

DOI: 10.5846/stxb201905251078

陈新闻,李小倩,吕一河,刘红晓,郭建英.区域尺度生态修复空间辨识研究进展.生态学报,2019,39(23):8717-8724.

Chen X C, Li X Q, Lü Y H, Liu H X, Guo J Y. Review of spatial identification of ecological restoration. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8717-8724.

## 区域尺度生态修复空间辨识研究进展

陈新闻<sup>1,2</sup>, 李小倩<sup>1,2</sup>, 吕一河<sup>1,2,\*</sup>, 刘红晓<sup>2,3</sup>, 郭建英<sup>1,2</sup>

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 中国科学院华南植物园,广州 510650

**摘要:** 区域尺度辨识生态修复空间是进行生态恢复与重建的重要前提,对区域生态文明建设和可持续发展具有重要作用。如何构建科学合理、面向政策和民众需求的生态修复空间辨识指标体系,目前已成为生态学研究热点问题之一。系统梳理生态空间评价理论,综合构建生态修复空间辨识框架,包括评价对象的选择、评价指标筛选的原则、指标体系构建的主要方法和评价指标权重设定等方面,在区域生态评价的基础上,强调政策目标、民众需求,构建了生态质量、生态系统服务、生态系统健康 3 个方面 18 个指标,能够较全面反映区域生态空间主要特征,以期构建区域尺度生态修复空间辨识指标体系提供参考,为生态恢复和重建提供科学依据。研究还展望了区域尺度下生态修复空间辨识的重点发展方向,即加强复合生态系统理论的应用,统筹社会、经济、自然因子开展综合评价,并推动多尺度评价结果的融合与应用。

**关键词:** 生态空间;生态修复空间;指标体系;复合生态

## Review of spatial identification of ecological restoration

CHEN Xinchuang<sup>1,2</sup>, LI Xiaoqian<sup>1,2</sup>, LÜ Yihe<sup>1,2,\*</sup>, LIU Hongxiao<sup>2,3</sup>, GUO Jianying<sup>1,2</sup>

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 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

**Abstract:** Identification of ecological restoration space is an important prerequisite for ecological restoration and reconstruction, and plays an important role in regional sustainable development and construction of ecological civilization. How to establish a scientific and reasonable evaluation index system, especially for policy decision-making and public preferences, has become a hot topic in ecology research. On the basis of systematically studying the theory of ecological spatial evaluation, this paper systematically constructs the identification framework of ecological restoration space, including the selection of evaluation objects, the principle of evaluation index screening, the main methods of index system construction, and the weight setting of evaluation index. According to the regional ecological evaluation, the paper emphasizes policy objectives and public preferences, and constructs 18 indicators from three aspects of ecological quality, ecosystem services and ecosystem health, which can comprehensively reflect the main characteristics of regional ecological space. It can provide references for the construction of spatial identification index system of ecological restoration at regional scale in China, and provide scientific basis for ecological restoration and reconstruction. The research also prospects the key development direction of regional identification of ecological restoration, which include strengthening the application of complex ecosystem theory, integrating social, economic and natural factors evaluation, and promoting the fusion and

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0501601);内蒙古自治区科技计划项目(201601062)

收稿日期:2019-05-25; 修订日期:2019-09-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@cees.ac.cn

application of multi-scale evaluation results.

**Key Words:** ecological space; ecological restoration space; indicator system; eco-complex

随着人口不断集聚以及经济的快速发展,城镇化已经成为改变全球生态空间的主要驱动力<sup>[1-2]</sup>,改变生态空间结构和功能,使自然生态空间转变为人类主导或人类耦合的生态空间<sup>[3-4]</sup>,导致城市自然生态、社会生态和经济生态之间矛盾加剧,造成区域生态空间质量下降,面积萎缩。且随着城市人类活动的继续增长,区域生态空间的压力越来越大,造成区域生态系统质量和健康的持续性降低,使得生态空间呈现不同程度的退化现象,全球约 20 亿公顷的陆地生态系统被认为是退化的,需要进行生态恢复<sup>[5-6]</sup>。目前加强区域生态空间规划及修复是维护自然生态环境、健全国土空间用途管制制度的重要手段,也是决策者普遍关心的内容<sup>[7-8]</sup>。

准确评价并辨识需要修复的生态空间是进行生态系统恢复和重建的前提和基础,有利于提高区域生态服务功能,改善生态环境,构建人类福祉<sup>[9]</sup>。科学辨识生态修复空间,加强自然生态空间规划及修复是维护自然生态环境,坚持人与自然和谐共生的根本途径,是新时代生态文明建设的重要内容,是科学研究面向政策需求的重要转变<sup>[10-12]</sup>。评价指标体系的准确性和科学性将直接影响生态修复空间的范围和修复目标。目前对于生态空间修复识别,缺乏整体修复观念,主要针对单一地点或单一生态系统,评价指标和分级标准具有差异性、较低的应用性及可推广性<sup>[13-15]</sup>。在评价过程中没有落实“山水林田湖草是一个生命共同体”的理念,对于生态空间修复的范围及规模缺少科学依据,不能针对性地解决区域尺度生态问题,因而区域尺度生态系统的破碎性和孤岛现象未得到有效解决。生态空间评价应将区域尺度生态空间视为整体,根据生态空间与人类利用的关系建立综合生态空间评价体系<sup>[16]</sup>,进而辨识区域生态修复空间、预测和管理未来生态空间格局,这也是人们深入了解生态空间的重要性,践行生态文明和实现可持续发展的必要条件。目前亟待构建区域尺度生态修复空间辨识框架,即在现有生态评价研究的基础上,总结不同生态评价的方法及关键指标,直观分析区域生态空间现存问题,确定生态修复重点区域和主导生态因素,科学确定生态修复范围和不同层级修复目标。尤其应构造面向国土空间规划,面向政策目标及民众需求的生态修复空间辨识框架,通过生态修复空间的辨识及治理,对区域生态空间质量及服务的提升提供一定的科学依据,实现城乡生态政策目标、改善人类福祉。生态修复空间辨识的研究可在科学和政策应用间架起一座桥梁,为生态环境问题的解决以及城镇化问题的治理开辟新的方向。

## 1 生态空间定义及研究进展

明确生态空间是进行生态修复空间辨识的第一步。生态空间是具有自然属性、以提供生态产品或生态服务为主导功能的国土空间,是承载山、水、林、田、湖、草、矿等自然资源的核心载体<sup>[17-18]</sup>。目前对于生态空间概念的界定主要基于生态功能论和生态要素论两种视角,主要分歧在于农田是否为生态空间<sup>[17,19-21]</sup>。农田作为陆地生态系统中较为重要的生态系统之一,发挥着重要的生态系统服务价值,具有农产品生产、社会保障、气体调节等功能,与森林和草地相比,农田的直接服务价值所占比重远远高于森林和草地<sup>[22-23]</sup>。故本文界定具有生态系统服务价值和对于生物生境保护具有重要作用的地区都可视为生态空间,不仅包括天然或人工林地、草地、湿地、水体等自然生态空间,还应该包括农田、郊野公园、生态廊道等提供生态系统服务的区域<sup>[24-25]</sup>。目前对于生态空间研究取得较大的进展,集中于生态空间的评价与管理,主要包括重要生态空间的识别,生态系统服务评估,生态系统健康评估,生态风险评估<sup>[26-33]</sup>,均对生态修复空间的辨识提供了良好的理论基础及参考价值。

重要生态空间辨识主要结合区域内的生态承载力和开发适宜性,开展生态功能重要性评价、生态环境敏感性评价、生态系统服务功能评价,确定水源涵养、水土保持、生物多样性保护等生态功能极重要区域及水土流失、土壤风蚀荒漠化等极敏感区域,以及结合重点生态功能区、生物多样性保护优先区等生态保护重要区域,

识别区域重要生态空间<sup>[32, 34-35]</sup>; 利用基于生态过程最小阻力网络识别模型和基于网络分析模型的多情景识别方法对生态空间进行网络识别, 辨识生态重要节点与生态廊道, 构造生态安全格局<sup>[36-37]</sup>。生态系统服务指生态系统与生态过程形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用, 分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务等<sup>[16, 38]</sup>。通过生态系统服务评价, 可以揭示外界胁迫对生态空间发挥服务的影响, 以及不同生态系统服务之间的相互作用<sup>[39]</sup>。目前对于生态系统服务评价内容主要包含综合评价和单项评价。综合评价是指评估生态空间内各生态类型的自然、经济与社会文化服务等多维价值, 包括直接利用价值和间接利用价值<sup>[40-41]</sup>。单项评价中, 主要集中于生物多样性保护、气候调节、水源涵养、水质净化等单一价值评估<sup>[42-47]</sup>。生态系统健康是指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性, 即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力<sup>[48-49]</sup>。生态系统健康可以通过活力、组织力和弹性等 3 个特征进行定义<sup>[50]</sup>。活力表示生态系统的初级生产力; 组织结构是根据各类生态系统相互作用的多样性及数量表征; 弹性也称恢复力, 是指系统在外界压力下维持其自身结构和功能稳定的能力<sup>[51]</sup>。对于生态系统健康的评估一般采用指示物种和指标体系两种方法<sup>[48]</sup>。指示物种法对社会经济和人类健康因素考虑不足, 难以全面反映生态系统的健康状况, 在受人类活动主导下的复杂生态系统健康评价中尤为突出。目前应用广泛的主要是指标体系法, 指标体系法根据生态系统状态、特性及其生态效益筛选评价指标, 进行定量评价。“活力-组织力-恢复力”的评估框架得到广泛的应用及认可<sup>[49, 52-53]</sup>。指标选取涉及社会、经济、自然等因子, 既要综合衡量生态系统自身的健康, 又要反应生态系统是否满足人类的需要, 即通过生态系统结构与功能的完整性保障生态系统服务功能的持续供给以满足人类需求。生态风险是生态系统受到外界胁迫下, 其自身特性及发挥的服务, 目前和将来发生改变和降低的可能性<sup>[54-57]</sup>。对于生态风险评价是评价负生态效应可能发生或正在发生的可能性, 而这种可能性是归结于受体暴露在单个或多个胁迫因子下的结果。对于区域生态风险评价, 其重点是评价人类活动对生态环境的胁迫效应, 加大生态风险的可能性<sup>[58]</sup>。对于区域生态风险的研究主要集中于景观生态风险评价, 聚焦于对生态系统结构、功能和过程的影响及对景观不利的生态效应<sup>[59]</sup>。景观生态风险评价是指以生态景观的特性、景观格局、以及景观空间演变规律为评价因子, 分析其在外力胁迫下, 内部景观组分、结构、功能和过程发生风险的可能性, 识别内部风险源, 对生态景观本身进行风险判定或预测。

## 2 生态修复空间辨识指标体系

### 2.1 生态修复空间辨识指标的选择原则

生态空间受社会、经济、自然因子的多重影响, 在构建修复空间辨识评估指标体系时, 评价指标的选取直接决定了评价结果的科学性与适用性<sup>[21, 60]</sup>。在新时期生态文明思想下, 对于生态修复空间辨识指标的选取, 应按照“山水林田湖草生命共同体”的理念及复合生态系统理论<sup>[17, 61]</sup>, 对生态空间格局、生态系统特性及服务功能进行综合评价, 明确生态空间存在的突出问题, 以及未来区域生态保护修复所面临的形势与挑战。在系统分析上述生态空间评价方法上, 本文建议指标筛选应达到 3 个目标: 1) 指标体系全面衡量并统筹考虑区域生态空间退化过程和方向, 采用能够综合反应生态空间的状态、结构、功能, 包括外在特征及内在机理的指标; 2) 区域角度综合评判各类生态空间及相互影响机制, 要充分考虑到生态空间时间尺度分布特征及人为压力与生态空间状态变化之间的联系, 指标选取应该代表影响区域生态空间受损及退化的主要驱动力; 3) 评价指标应具有概括性及普适性, 符合当地政策目标及民众需求, 选择易于获取和影响重大的因子或者模型, 同时要容易监测, 具有技术和经济可行性, 以便定期地为政府决策、科研及公众要求等提供生态空间现状、变化及趋势的统计总结和解释报告。

### 2.2 生态修复空间辨识指标体系的构建

由于生态空间研究尺度不同, 且生态空间内部的复杂性和多样性, 对于生态修复空间的评价指标及分级标准存在一定的差异性, 且具有较低的政策应用性<sup>[62-65]</sup>。本文在系统研究生态空间评价与修复空间辨识的基础上, 建议基于政策目标、民众需求、专家知识综合选择评估指标, 参考各地城市生态规划、环境保护规划及

国土空间规划中的生态目标,例如《河北雄安新区规划纲要》提出将淀水林田草生态空间作为一个命运共同体进行统一保护、统一修复。政策目标主要集中于实现蓝绿空间占比稳定在 70%,实现生态空间的互联互通,确保新区生态系统完整;构建宜人便民生态公园体系;对重要生态空间实施生态修复,恢复白洋淀淀泊水面,修复多元生境,提高生物多样性。通过对该政策目标解读,可识别生物多样性、生境质量、植被覆盖度、景观连通性、景观多样性、生态游憩能力、水资源供给能力、水资源净化能力等指标为决策者普遍关心的指标。对居民与利益相关者的问卷调查及实地走访中发现,人们对生态空间的要求主要集中于满足自己的休闲娱乐功能,以及良好生活、生产环境的保持,例如:森林覆盖率、空气质量、城市水质达标率、公园可达性等指标;研究者较多的集中于对生态空间本身服务价值的大小及生态系统健康的评价,评价指标主要集中于水土保持、水源涵养、水质净化、生物多样性保持、生态景观格局以及生态系统健康。

本文总结分析上述生态指标选择偏好,根据生态修复空间辨识评价指标体系选择原则,对这些主要指标及关键因子进行重新筛选,构建评价指标体系(表 1)。一级指标层是生态空间需修复的直接表现,由生态空间质量、生态系统服务、生态系统健康三部分构成。生态空间质量、生态系统服务决定着生态系统的效益和生活环境的质量,直接影响城市居民的可用性和舒适性,是政策目标的主要内容。生态健康是生态系统的内在稳定性和抗干扰性水平。生态健康评价强调生态系统的完整性,为生态系统损害评价提供依据;二级指标层是对一级指标层的详细分解,参照政策目标、民众需求及相关文献,选取具有代表性的、易获取的评价指标,指标数据的获取方法以遥感监测、实地调研、问卷调查及模型相结合为主。

表 1 生态修复空间辨识指标体系

Table 1 Spatial identification index system of ecological restoration

	一级指标层 Level I indicator layer	二级指标层 Level II indicator layer	指标说明 Indicator description
生态修复空间辨识指标体系 Spatial identification index system for ecological restoration	生态空间质量 Ecological space quality	生物丰度指数	评价区域内生物的丰贫程度,对于维护和增强区域生物多样性具有重要意义
		植被覆盖度指数	评价区域植被覆盖的程度,对于区域绿地建设具有重要意义
		水网密度指数	评价区域内水资源的丰富程度,对于统筹区域水资源调配与防洪减灾能力具有重要意义。
		土地胁迫指数	评价区域内土地质量遭受胁迫的程度,对于生态脆弱区治理及地质灾害防治具有重要意义
		污染负荷指数	评价区域内所容纳的环境污染压力,对于污染场地修复具有重要意义
		居民游憩指数	评价居民享受生态游憩的能力,对于人居景观建设具有重要意义
		空气质量指数	评价区域内空气质量的优劣程度,对于人居景观建设具有重要意义
	生态系统服务 Ecosystem services	景观连通性指数	评价区域景观连通性,对于构建山水林田湖草连通格局,增强生态系统完整性和连通性具有重要意义
		景观多样性指数	评价区域景观多样性,对于破碎景观中动植物栖息地和物种保护具有重要意义
		生物多样性保护	评价生态系统保护生物抗干扰的能力,对于维护和增强区域生物多样性具有重要意义
		水源涵养	评价生态系统涵养水资源的能力,对于统筹水资源调配具有重要意义
		水质净化	评价生态系统净化污染物的能力,对于区域水污染治理及湿地建设具有重要意义
		水土保持	评价生态系统减少泥沙淤积与减少营养元素流失的能力,对于水土流失灾害防治及林地建设具有重要意义

续表

一级指标层 Level I indicator layer	二级指标层 Level II indicator layer	指标说明 Indicator description
生态健康 Ecological health	固碳释氧	评价生态系统固碳和释氧的能力,对于人居景观建设具有重要意义
	休憩娱乐	评价生态系统景观休憩、文化旅游的能力,对于人居景观建设具有重要意义
	活力	评价生态系统的初级生产力,对于提高区域承载力、生态系统可持续性具有重要意义
	组织力	评价生态系统结构稳定性,对于生态系统结构稳定具有重要意义
	恢复力	评价生态系统在外部干扰后恢复原有结构和功能的能力,对于提高生态系统稳定性、完善区域生态格局具有重要意义

### 2.3 生态修复空间辨识指标的阈值

确定生态修复空间辨识的标准,不仅对生态修复空间范围的选取,对于生态修复空间的治理及驱动力研究均具有很大的帮助,是区域生态空间评价研究的关键。目前对于修复标准的选取,往往采用生态城市、园林城市、环保模范城市目标值或规划值、国际发达城市建设标准值、全国最高、最低或现状值作为相关指标的标准,而这些标准并不能准确的反应生态空间是否需要修复,对生态修复空间的辨识指导意义不大<sup>[49]</sup>。或者参照生态保护红线划定技术要求,生态功能重要、生态系统敏感脆弱区域的空间分布作为生态修复空间评价指标<sup>[20-66]</sup>,然而这些标准仅注重区域生态极重要区及生态极敏感区,对于潜在的生态修复空间缺少辨识。生态修复空间实际上并不仅仅是针对明显退化的生态空间,而是结合区域生态系统与人类活动,人为的识别需要提升及完善的生态系统,满足人类所期望的生态系统状态。对于生态修复空间指标阈值的选取,很大程度上决定于社会效益、政策目标。同一生态空间,面对不同的城市化水平、不同的人类期望,其评估结果相差很大。因此区域生态修复空间的辨识评价,应该全面剖析区域社会、经济效益,明确生态政策目标,探讨生态空间状态的时空变化特征,筛选区域低水平的生态空间及持续降低的生态空间,而非主观判定其是否需要生态修复,从而保障评价的客观性。

### 2.4 生态修复空间辨识指标权重

评价指标的权重赋值是综合评价体系中重要的环节,对结果具有显著的影响<sup>[67]</sup>。研究对于指标权重的选择主要集中于主观赋权法和客观赋权法<sup>[68]</sup>。对于主观赋权法主要考虑根据其主观价值判断评价指标对于评价对象的重要程度,一般依据已有的专家知识或经验,人为主观确定指标权重,主要包括专家评判法、层次分析法等。主观赋权法对现有生态健康评价、生态风险评价中具有较广泛的用途,但在评判过程中主观性较强,不同专家自身的知识结构及个人喜好不同,权重选取欠缺科学性,稳定性<sup>[69-70]</sup>。客观赋权法则根据收集的生态指标数据进行预处理,通过数理统计的方法将各指标值经过分析处理后得出权数的一类方法,主要有熵权法、变异系数法、主成分分析法等,由于指标权重的选择根据样本指标值本身的特点来进行赋权,具有较好的规范性,客观性强<sup>[60,71]</sup>。但其容易受到样本数据的影响,不同的样本会根据同一方法得出不同的权数,对于结果并不能具有很好地应用性。

对于区域生态修复空间辨识评价中,数据量大,且部分信息不能准确量化,尤其在指标的选取上较多侧重于政策及公众的选择,采取客观赋权法确认权重太过单一,并不能较好的反应政策目标及居民选择,难以真实表征评价指标的相对重要性,对评价结果造成影响;而主观赋权法,虽然权重确定的过程有较多的人为主观性,然而在生态修复空间辨识中,公众及决策者的选择恰恰是识别生态修复空间的关键,通过主观赋权法更能直观的通过选择居民或决策者普遍关心的指标,提升区域生态空间质量及服务水平,实现人类福祉建设。因此主观赋权法有其科学合理性,其实用性要强于客观赋权法。本文建议在确定权重的过程中优先采用层次分析法,基于前期调研与问卷调查的基础上,建立层次结构模型、构造判断矩阵,按其重要性程度评定等级以确

定权重,不同区域可根据区域自身生态特点及政策目标合理确定各指标权重,以实现区域可持续发展。

### 3 生态修复空间辨识研究展望

生态修复空间的辨识是亟待开展研究及完善的生态评价中重要的一环,是以新的视角将生态学与政策制定、国土空间规划相结合的新领域。通过生态修复空间的辨识及治理能够科学的构建区域生态安全格局,优化生态安全屏障体系,加强生态基础设施建设,提升生态系统质量和稳定性,提高区域生态空间的生态承载力,是当今实现新时代生态文明建设的重要内容。尽管近年来生态评价的研究和技术发展迅速,但针对生态修复空间辨识的理论和技術方法仍不完善,较多的集中于单一生态类型的修复技术的探讨,对于生态修复空间的选择上有很多问题有待进一步深入研究和解决。

#### 3.1 生态修复空间辨识结果的尺度转换与多尺度综合

生态修复空间辨识首先涉及尺度问题,包括空间尺度和时间尺度。不同空间尺度评价指标体系存在明显的差异性,小尺度如单一生态类型中传统的生态系统的组成结构、功能和生境评价,转变为区域尺度的宏观生态环境质量监测指标为主。对于小尺度空间辨识并不能较好的客观反映现实结果,空间辨识应该涉及多种生态类型、景观的组合,应立足于区域尺度,即包括县域、市域、城市群、省域、国家和大洲等空间尺度,通过空间格局分布,探究其差异性及其内部联系,将不同尺度下生态修复空间辨识结果进行综合分析,探讨其内部的关联性,以及不同尺度之间的相互转换途径与方法,制定由上到下的综合修复政策及措施,划定不同生态修复区,并通过时间尺度的研究,建立长期评价及反馈机制,对生态修复空间的演替规律及其未来变化趋势做出正确的评估,并通过与地理信息系统的结合,快速获取、分析研究基础数据,并实时监测识别待修复空间,是当前研究及应用生态修复空间辨识的核心和关键。

#### 3.2 复合生态系统理论与方法的应用

辨识生态修复空间更多的面向于政策需求,意味着不仅仅考虑生态因子的影响,还要较多的考虑社会因子、经济因子,实现复合生态评价。如何在生态空间辨识工作中更多的引用复合生态系统理论,尤其对于国土空间规划中,识别复合生态空间的特点,进而考虑利益权衡下生态修复空间、生态保护空间的选择,进行复合生态管理,实现生态空间的自然、经济、社会多元复合价值将是下一阶段的研究重点之一。目前城市化对生态空间质量和服务的胁迫效应显著,对于复合生态修复空间的辨识与管理,要协调人与自然、经济与环境、局部与整体间在时间、空间、数量、结构、功序上复杂的系统耦合关系,实现人类福祉的建设,生态系统服务和居民身心健康得到有效的保障。对于复合生态修复空间的辨识还需要从产业生态格局、区域生态服务和生态文明建设入手,强化生态系统文化服务功能评估及生态空间可持续利用,通过生态基础设施、生态交通、生态代谢和生态健康技术综合评估,实现区域人居生态建设与经济生态效率和社会生态服务的和谐统一。因此,作为宏观尺度的生态修复空间辨识的研究,复合生态系统理论与方法是区域生态修复空间辨识的重要依据,具有广阔的发展前景。

#### 参考文献(References):

- [1] Li B J, Chen D X, Wu S H, Zhou S L, Wang T, Chen H. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: case study of Nanjing City, China. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 416-427.
- [2] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 780-790.
- [3] Qiu B K, Li H L, Zhou M, Zhang L. Vulnerability of ecosystem services provisioning to urbanization: a case of China. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 505-513.
- [4] Pártl A, Vačkář D, Loučková B, Lorencová E K. A spatial analysis of integrated risk: vulnerability of ecosystem services provisioning to different hazards in the Czech Republic. *Natural Hazards*, 2017, 89(3): 1185-1204.
- [5] Lyu R, Zhang J M, Xu M Q, Li J J. Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: a case study in Northern Ningxia, China. *Land Use Policy*, 2018, 77: 163-173.

- [6] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.
- [7] 周璞, 刘天科, 靳利飞. 健全国土空间用途管制制度的几点思考. *生态经济*, 2016, 32(6): 201-204.
- [8] 余亮亮, 蔡银莺. 国土空间规划管制与区域经济协调发展研究——一个分析框架. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1445-1456.
- [9] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. *生态学报*, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [10] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长远景. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [11] 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 李煜珊, 郑瑶华, 王效科. 北京市生态用地规划与管理对策. *生态学报*, 2015, 35(11): 3778-3787.
- [12] 陈永林, 谢炳庚, 钟典, 吴亮清, 张爱明. 基于微粒群-马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2018, 38(1): 55-64.
- [13] 李果, 王百田. 区域生态修复的空间规划方法探讨. *水土保持研究*, 2007, 14(6): 284-288.
- [14] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 缪宁. 退化森林生态系统恢复评价研究综述. *生态学报*, 2010, 30(12): 3297-3303.
- [15] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学. *生态学报*, 2004, 24(8): 1756-1764.
- [16] 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.
- [17] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 黄和平, 尹科. 城市复合生态及生态空间管理. *生态学报*, 2014, 34(1): 1-11.
- [18] 沈悦, 刘天科, 周璞. 自然生态空间用途管制理论分析及管制策略研究. *中国土地科学*, 2017, 31(12): 17-24.
- [19] 陈爽, 刘云霞, 彭立华. 城市生态空间演变规律及调控机制——以南京市为例. *生态学报*, 2008, 28(5): 2270-2278.
- [20] 王金南, 许开鹏, 蒋洪强, 王晶晶. 基于生态环境资源红线的京津冀生态环境共同体发展路径. *环境保护*, 2015, 43(23): 22-25.
- [21] 王甫园, 王开泳, 陈田, 李萍. 城市生态空间研究进展与展望. *地理科学进展*, 2017, 36(2): 207-218.
- [22] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [23] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(4): 55-60.
- [24] Neuenchwander N, Hayek U W, Grêt-Regamey A. Integrating an urban green space typology into procedural 3D visualization for collaborative planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 48: 99-110.
- [25] Ngom R, Gosselin P, Blais C. Reduction of disparities in access to green spaces: their geographic insertion and recreational functions matter. *Applied Geography*, 2016, 66: 35-51.
- [26] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 481-484.
- [27] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态系统服务与自然资本价值评估. *生态学报*, 2001, 21(11): 1918-1926.
- [28] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [29] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展. *生态学报*, 2007, 27(1): 346-356.
- [30] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 王如松. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例. *生态学报*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [31] 杜震, 张刚, 沈莉芳. 成都市生态空间管控研究. *城市规划*, 2013, 37(8): 84-88.
- [32] 周锐, 王新军, 苏海龙, 姜翼来. 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.
- [33] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析. *地理学报*, 2016, 71(1): 49-65.
- [34] 万军, 于雷, 张培培, 王成新, 张南南. 城市生态保护红线划定方法与实践. *环境保护科学*, 2015, 41(1): 6-11, 50-50.
- [35] 谢花林, 李秀彬. 基于 GIS 的区域关键性生态用地空间结构识别方法探讨. *资源科学*, 2011, 33(1): 112-119.
- [36] 黄浦江. 城市绿道网络识别、评价与优化[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [37] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例. *生态学报*, 2010, 30(2): 421-428.
- [38] Costanza R, Fisher B, Ali S, Beer C, Bond L, Boumans R, Danigelis N L, Dickinson J, Elliott C, Farley J, Gayer D E, Glenn L M, Hudspeth T, Mahoney D, McCahill L, McIntosh B, Reed B, Rizvi S A T, Rizzo D M, Simpatico T, Snapp R. Quality of life: an approach integrating opportunities, human needs, and subjective well-being. *Ecological Economics*, 2007, 61(2/3): 267-276.
- [39] 刘绿怡, 卞子元, 丁圣彦. 景观空间异质性对生态系统服务形成与供给的影响. *生态学报*, 2018, 38(18): 6412-6421.
- [40] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [41] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [42] Mansell M, Rollet F. The effect of surface texture on evaporation, infiltration and storage properties of paved surfaces. *Water Science & Technology*, 2009, 60(1): 71-76.
- [43] Friesen J, Rodriguez Sinobas L, Foglia L, Ludwig R. Environmental and socio-economic methodologies and solutions towards integrated water

- resources management. *Science of the Total Environment*, 2017, 581-582: 906-908.
- [44] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(1): 1-26.
- [45] Hamada S, Tanaka T, Ohta T. Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(4): 426-434.
- [46] Huang Q F, Lu Y Q. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 131(3/4): 1055-1067.
- [47] Jeswani H K, Hellweg S, Azapagic A. Accounting for land use, biodiversity and ecosystem services in life cycle assessment: Impacts of breakfast cereals. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 51-59.
- [48] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [49] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与进展. *生态学报*, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [50] 沙宏杰, 张东, 施顺杰, 刘兴兴. 基于耦合模型和遥感技术的江苏中部海岸带生态系统健康评价. *生态学报*, 2018, 38(19): 7102-7112.
- [51] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1452.
- [52] 朱捷缘, 卢慧婷, 王慧芳, 严岩, 唐立娜. 汶川地震重灾区恢复期生态系统健康评价. *生态学报*, 2018, 38(24): 9001-9011.
- [53] 肖风劲, 欧阳华, 傅伯杰, 牛海山. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. *地理学报*, 2003, 58(6): 803-809.
- [54] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 267-271.
- [55] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 李双成, 欧阳华. 生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [56] 颜磊, 许学工. 区域生态风险评价研究进展. *地域研究与开发*, 2010, 29(1): 113-118, 129-129.
- [57] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 李锋, 陈展. 生态风险评价及研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [58] 蒙吉军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 983-990.
- [59] 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.
- [60] 徐欢, 李美丽, 梁海斌, 李宗善, 伍星. 退化森林生态系统评价指标体系研究进展. *生态学报*, 2018, 38(24): 9034-9042.
- [61] 林坚, 宋萌, 张安琪. 国土空间规划功能定位与实施分析. *中国土地*, 2018, (1): 15-17.
- [62] 刘国华, 傅伯杰, 陈利顶, 郭旭东. 中国生态退化的主要类型、特征及分布. *生态学报*, 2000, 20(1): 13-19.
- [63] 孙华, 张桃林, 王兴祥. 土地退化及其评价方法研究概述. *农业环境保护*, 2001, 20(4): 283-285.
- [64] 陈小勇, 宋永昌. 受损生态系统类型及影响其退化的关键因素. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(1): 78-83.
- [65] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9: 3034.
- [66] 林勇, 樊景凤, 温泉, 刘述锡, 李滨勇. 生态红线划分的理论和技术. *生态学报*, 2016, 36(5): 1244-1252.
- [67] 杨娟, 李静, 宋永昌, 蔡永立. 受损常绿阔叶林生态系统退化评价指标体系和模型. *生态学报*, 2006, 26(11): 3749-3756.
- [68] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 154-159.
- [69] 曹宸, 李叙勇. 区县尺度下的河流生态系统健康评价——以北京房山区为例. *生态学报*, 2018, 38(12): 4296-4306.
- [70] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. *生态学报*, 2018, 38(12): 4307-4316.
- [71] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 李承栓, 魏朝富. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 238-249.