,保障城市群生态系统服务流畅通传输,实现城市群生态安全格局评价和优化。

关键词:城市群;生态安全格局;生态系统服务

A theoretical research framework for ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand

JING Yongcai^{1,2}, CHEN Liding^{1,2,*}, SUN Ranhao¹

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract: In recent years, the imbalance and disorder of supply and demand of ecosystem services is causing a series of problems in the ecological environment, such as the intensifying urban heat island effect and environmental pollution, loss of ecological land, and the aggravation of ecological risk and so on, and becoming important factors threatening eco-security and restricting the sustainable development of social economy. So, maintaining the balance between supply and demand of the ecosystem services and constructing a healthy eco-security pattern are the guarantee and key to the healthy development of eco-security. In this study, we reviewed the research status of ecosystem service evaluation and eco-security pattern construction, analyzed the existing deficiencies, established the basic framework for an eco-security model for urban agglomeration based on ecosystem services, and then proposed the future research focus of ecological security pattern, which included the multi-scale comprehensive assessment of urban agglomeration area and urban internal ecosystem services, the division of urban functional areas and its stress on eco-security, the interconnection of ecological processes, ecosystem services and ecological security, the construction, simulation and optimization of ecological security pattern based on ecosystem service flow. By coupling socio-economic data, satellite remote sensing data sets, and big data from urban maps,

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0503000)

收稿日期:2018-03-09; **修订日期:**2018-04-28

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

the ecosystem services at different scales of inner city and outer city would be evaluated, the smooth transmission of ecosystem services of urban agglomeration would be guaranteed, and ultimately the assessment and optimization of the ecological security pattern of urban agglomeration would be realized.

Key Words: urban agglomeration; eco-security pattern; ecosystem services

快速城市化成为人类社会发展的最显著特征,人类对经济发展的不断追求与土地利用方式的改变,导致生态系统服务供需失衡,由此引发了一系列的生态环境问题,如沙尘暴、水污染、大气污染、温室效应、厄尔尼诺现象等,直接威胁到区域生态安全^[1]。随着人口增长、城市化和经济的快速发展,城市群已成为人类生活与生产的主要空间,以城市为对象的生态安全保障研究成为人类社会可持续发展的重要基础^[2-5]。生态系统服务供需平衡是生态安全的保障、维持区域生态健康发展的基础。然而,目前基于生态系统服务供需的城市群的生态安全格局构建多为理论研究,耦合生态过程^[6-8]和生态系统服务供需^[9-10]的有效应用较少;目前开展的生态安全评价多为静态评价,不能反映区域生态安全格局的动态变化过程,尚不能作为生态安全格局构建的基础;神经网络、遗传算法、元胞自动机、CA-Markov 模型等人工智能方法是生态安全的动态模拟有效手段,但是数据获取依旧十分困难;常见的空间分析方法主要有多准则分类法、空间叠加技术、情景模拟、人工智能优化法及以上方法的综合,综合模型集成了多个模型优点来解决生态系统服务的定量化和生态格局的优化问题,对城市群生态安全格局构建具有重要参考价值和借鉴意义;城市内部生态系统服务或城市生态基础设施服务^[11]研究较为模糊,城市绿色基础设施数据、城市景观格局数据获取困难,导致的研究成本高和评价结果误差较大等问题;生态系统服务评价、生态过程模拟在准确度、不同生态系统服务间的权衡上还尚不能满足生态安全格局构建的需要,如价值量法在评估过程中往往存在主观性强、结果具有不确定性的问题^[12-14],物质质量法评估的不同服务之间量纲不相同、不易于比较和综合评价的问题^[15],能值法由于部分生态系统服务与能值关系弱,导致能值转换率不易确定的问题^[16];多尺度的生态安全格局评价、构建、模拟和优化的可操作性和可实施性不强,缺少一个基于生态系统服务供需的生态安全格局评价和模拟平台^[2]。关于生态系统服务的研究主要集中在分类、评价方法和模型构建,如 Costanza^[13]、De Groot^[17]、MEA^[18]的从生态系统服务供给角度的分类,亦有如张彪和谢高地^[19]从人类对生态系统需求角度的分类;主要的评价模型有 InVEST、ARIES、SolVES 等。目前,生态系统服务供需平衡研究的不足主要体现在:(1)不确定性。随着城镇化的加速,生态用地转变为建设用地,生态系统调节服务下降,但是建设用地的增加又使得市民城市内的购物休闲等服务增加,最终生态系统服务的综合评价结果具有较大的不确定性,而这种不确定性对于城市生态格局的构建具有很强的影响。(2)城市内部研究较少。城市内部研究需要较高分辨率的遥感影像,且城市基础数据获取困难,导致城市生态系统服务评价结果较为粗糙,且由于数据获取渠道的不同,导致评价结果在时间尺度上缺少连贯性,在空间尺度上具有较大的差异。因此,高精度数据获取及耦合生态过程的生态系统服务评价,应用开放数据源、大数据和机器学习获取时空高分辨率数据、构建生态格局评价及模拟、优化成为生态安全格局构建的关键。因此本文从生态系统服务、生态安全格局内涵及其内在关系,到所需关键数据获取手段,再到生态安全格局框架构建进行了梳理和介绍。

1 城市群生态安全、生态系统服务供需内涵及其关系

1.1 城市群生态安全内涵

生态安全是指一个区域人类生存和发展所需的生态系统服务功能处于不受或少受破坏与威胁的状态,使生态环境保持既能满足人类和生物群落持续生存与发展的需要,又能使生态环境功能不受损害,并使其与经济社会处于可持续发展的良好状态^[19-20]。城市群生态安全是区域生态安全的典型,是通过对区域内的生态要素,如关键节点、斑块、廊道及生态网络的生态系统服务供给和需求的综合调控,实现城市内部和外部、行政

区之间的生态系统功能的充分发挥。目前城市群生态安全研究方向主要侧重于生态安全的理论研究和定性评价^[21-23]。城市群生态安全的内涵主要体现在两个方面:

(1)城市内部与外部的生态平衡与协调^[24]。主要有两方面的含义:第一,城市内部与外部的空间结构、自然环境、人类需求、人口构成与分布、社会经济活动方式和强度、基础设施有很大的差异性,生态系统服务和功能也不尽相同,因此构建生态安全格局须将两者分别考虑,并通过供需关系进行综合评价;第二,近几年,我国城镇化快速发展,要求我们需要在时间和空间尺度上,动态地考虑城镇化发展对生态系统服务供给和需求的影响,实现对生态系统服务供需的预测和模拟,进而构建可持续的生态安全格局,实现人类需求与生态系统的协调发展。

(2)城市群内不同行政单元间的生态系统服务流的正常运转。生态系统服务流是生态系统服务在自然和人为的双重驱动下,从供给源向受益汇发生的时空转移。其供给源为由生物(动植物、微生物)与非生物成分(光、热、水、土、气)相互作用形成的生态系统,其受益汇是人类从生态系统中获取利益的区域^[25],其本质就是生态系统服务、生态过程、生态功能和景观格局的耦合^[20,26]。生态安全是区域内土地利用变化、生态基础设施建设、生物流、物质流、能量流构成的供需网络的动态格局的综合表现,由于区域内不同行政区的生态环境、经济条件、城市定位、人口和产业构成的不同,导致区域内的生态系统服务流网络非常复杂,因此安全格局的构建要实现对生态系统服务流的正常运转。

1.2 生态系统服务供需内涵

生态系统服务是人类从生态系统中获得的各种惠益,包括有形的物质产品供给与无形的服务提供两方面,主要分为与人类活动直接相关的提供服务、调节服务和文化服务,以及维持其他类型服务所必需的支持服务^[13,27-28]。生态系统服务能力不受或少受威胁是构建生态安全格局的前提。目前生态系统服务研究,从研究内容上看,已从生态系统服务分类、单一类型供给计算、单一计算供给到生态系统服务生态学机制、权衡与协同作用、供需平衡、生态系统服务流的研究中^[25,29-34];从研究方法上看,已从静态研究描述到动态研究模拟,从定性解释到多个评估模型共同发展^[35-36]。从供给角度分析,生态系统服务包括供给服务、调节服务、支持服务、文化服务;从需求角度分析,生态系统服务包括:物质产品需求、生态安全维护需求和景观文化传承需求三大类^[19]。生态系统服务评估的内涵主要体现在两方面:

(1)供给与需求的量化统一。生态系统服务强调服务与人类福祉的关系,供给能否满足人类需求及能满足的程度,评价的方法主要有价值量评估、物质量评估和能值评估法。各评估方法都有较明显的适用条件和不足,其中价值量评估法的主观性强、结果的不确定性;物质量评估法无法统一不同生态系统服务间的量纲,无法权衡各生态系统服务优劣程度;能值评估法能值转换率不易确定,与文化服务等关系较弱、不易表征^[9]。

(2)生态系统服务与生态过程的耦合。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^[37]。生态系统服务供需存在明显的空间异质性及空间错位问题^[38-40],而生态过程与生态系统服务的耦合可以有效的实现供需的有效统一。目前,生态系统服务评价大多数是静态、偏定性的评价,如利用 InVEST 模型的生境质量模块的时间序列分析^[41],其是依赖先验参数进行即时定性的评估,并结合相关统计学方法进行年际间的变化比较的过程,而且胁迫因子的选取、影响距离、权重以及生境对各胁迫因子的敏感性都有较大的空间异质性,不便于进行综合评价,导致生态系统服务的计算在时间尺度上同质性较强,与实际情况差距较大;在空间尺度上对生物流、物质流和能量流等生态过程关注较少。

综上所述,生态系统服务供需评价中,宜使用影响到的人口数量和规模表征,供给大于需求时,注重研究生态系统服务的流向和流量以及生态系统服务盈余可满足的人口规模;供给小于需求时,重点分析供需失衡导致的环境问题及解决的方法,便于决策者制定长期发展规划。

1.3 生态安全与生态系统服务的关系

生态安全格局构建的目的是为了保障人类社会的生存需求,实现人类与生态环境的可持续发展。生态安

全格局构建不是一个抽象的概念,需要具有可操作性和可实施性。生态安全格局的构建需要在一个公认的、客观的生态安全评价体系,从多角度、多尺度开展生态安全研究,并依据安全评价体系对人类活动发展需求与生态环境现状进行格局优化、风险预警模拟,而生态系统服务供需评价是综合生态格局—过程—服务的生态格局评价的有效手段^[2]。

(1)生态安全是生态系统服务的表征。生态安全是保障人类福祉的关键,随着人类活动干扰的加剧,生态风险增加,生态脆弱性增加,生态安全受到严重威胁,导致生态系统服务功能不正常发挥,生态系统服务供给无法满足人类发展需求,而人类为满足自身需求加剧生态系统的索取,导致生态系统功能持续下降甚至消失的恶性循环。

(2)生态系统服务是生态安全的前提。生态安全是一个抽象概念,而生态安全格局构建必须具有可操作性和实施准则与标准,生态系统服务评估是生态过程、生态功能、人类活动等的综合评价,正好契合了生态安全格局构建的标准,生态系统服务流的研究为生态安全格局构建的动态模拟提供了理论指导。通过探讨生态系统服务供需关系可以达到对生态安全的测度。

(3)生态系统服务供需平衡是实现生态安全与人类福祉的纽带。生态系统服务供需失衡加剧生态安全风险,生态安全受到破坏影响人类生产生活,对人类福祉造成影响,比如近几年的大气雾霾的出现,是生态系统调节失衡的结果,为保证人类福祉的可持续发展,必须保障生态系统服务的供需平衡,保障生态安全不受威胁。生态系统服务供需平衡是实现生态安全格局构建的保证。

2 基于生态系统服务的区域生态安全格局研究现状

2.1 生态系统服务供需研究现状

目前生态系统服务供需的计算上主要通过供给模型、需求模型和价值模拟等方法及其综合运用,定性或定量评估区域生态系统服务^[42-43]。具体方法包括基于土地利用/土地覆被变化(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)的生态系统服务供需关系矩阵法、生态足迹法、问卷调查法和公众参与法、基于生态过程的模型计算法、空间数据叠加分析法、市场价值法等^[44],每种方法都有其适用的场景和优点,但这些方法应用到城市群尺度仍然存在定量化评价欠缺、不同生态系统服务权衡主观性强、与人类活动关联性弱的问题。例如,基于专家经验知识的定性评价,由于生态系统的时空异质性,该方法存在较大的局限性;基于生态过程的模型计算法主要涉及单一生态系统服务的计算;生态足迹法主要用来计算各类承载力问题,是在对土地面积量化的基础上,在需求层面上计算生态足迹,反映当地生态系统服务的供需平衡关系^[45],目前多是以县级行政单元为研究单位,忽略了空间异质性;问卷调查法和公众参与法是一种辅助统计手段,目的主要是获取不同阶层、年龄结构、性别的人对生态系统服务需求的意愿和偏好,在小尺度上比较有代表意义,但是在城市群等大尺度研究中意义不明确,更宜采用POI数据、道路网密度、地图服务商提供的路径规划等综合数据分析结果表征;空间叠加分析法是将影响服务供需的各个因素的空间数据叠加,利用阈值等准则限定供给和需求的区域和程度,该方法主要用于空间制图和定性分类;市场价值法是将生态系统服务和供给全部转变为市场价值,主要根据谢高地^[46]、Costanza^[13]的价值当量法,该方法的特点是基于专家知识、方便快捷,但是该方法机理不清晰,更多是采用物质质量评估法,因其连接生态系统结构与功能,能够揭示生态系统服务的作用机理^[9]。

2.2 生态安全格局评价的方法和模型

生态安全格局已成为缓解生态保护与经济发展之间矛盾的重要途径之一^[47-48]。综合生态格局的发展,耦合生态系统服务与生态过程的生态安全格局构建的关键步骤包括斑块的划分、生态系统服务“源”、“汇”、关键节点的识别、生态廊道的识别、生态系统服务流的流向和流量的计算^[37]。目前生态安全格局主要的评价方法主要有:基于压力-状态-响应(PSR)框架模型^[49-50]、熵值法和灰色预测模型^[51]、生态系统服务价值与生态安全耦合模型^[52-53]、基于生态系统服务“供一流一需”的生态网络模型^[25](表1)。

表 1 生态安全格局评价方法比较

Table 1 Comparison of construction methods of ecological security pattern

方法 Methods	特征 Characters	发展阶段 Stages	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
压力-状态-响应框架模型 Pressure-State-Response model	定性与定量结合,静态,可预测	成熟,未来应用受限	机理清晰,方法较为明确,从人类需求角度分析,以生态可持续性为研究目的。	指标选取不统一,过度强调了人类的干扰。
熵值法/灰色预测模型 The entropy method / the grey model	定量,静态,可预测	成熟,未来应用较广	较容易,能够克服主观性,客观性强	过于依赖统计学原理,生态学意义缺失。
基于生态系统服务价值的评价模型 The evaluation model based on ecosystem service value	定性,静态,不可预测	较成熟,较流行,未来应用受限	简单,能有效解决目前的生态系统服务权衡问题	主观性较强,适用于生态补偿。
基于生态系统服务供-流-需的生态网络模型 The evaluation model based on ecosystem service flow network	定量,动态,可预测	发展中,未来发展较理想	有效连接生态系统服务供需,完善了供需时空错位的不足,量化表征生态安全格局的现状,可模拟未来发展动态,有较强生态学意义	方法较复杂,数据要求高

其中基于生态系统服务流的生态安全格局评价方法是目前研究的主要方向^[25,49,54-56]。基于生态系统服务的供-流-需的生态系统安全格局构建模型是在考虑生态系统服务供需空间不匹配的基础上,通过生态系统服务源地-廊道-汇的识别,结合生态学、地理学、图形学的理论知识,以生态系统服务流的形式连接生态系统的供给与需求,量化地描述生态系统服务供需的转移,以供需关系表征生态安全格局是否健康的动态模型。现有研究的不足

生态安全格局构建应依据格局与过程的交互作用,遵循城市发展定位与政策,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社会基础设施的合理配置,确保自然资源的生态和物质福利,最终实现生态安全^[37]。通过对生态系统服务供需的分类、计算方法和生态安全格局评价和优化模拟方法的梳理,可以发现目前研究存在的不足:

(1)在生态系统服务供需方面:1 城市内部的文化服务(教育、消遣旅游服务等)供需的忽略,文化服务数据的获取可通过感兴趣点(Point of Interest, POI)数据提取分析。2 计算供给的方法的创新性不足。例如,计算城市绿地可达性时,可替换常用的最小临近距离法,通过地图服务商(高德地图、百度地图等)提供的 API 接口计算耗费时间,比较不同出行方式评价城市绿地的生态服务。3 研究单元的划分尺度较大,一般以行政单元的研究单元的划分,不易挖掘空间异质性对生态安全格局的影响,更宜借助道路网数据的研究单元划分方法^[57]。

(2)生态安全格局的方法和模型方面:1 未能综合考虑城市扩张、经济发展和生态保护需求,从生态完整性和区域一体化协同发展角度,构建适宜的、可持续发展的生态安全格局^[2],城市群生态安全格局构建应注重的是区域协调发展。2 与生态环境问题耦合的不足,城市绿地能有效减缓热岛效应^[58-59],城市生态格局构建应在满足对生态系统服务需求的同时,耦合城市热岛、交通拥堵等问题,综合分析、优化。3 城市内部数据的有效获取和数据分析方法创新不足,随着城市化进程的加快,城市成为人类生存与生产的主要空间,城市内部生态安全格局的构建成为生态安全格局构建的重要组成部分,城市内部结构异质性导致景观格局的变化研究缺乏,城市内部数据获取、处理和分析较为薄弱。

3 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建

生态系统服务供需网络平衡是保障城市群生态安全格局的纽带。城市群在经济上紧密联系,在功能上具有分工合作,在交通上联合一体,在人口分布上具有向心集聚作用,并通过城市规划、基础设施和生态系统服务流共同构成的社会生活空间网络,是工业化和城镇化发展到高级阶段的产物。由于人口规模、城市定位、经

济发展水平的不同及对资源利用和保护程度不同,导致城市群发展的不均衡和不协调。因此,城市生态安全格局构建的主要内容有(图 1):1 基于生态系统服务供给与需求,从生态完整性和区域一体化协同发展角度考虑城市扩张、经济发展、生态保护需求、生态环境问题。2 城市内部和外部多尺度多角度的协调考虑,城市内部多源数据的有效融合。3 以人口网格化为基础,实现以栅格像元为研究单元的自下而上的多尺度的、跨行政区的生态系统服务评估和生态安全格局构建。4 社会资源胁迫和生态过程与生态安全格局的耦合。5 基于生态系统流的生态安全格局评价、优化和模拟。

3.1 城市群生态安全格局构建的重点

(1) 多角度、多尺度的生态安全格局构建

由于城市内部和外部生态系统服务类型的差异,安全格局的构建有必要单独分、综合构建。城市内部主要关注休闲和文化服务、城市热岛和交通拥堵等城市问题;城市外部考虑粮食生产、水源涵养、防风固沙、水土保持、生物多样性维持等服务的供需关系。对于需求的计算,应在人口网格化的基础上,通过现状能满足的人口数量或负荷程度进行时间和空间的对比识别生态系统服务供需关系,而人口网格化可以根据夜间灯光数据划分城区和郊区^[60],城区按道路网数据进行斑块划分,计算斑块内 POI(购物、餐饮、科教等)分布、道路密度、人口统计数据、建筑物类型和密度构建城区人口分布指数进行计算;郊区通过土地利用数据识别农村居民点面积、距行政中心距离构建郊区人口分布指数。以上数据可通过 Google Earth Engine 平台及地图服务商 API 获取。通过人口空间分布的细化,实现生态系统服务需求在省级、市区级、斑块不同尺度下的需求计算,是构建以人为中心的生态安全格局的重要部分。

(2) 社会资源胁迫下的生态安全格局

社会资源胁迫是指人类活动对自然资源和生态环境构成的压力,是威胁生态安全的重要因素。目前,基于统计资料、遥感影像的时间序列分析辨识景观格局演变特征以及城镇化类型、强度、空间影响范围及其驱动机制,评价区域内资源胁迫和社会经济压力的方法和模型已较为成熟。城市功能分区是反映社会资源胁迫的有效手段。城市功能区的划分对研究城市结构、制定政策、配置资源等方面具有非常重要的意义,有助于研究土地利用/覆被变化后的不同生态系统服务的增益和损耗以及功能区内景观格局对生态系统服务的影响。但是,研究者对城市内部功能区的划分尚未达成统一,且现有的功能分区结果与人类实际社会经济活动脱节,并未能反映真实的社会资源胁迫效应。而基于道路网和 POI 数据的城市功能区划分^[57]是一个有效手段,步骤是在依道路网划分斑块的基础上结合 POI 以聚类的方法划分城市功能区^[57,61]。

(3) 生态过程、生态系统服务与生态安全格局的耦合

生态安全的基础是生态风险评价和管理^[62],生态安全格局的构建是对生态系统结构和生态过程的耦合^[63-64]。基于长期监测试验和模型模拟寻找可以表征某种生态系统服务的多元生态系统功能指标,是加强生态系统过程与生态系统服务之间关系研究的一个必要的起始点^[65-66],而基于开放大数据的生态系统服务与生态格局分析是实现大尺度研究的分析和模拟的有效手段。生态安全格局的变化主要表现为土地利用/覆被状况的改变。这种变化不仅体现在景观空间面貌的改变,还体现在景观中物质循环和能量流动,土壤水分、养分和土壤侵蚀等生态过程的时空变化^[67]。不同生态过程之间存在密切的相互作用、相互影响,单个生

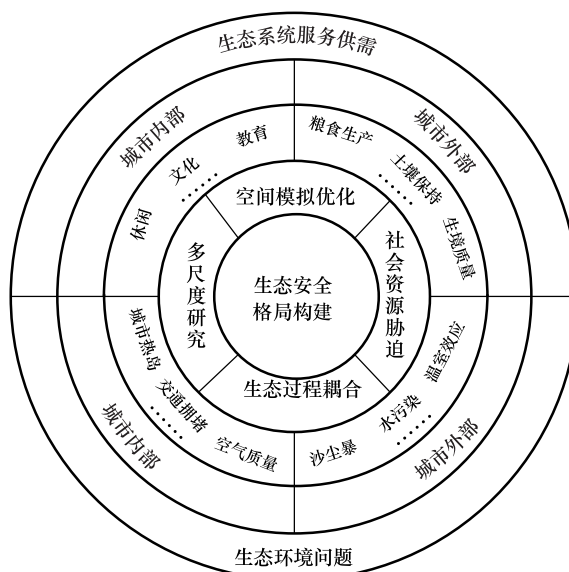


图 1 基于生态系统服务供需的生态安全格局构建研究理论框架
Fig.1 The theoretical research framework of ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand

态过程与各生态过程的耦合结果可能大相迥异,因此有必要深入解析不同生态过程的耦合关联^[68]。在生态安全格局构建及优化中,基于土地利用、降雨、水流过程评估水土流失、生态系统服务的影响程度,评价并优化生态安全格局,保障农业生产需要和城市建设需求;基于 LUCC 的生境质量评价,识别生态源和生态廊道,加强生态系统服务供、需斑块的连接。

(4)生态安全格局的模拟和优化

在不同情景的模拟和针对特定目标的优化是构建生态安全格局有效途径。借助 RS、GIS 技术、网络爬虫、机器学习模型,识别城市边界、划分最小研究斑块、提取城市群地区生态节点、生态廊道等构建生态网络,并对其有效性和合理性进行评价;基于粒子群或蚁群算法模拟多目标多情景下生态网络、林地、湿地、城市绿地等重要斑块、生物群落等的空间优化配置技术^[2];利用最短距离模型分析或者地图服务商的 API 接口直接获取路径规划结果,从要素适应和空间协调方面探究生态调控的空间途径,基于元胞自动机—马尔科夫链蒙特卡洛方法(CA-MCMC)构建生态安全格局预测模型;将现状生态网络与安全格局进行叠加与空间权衡,找出目前生态网络的问题,探究生态调控的空间途径。

生态安全是生态系统服务、生态过程在资源环境胁迫下的研究,是生态系统服务多样性之间的权衡,是生态系统服务供给与人类需求的平衡。在未来的研究中,需要注重掌握新的技术手段、多源数据整合能力,通过准确的数据从不同角度和尺度解析生态过程,更要贴合生态安全的目的——人类福祉与生态环境的协调发展,通过长期数据积累和验证,实现模型的优化和改进,并依据模拟结果优化景观格局现状、识别安全隐患、评估生态风险,实现脆弱生态系统的保护、一体化协同发展的生态安全格局体系的构建。

3.2 城市群生态安全格局构建的框架

城市群生态格局的评价、构建需要多源数据的融合,计算机技术的发展、多源数据的开放、大数据获取方式的多样性、云计算平台的问世、机器学习算法的优化为多尺度生态学研究提供了支撑。这些技术和方法与生态安全格局构建的具体关系如表 2 所示。

表 2 生态安全格局构建相关的计算机前沿技术介绍

Table 2 Introduction of computer technology related to constructing ecological security pattern				
相关技术及数据提供/处理平台 Related technology and data provisioning/processing platform	用处 Usefulness	与生态安全格局的构建的关联性 Correlation with the construction of eco-security pattern	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
高德/百度地图 Commercial map service provider	可获取 POI、路网数据、交通状况、地物边界、城市三维信息	生态系统服务需求、功能区划分、城市群结构分析、城市安全格局优化	数据准确度高、更新及时	需要一定的编程能力,只能获取最新数据,限于国内
开源地图 OpenStreetMap(OSM)	可获取路网数据、城市三维数据、部分 GPS 轨迹信息	热点区域分析、世界各国不同城市布局比较、城市群结构分析	开源、免费、数据获取容易,可获取多国数据	国内数据缺失较多
谷歌地球 Google Earth	可获取不同尺度的历史高清遥感合成图像,用于遥感图像识别	生态系统地物属性识别,生态系统服务需求计算和多尺度研究	空间分辨率高,可清晰分辨地物属性	大范围数据获取较难,但已有关软件实现
Google 云计算平台 Google Earth Engine	在线云处理平台,集成了多个数据源,如 Landsat、Sentinel、MODIS、Land Cover、Cropland、Surface Temperature 等众多关于影像、地球物理研究、气候和大气研究、人口统计有关的遥感产品	城市热岛、土地利用变化、格局分析、时间序列分析等	数据由 NOAA 和 NASS 提供,准确度高覆盖广,由 Google 云计算平台提供数据处理,强大的数据处理能力	有一定难度,需要一定的数学知识和编程能力
机器学习算法 Machine learning algorithm	可实现基于遥感影像的城市内部地物识别和城市结构识别	多尺度地物识别、历史城市格局反演,安全格局模拟	未来发展趋势,人工智能,多学科融合	难度较大,但是前景较好

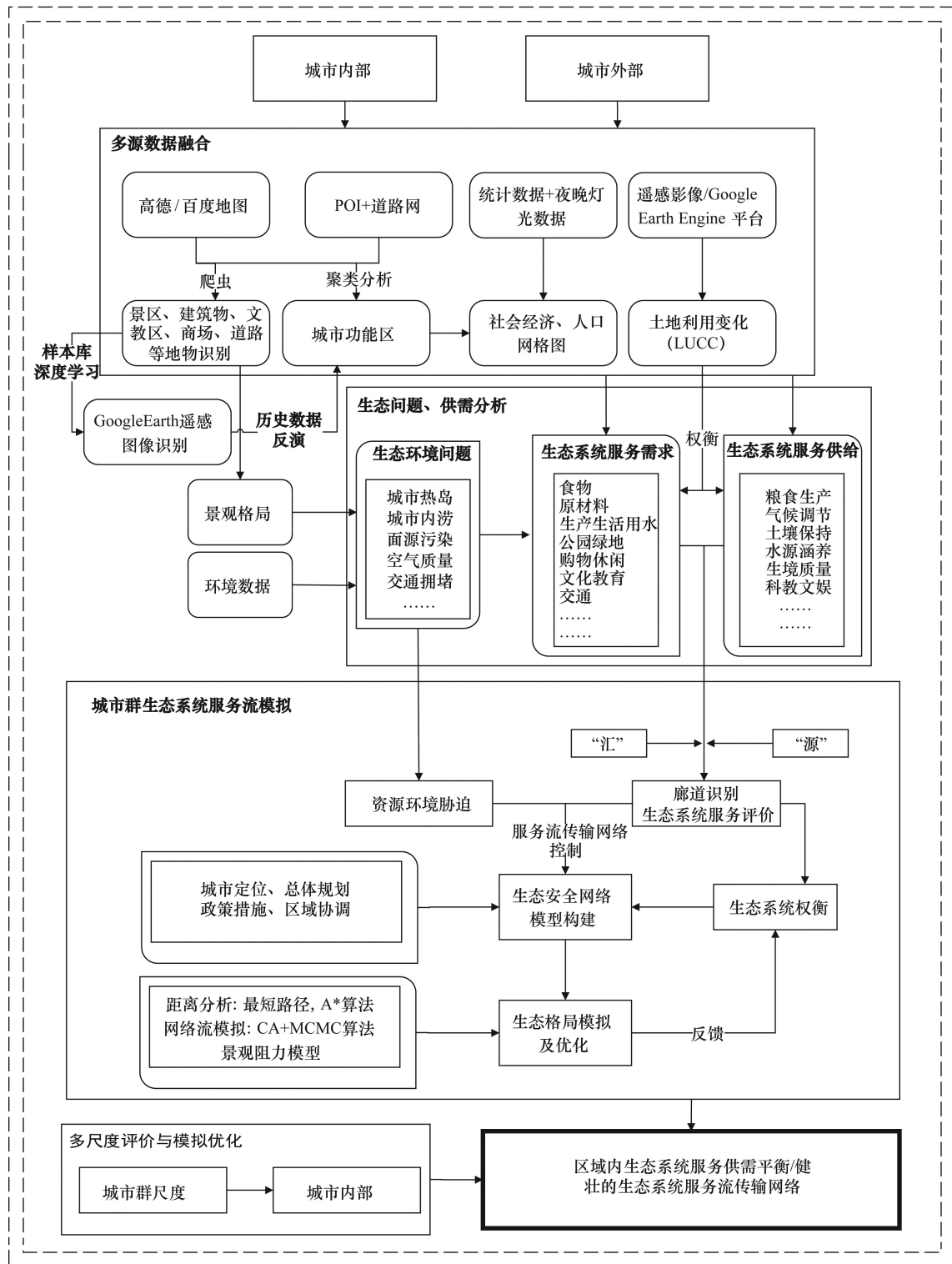


图2 城市群生态安全格局技术路线图

Fig.2 Technical roadmap for constructing ecological security pattern of urban agglomerations

POI: Point of Interest, 兴趣点; LUCC: Land-Use and Land-Cover Change, 土地利用与土地覆盖变化; CA: Cellular Automata, 元胞自动机; MCMC: Markov Chain Monte Carlo, 马尔科夫蒙特卡洛; A*: A star algorithm

在城市内部,随着人们对城市内的地图服务需求不断增加,许多数据提供商应运而生,如高德地图、百度地图等,其提供并开放的 API 接口成为了重要的数据获取手段,可获取 POI 数据、详细的地表土地利用数据、

路径规划数据等;遥感影像数据服务支撑机构,如 NOAA、NASS 等;全球性免费开源组织 OSM(包括 Open Street Map 获取精细道路网数据、OSM Buildings 获取地表土地利用数据)等。除以上数据提供商外,更是出现了比较优秀的云数据处理平台,如 Google Earth Engine 可以批量获取、处理多卫星影像数据集的平台,以 Google Earth 高清图像为数据源的基于深度学习的卫星图像识别方法^[69-70]。基于以上分析,我们绘制了生态安全格局构建、模拟和优化的技术路线图(图 2),关键技术包括:人口的细化(3.1(1)有相关介绍);机器学习样本库数据的获取;城市内景观格局的分析;生态系统服务的定量计算;生态过程与生态系统服务的耦合;多尺度的评价和模拟。具体步骤可以表述为:从城市内部和外部两个角度进行生态系统服务供需计算,在城市内部利用多源数据进行多尺度的生态过程与生态环境问题的耦合,通过获取城市内部建筑物、景区、绿地、商业服务、居民小区、教育服务区等数据为机器学习提供样本库,再通过获取 Google Earth 的历史图像数据进行地物识别,实现对生态安全格局的时序分析,然后结合系统动力学模型、最短路径算法(亦可根据地图服务商提供的路径规划 API 的结果)、MCMC 概率模型进行格局优化模拟,实现最优安全格局的构建^[71]。

4 结语

生态安全格局的构建应以人类需求为导向,以生态环境问题为着力点,以优化景观格局解决生态环境问题为目的,借助新的计算机技术,综合利用开源数据和数据处理平台,充分融合多源数据集,整合多学科研究成果,探索人类活动与生态环境要素的耦合机制,通过生态安全格局的构建,实现生态系统服务供需的动态平衡,实现人类生存、发展与生态环境的协调发展,为城市规划提供理论指导。

生态系统服务是区域生态安全的表征。生态系统服务流是基于“源-流-汇”生态过程的评估生态系统服务计算的有效评估方法,是实现城市内部与外部、行政区间协同发展的有效手段。多源、时序的海量遥感数据(可在 Google Earth Engine 平台云计算、数据获取)的开放为生态系统服务时间序列的动态变化、生态安全格局分析提供了数据支撑,便于从大尺度上实现区域间的生态系统服务供需流的研究;国内地图服务厂商(高德、百度开放平台)的多类型数据的支撑(POI 数据,建筑物、绿地、景区等数据集)为实现城市内部生态系统服务计算与生态安全构建提供了数据支撑;大数据与机器学习方法的发展为生态系统服务评价、生态安全格局构建及模拟提供了更加强大的技术支持。在生态安全格局构建中应该更加注重综合利用开源平台与数据的支撑,进一步提升生态安全格局构建的实践和指导意义。

生态安全已经成为社会大众广为关注的话题,生态安全格局构建也已成为相关领域内研究者的研究方向,涉及到大尺度的景观格局配置问题,也涉及到人们日常生活的细节问题,如生活中的绿地可达性等。本文通过梳理生态系统服务供需评价、生态安全格局构建的进展和存在的问题,介绍了生态系统服务计算所需数据的获取、处理方法,尝试通过大数据和开放数据源和数据处理平台实现生态系统服务供需计算及城市群安全格局的评价、模拟和优化,实现区域生态系统服务供需平衡和强化生态系统服务流的流通,期愿能为城市规划和城市群生态安全格局构建抛砖引玉。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 陈利顶,周伟奇,韩立建,孙然好.京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策.生态学报,2016,36(22):7125-7129.
- [3] 顾朝林.城市群研究进展与展望.地理研究,2011,30(5):771-784.
- [4] 黄河东.中国城市群城市化与生态环境协调发展比较研究.生态经济,2016,32(4):45-48.
- [5] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向.地理学报,2014,69(8):1130-1144.
- [6] 彭建,杨旸,谢盼,刘焱序.基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区.生态学报,2017,37(13):4562-4572.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. 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, 2017, 20(3): 701-714.
- [11] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. 生态学报, 2014, 34(1): 190-200.
- [12] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.
- [13] 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.
- [14] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [15] 唐玉芝, 邵全琴, 曹巍, 杨帆, 刘璐璐, 吴丹, 周书贵. 基于物质质量评估的贵州南部地区生态系统服务及其县域差异比较. 地理科学, 2018, 38(1): 122-134.
- [16] Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 11-32.
- [17] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics, 2002, 41(3): 393-408.
- [18] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment. Washington, D. C., USA: Island Press, 2003.
- [19] 张彪, 谢高地, 肖玉, 伦飞. 基于人类需求的生态系统服务分类. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(6): 64-67.
- [20] 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, 298-298.
- [21] Huang H, Chen B, Ma Z Y, Liu Z H, Zheng S L, Yu W W, Liao J J, Hu W J, Du J G, Chen G C. Assessing the ecological security of the estuary in view of the ecological services-A case study of the Xiamen Estuary. Ocean & Coastal Management, 2017, 137: 12-23.
- [22] Pei L, Du L M, Yue G J. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 832-841.
- [23] 李中才, 刘林德, 孙玉峰, 崔金荣. 基于 PSR 方法的区域生态安全评价. 生态学报, 2010, 30(23): 6495-6503.
- [24] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.
- [25] 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.
- [26] 任志远, 刘焱序. 基于价值量的区域生态安全评价方法探索——以陕北能源区为例. 地理研究, 2013, 32(10): 1771-1781.
- [27] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [28] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [29] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
- [30] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [31] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. 自然资源学报, 2003, 18(1): 118-126.
- [32] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [33] 程琳, 李锋, 邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变. 生态学报, 2011, 31(20): 6194-6203.
- [34] 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.
- [35] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. 生态科学, 2015, 34(3): 204-208.
- [36] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于 Logistic-CA-Markov 与 InVEST 模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价. 水土保持研究, 2016, 23(3): 82-89.
- [37] 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.
- [38] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. Land Use Policy, 2012, 29(3): 521-535.
- [39] Maass J M, Balvanera P, Castillo A, Daily G C, Mooney H A, Ehrlich P, Quesada M, Miranda A, Jaramillo V J, Garcia-Oliva F, Martínez-Yrizar A, Cotler H, López-Blanco J, Pérez-Jiménez A, Búrquez A, Tinoco C, Ceballos G, Barraza L, Ayala R, Sarukhán J. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. Ecology and Society, 2005, 10(1): 17-17.
- [40] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem

- service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [41] 白健, 刘健, 余坤勇, 张林波, 李新通, 王德旺. 基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量变化评价. *中国科技论文*, 2015, 10(15): 1782-1788.
- [42] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [43] 杜乐山, 刘海燕, 徐靖, 张凤春, 李俊生. 城市化与生态系统服务的双向影响综述. *生态科学*, 2017, 36(6): 233-240.
- [44] 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.
- [45] Jenerette G D, Marussich W A, Newell J P. Linking ecological footprints with ecosystem valuation in the provisioning of urban freshwater. *Ecological Economics*, 2006, 59(1): 38-47.
- [46] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [47] 李月辉, 胡志斌, 高琼, 肖笃宁, 胡远满, 穆阳, 关竹心, 张小云. 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.
- [48] 欧定华, 夏建国, 张莉, 赵智. 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.
- [49] 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 韩忆楠. 基于 PSR 模型的区域生态持续性评价概念框架. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 933-940.
- [50] 姚予龙. 基于 PSR 模型的我国资源安全演化轨迹模拟与成因分析. *中国农业资源与区划*, 2010, 31(6): 37-43.
- [51] 郑华伟, 夏梦蕾, 张锐, 刘友兆. 基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 284-289, 296-296.
- [52] 何玲, 贾启建, 李超, 张利, 许峰. 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.
- [53] 何玲, 贾启建, 李超, 许峰. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 215-224.
- [54] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2161-2171.
- [55] 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.
- [56] 赵庆建, 温作民, 张敏新. 识别森林生态系统服务的供应与需求——基于生态系统服务流的视角. *林业经济*, 2014, 36(10): 3-7.
- [57] 池娇, 焦利民, 董婷, 谷岩岩, 马雅兰. 基于 POI 数据的城市功能区定量识别及其可视化. *测绘地理信息*, 2016, 41(2): 68-73.
- [58] Sun R H, Chen L D. Effects of green space dynamics on urban heat islands: mitigation and diversification. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 38-46.
- [59] 孙然好, 王业宁, 陈婷婷. 人为热排放对城市热环境的影响研究展望. *生态学报*, 2017, 37(12): 3991-3997.
- [60] 许泽宁, 高晓路. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法. *地理学报*, 2016, 71(6): 928-939.
- [61] 陈蔚珊, 柳林, 梁育填. 基于 POI 数据的广州零售商业中心热点识别与业态集聚特征分析. *地理研究*, 2016, 35(4): 703-716.
- [62] 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.
- [63] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [64] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 1-10.
- [65] 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.
- [66] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [67] 苏常红, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响. *自然杂志*, 2012, 34(5): 277-283.
- [68] 陈利顶, 吕一河, 田惠颖, 施茜. 重大工程建设中生态安全格局构建基本原则和方法. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 674-680.
- [69] 张文达, 许悦雷, 倪嘉成, 马时平, 史鹤欢. 基于多尺度分块卷积神经网络的图像目标识别算法. *计算机应用*, 2016, 36(4): 1033-1038.
- [70] Ning X G, Lin X G. An index based on joint density of corners and line segments for built-up area detection from high resolution satellite imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(11): 338-338.
- [71] 黄金川, 林浩曦. 京津冀城市群多情景空间演化模拟. *地理研究*, 2017, 36(3): 506-517.