

DOI: 10.5846/stxb201712292350

赵东升, 郭彩贇, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): - .

Zhao D S, Guo C Y, Zheng D, Liu L, Wu S H. Review of ecological carrying capacity. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

生态承载力研究进展

赵东升^{1,*}, 郭彩贇^{1,2}, 郑 度¹, 刘 磊^{1,2}, 吴绍洪¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100149

摘要: 基于生态承载力的概念发展, 介绍了常用的生态承载力研究方法, 包括生态足迹法、人类净初级生产力占用法、状态空间法、综合评价法、系统模型法和生态系统服务消耗评价法, 并客观评述了这些方法的优缺点, 指出了目前生态承载力研究中存在的薄弱环节。未来生态承载力研究需要完善理论体系, 深入研究承载力过程机理与承载机制, 将生态系统服务的空间流动因素纳入评估体系, 构建完善的评价指标体系, 加强生态承载力时空动态评估。最终将生态承载力作为解决生态脆弱区资源环境问题的抓手, 建立区域资源环境监测预警机制, 并落实到主体功能规划和生态安全建设上, 为生态文明建设提供有力的科学依据。
关键词: 生态承载力; 研究方法; 薄弱环节; 发展趋势

Review of ecological carrying capacity

ZHAO Dongsheng^{1,*}, GUO Caiyun^{1,2}, ZHENG Du¹, LIU Lei^{1,2}, WU Shaohong¹

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China

Abstract: Based on the development of the concept of ecological carrying capacity (ECC), this study summarized the methods in ECC, including ecological footprint, human appropriation of net primary production, state-space techniques, comprehensive evaluation schemes, systematic models, and the ecosystem services consumption method, which has often been used in previous studies. The advantages and disadvantages of these methods have been analyzed objectively and the weakness pointed out. This study suggested that the theory of ECC needs to be enriched, and the interaction mechanism between variation in ecological factors and its influence on the ECC should be examined. Future research should couple the ecosystem services flow factors into the evaluation system, improve the evaluation index system, and strengthen the temporal and spatial dynamics assessment of ECC. By enhancing the study of ECC feedback in ecologically vulnerable regions scientifically, ECC will be the key to solving the resource and environmental problems of the ecologically vulnerable region, which could support regional resources, environment monitoring, early-warning system establishment, and the main function plan implementation and construction of ecological security. This study introduces several ECC methods that are in widespread use, such as human appropriation of net primary production and the ecosystem services consumption method, which combine land use with the social and economic metabolism mechanism to analyze the temporal-spatial evolution of the ecosystem and demonstrates the changes in the ecosystem function. These comprehensive methods also avoid the error caused by subjective decisions based on a single evaluation index, representing the quantitative limits of the regional ecosystem function.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604803); 中国科学院地理科学与资源研究所特色所培育项目——“一带一路”建设决策支持研究

收稿日期: 2017-12-29; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaods@igsnrr.ac.cn

Key Words: ecological carrying capacity; research methods; weak links; development trend

党的十九大提出,中国要推进绿色发展,加大生态系统保护力度,将生态文明提高到前所未有的高度^[1]。生态承载力是生态文明建设的重要抓手,是判断社会经济活动与资源环境、生态系统协调与否的基础工具,也是生态系统整体水平的表征^[2-3]。提高区域生态承载力已成为当今乃至未来一段时间内经济社会发展的重要任务,而目前生态承载力研究却无法满足不同可持续发展的现实需求。

国内外学者针对生态承载力的概念、研究方法及区域单因素承载力做了很多有益的探索,但生态系统的复杂性使得生态承载力的内涵、外延及核算仍具有挑战性,目前关于生态承载力还没有科学统一的定义、评价体系和核算模型。因此,国际纲领性的环评文件至今未将“生态承载力”正式写入环评制度体系。本文基于已有的生态承载力研究,综合对比了应用较为广泛的六种承载力评价方法,指出了目前生态承载力研究中存在的薄弱环节,提出未来生态承载力研究需要完善理论体系和评价指标体系,加强生态承载力时空动态评估。最终将生态承载力作为解决生态脆弱区资源环境问题的抓手,建立区域资源环境监测预警机制,并应用落实到主体功能区规划和生态安全建设领域。

1 生态承载力的概念和主要特征

1.1 概念发展

Park^[4]于1921年从种群数量角度出发,首次将“承载力”概念引入生态学领域,他定义承载力的涵义是:“在不损害牧场情形下,牧场所能供养的最大牲畜数量”。随着经济的发展,人口、环境和资源等问题日益突出,基于不同需求和侧重点的承载力研究应运而生,如人口承载力、环境承载力和资源承载力等基于某一方面的承载力研究。1990年,Rees^[5]提出“生态足迹”理论,这是承载力研究从单要素研究转向综合研究生态系统的标志。这也明确了生态承载力是单要素承载力基于生态学的系统集成,而其中资源承载力是基础,环境承载力是核心^[6]。生态承载力大体上经历了种群承载力、资源承载力、环境承载力和生态承载力4个阶段。表1是生态承载力概念的发展历程。

1.2 主要特征

一般认为,生态承载力是在资源合理开发利用和环境良性循环的条件下,“自然资源-生态环境-社会经济”复合生态系统的承载能力与承载对象压力的反映^[22],它具有以下几个方面的特性:

(1)动态性^[20]。对于一定数量和质量的自然资源来说,生态承载力不是一成不变的,它与生态历史发展阶段有直接的关系。当生产力水平较高时,区域的资源环境承载力就高,而在发展水平落后的国家,经济的增长有可能是通过牺牲环境和高度消耗资源来实现的,因此生态承载力会比较低。另外,在不同的历史发展阶段,人类活动对生态环境有不同的影响力和治理力度。

(2)尺度性和相对极限性^[23]。尺度性是由人类活动空间的有限性决定的,因为没有范围限制的生态承载力研究是没有实际意义的。相对极限性是指生态承载力在社会生产力发展的某一历史阶段具有最大值,如果时间阶段改变了,生态承载力也将随之改变。

(3)空间异质性。生态系统结构和过程、人类活动都具有明显的空间分异特征,这决定了生态系统提供的服务和消耗、生态承载力也具有空间异质性。例如,我国的西北干旱地区水热组合条件不如南方优越,因此生态承载力势必也比南方小。这就要求人们在研究生态承载力和规划经济建设时应立足于实际,统筹考虑不同区域之间的空间异质性。

(4)相对性和不确定性。关于承载力研究,首先需要转变学者们的思想观念,承载力是一个长期的、历时性的过程,承载能力应该被看作是一个梯度,而不是一个临界极限。承载能力的衡量应该被认为是相对的,而不是绝对的^[24]。另外,生态系统和人类社会的复杂性决定了生态承载力计算的复杂性,加之人类对自然及社会发展规律的认识不足,导致生态承载力具有不确定性。生态承载力研究的重点是承载体与人类社会体系之

间循环并反馈的复杂关系。

表 1 生态承载力概念发展历程
Table 1 The concept developments of ecological carrying capacity

分类 Category	时间 Time	问题角度 Perspective	生态承载力概念 The concept of ecological carrying capacity	文献来源 Literature resources
国外 Foreign	1921 年	畜牧承载角度	在不损害牧场情形下,牧场所能供养的最大牲畜数量	[7]
	1984 年	种群承载角度	在特定时期内,特定生态系统所能支持的最大种群数	[8]
	1993 年	人口承载角度	一定区域内,不损害区域环境条件下区域能承载的人类最大负荷量	[9]
	1997 年	资源承载角度	一个区域实际提供给人类的所有生物生产土地面积(包括水域)的总和	[10]
	1999 年	植被承载角度	在特定时期内,植被所能提供的最大种群数	[11]
国内 Domestic	1994 年	生态环境恶化原因角度	是生态系统承受外部扰动的能力,也是系统结构与功能优劣的反应	[12]
	1999 年	环境承载角度	在某一时期某种环境状态下,某区域生态环境对人类社会经济活动的支持能力	[13]
	2000 年	自然体系生态平衡角度	自然体系调节能力的客观反映	[14]
	2001 年	资源、环境承载力角度	一定时期内承载媒体对承载对象的支持能力,和生态系统的自我维持、自我调节能力,	[15]
	2005 年	生态环境系统结构	某一时期某种环境状态下,某区域生态环境对人类社会经济活动的支持能力,它是生态系统物质组成和结构的综合反映	[16]
	2005 年	生态系统健康角度	在一定社会经济条件下,自然生态系统维持其服务功能和自身健康的潜在能力	[17]
	2007 年	基于可持续理论角度	不同尺度区域在一定时期内,在确保资源合理开发利用和生态环境良性循环,以及区域间保持一定物质交流规模的条件下,区域生态系统能够承载的人口社会规模及其相应的经济方式和总量的能力。	[18]
	2010 年	生态系统结构与功能角度	在生态系统结构和功能不受破坏的前提下,生态系统对外界干扰特别是人类活动的承受能力	[19]
	2011 年	自然生态学视角	在某一特定环境下,某种生物种群存在数量的最高极限	[20]
	2011 年	人类生态学视角	生态系统的自我维持、自我调节的能力,资源与环境子系统的供容能力,及其可维育的社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量	[20]
	2017 年	生态系统综合性	生态系统提供服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力	[21]

(5) 开放性和多样性。没有完全封闭的生态系统,贸易流动和资源跨域配置使得区域生态承载力可通过与外界的物质、能量及信息交流进行提升,一定范围内的生态承载力问题也可通过战争、贸易和行政干预等途径转嫁给其他区域。生态承载力的多样性特征是由生态系统的多样性决定的。人类消费结构随着生产力的不断提高发生着变化,地区之间的经贸关系弥补了区域的资源欠缺,引起隐含承载力在区域间的流动,使得生态承载力研究的难度也因贸易的多样性而更加复杂^[18]。

2 生态承载力的主要研究方法

由于对社会-经济-生态复杂系统的内部结构与功能认识不充分,使得目前关于生态承载力的定量研究仍属探索阶段,针对不同问题和角度的研究方法正在被逐步改进,其中常用的研究方法包括:生态足迹法、人类净初级生产力占用法、状态空间法、综合分析法、系统模型法和生态系统服务消耗评价法等。

2.1 生态足迹法

生态足迹(Ecological Footprint, EF)是 William Rees 首先提出的,1999 年被引入中国^[25-26]。该方法从生物物理量的角度出发,将各种资源和能源消费折算为土地面积来判断生态系统是否处于可载状态,其本质是对研究区土地资源生产能力的估测,公式如下:

$$EF = N \cdot ef = N \cdot \sum_{i=1}^n (a_i \cdot r_j) = N \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{P_i} \right) \cdot r_j$$

式中,EF: 总生态足迹;ef: 人均生态足迹;N: 人口数量; a_i : 人均第 i 种消费物品折算的生物生产面积; r_j : 第 j 种土地类型的均衡因子; C_i : 第 i 种物品的人均消费量; P_i : 第 i 种物品的平均生产能力。

EF 法在生态承载力核算与区域可持续发展领域得到广泛的应用^[27-29]。杨艳^[30]以锡林郭勒盟为例探讨了半干旱草原地区的生态承载力状况;潘洪义^[31]使用生态足迹模型计算了成都市 2009—2014 年的生态承载力状况。生态承载力与对外贸易之间既存在负反馈机制,又存在着非线性的不稳定因素^[32],EF 法的优点是思路新颖,能反映出生态服务生产和流动过程,从供给面测算区域的生态承载量,从需求面测算区域的生态占用,在面对复杂区域生态系统时有较大的应用空间。但 EF 法在理论和计算方面也有一些不足之处^[33]:

(1) EF 法假设土地状况尚在可载状态、只有一种生态功能,且各类土地利用类型具有替代性,这与现实是背离的。实际自然环境中的某些特定类型土地不只有一种生态功能,而相同生态功能的土地产出能力也不尽相同,加之耕作方式的多样化,如复种、套种、混种等耕作方式使得土地服务功能量化困难。这导致不同区域生态承载力计算结果不能直接进行对比。

(2) 考虑到生物物理限制因素,EF 法引入了均衡因子和产量因子,这与现实也不完全一致,EF 核算中的均衡因子与社会经济和技术水平的发展潜力缺乏响应,产量因子标准仍未形成科学有效的量化方法。另外,在能源核算中,EF 只选用了需要的生产性土地面积,没有把生态系统的自净能力和吸纳废弃物所需的土地面积考虑在内。

(3) EF 法的关注点仅在地球表面,忽略了海洋功能、地下水资源、全球气候变化、臭氧层破坏、水土流失等一系列重要的生态效应;EF 法还缺乏对区域间贸易及流量的量化分析,使得无法确定生态赤字的源头。在当前全球气候变化情境下,EF 法因子间关系的简化表达,难以量化生态系统的复杂性、非线性和动态特征,这样的静态分析在未来势必影响其应用价值。

为克服 EF 法贸易数据缺乏、能源输入输出量无法计算的缺陷,Ewing 等^[34]建立了一种将碳足迹、水足迹和生态足迹整合在一起的多区域输入输出建模框架(multi-regional input-output, MRIO),这使得生态承载力评价可信度得到了进一步提升。

2.2 HANPP 法

自然植被净第一性生产力(NPP)反映了自然体系的恢复能力,是衡量生态系统结构特征与人口承载力的基础指标。1975 年,Lieth^[35]首先对 NPP 模型构建进行了研究。根据植物生理生态学特征构建的 NPP 模型可分析区域生态承载力^[36],但通过对整个区域的点参数来研究整体承载力的 NPP 法研究结果误差较大。近年来,国外学者引用了人类净初级生产力占用(Human appropriation of net primary production,简称 HANPP)来解决 NPP 研究中存在的弊端。

为评价人类对土地的生态影响范围,Wackernagel 于 2002 年首次提出 HANPP 的概念^[37],指在人类生产、生活及改造利用活动中,人类所占用的绿色植物在单位时间、单位面积内通过光合作用产生的有机物质

总量扣除呼吸后的剩余部分,即人类占用的 NPP 部分(图 1)^[38]。它量化人为因素对生态系统中资源利用的干预强度,可以评估单个产品与国家总消费之间的相关性,是一种综合的社会生态指标。Haberl 介绍了 HANPP 的两种评估方法和应用模式,并展望了 HANPP 的全球模式和轨迹^[39]。通过持续地量化和绘制人类活动导致的生产力变化和生态系统中生物量流动的影响,HANPP 提供了一个可测量的土地使用强度指标。

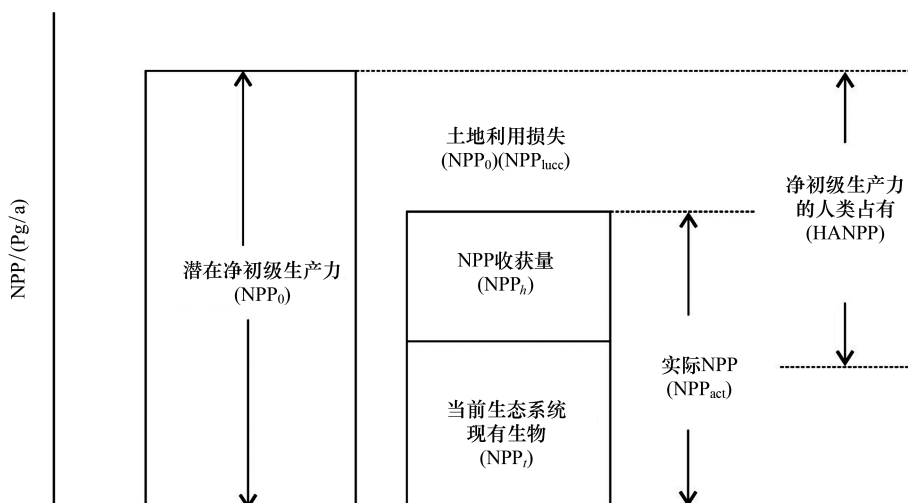


图 1 HANPP 概念图^[38]

Fig.1 Schematic diagram of concepts of HANPP^[38]

NPP, 自然植被净第一性生产力, net primary production; NPP_0 , 潜在净初级生产力, potential net primary production; NPP_{huc} , 土地利用损失 NPP, the human-induced alteration of NPP; NPP_h , NPP 收获量, the harvest yield; NPP_t , 当前生态系统中现有生物, organisms existing in the current ecosystem; NPP_{act} , 实际 NPP, actual NPP; HANPP, 净初级生产力的人类占用, the NPP of the actual vegetation

HANPP 最初的发展主要是服务于人类的资源占用和人类的全球陆地系统角色研究方面,当前 HANPP 相关研究主要集中在改造实际 NPP 计算模型和分析与土地利用的关系方面^[40],或在生态承载力核算领域作为 EF 法的补充应用^[38]。HANPP 能够将社会的新陈代谢与土地利用及其对生态系统功能的影响联系起来,避免了人为主观决定各指标权重带来的误差。另外, HANPP 可为 EF 模型补充可持续发展相关的信息,把物质流分析与景观生态学分析结合起来^[41],因此是一种很有前途的承载力研究方法。但是,相对于 EF 法关注的是人类对生态系统影响的不同方面, HANPP 法侧重于评估“人类支配”自然资源的程度^[42],它包含的资源更有限,数据获取困难造成的参数不确定性问题更突出。另外,关于 HANPP 的可持续性阈值,目前明确的只有 100% 的 HANPP 意味着地球的毁灭,在承载力领域的阈值尚未有定数,这是 HANPP 方法应用于承载力研究中最大的瓶颈,也是 HANPP 研究的重点问题^[43]。加之 HANPP 只能基于国内不同贸易产品的平均值进行估算,不能探测与土地使用集约化相关的影响,这将导致出现评估误差^[44]。

2.3 状态空间法

毛汉英运用状态空间法计算了环渤海地区的区域承载力^[45],这是状态空间法在国内的首次应用。这种方法利用三维状态空间轴表达不同的承载力影响要素向量,利用承载状态点构成的承载曲面判断区域生态承载状态。状态空间法中设计了承压类指标、压力类指标和区域交流指标^[46]。其中,承压类指标主要指资源占有状况、环境容量等反映承载体状态的指标;压力类指标主要反映人类追求发展对承载体产生的压力,如人口素质和经济增长及其造成的资源环境消耗等;区域交流指标反映了人类活动的交流性对承载体的影响,每个区域都是开放的巨系统,资源的跨域调动、资金流与信息交换都强烈的影响着承载体的生态承载能力。

状态空间法可以描述区域生态承载力的动态变化,定量计算不同情形下生态承载力之间的差异。但是,基于状态空间法的生态承载力研究多侧重于承载力过程分析,未考虑人类活动对资源的消耗力度、环境的污染力度、治理力度对生态承载力的影响,生态承载力核算可信度有待提高。

2.4 综合评价法

高吉喜^[47]以黑河流域为例,提出了以生态系统承载指数、生态系统压力指数和生态系统承载压力度为参数来计算生态承载力的综合分析法。金悦^[48]利用这三个指数构建了资源型城市承载力的评价指标体系,应用综合评价法量化研究了唐山市的城市生态承载力。综合评价法多采用层次分析进行最终结果的综合,为减少层次分析法中人为主观性对综合评价结果的影响,模糊层次分析法^[49]、灰关联综合分析法^[50]、多因素关联分析法^[51]等计量方法被引入到评价指标中,近年来 RS 与 GIS 等新技术也被用来构建综合评价模型,并且成为比较热门的承载力研究方法^[52]。

综合分析法考虑因素较全面,计算较为灵活,适用于结构功能较为复杂的区域。但其计算所需资料过多,数据的收集容易成为瓶颈,计算指标之间又存在交叉重叠,导致定量分析精确度不够。另外,综合分析法对空间动态分析较少,缺乏对生态系统内资源流动、产品、服务之间复杂关系的深入探讨。因此,这种方法具体标准难以统一,应用时需要遵循因地制宜的原则。

2.5 系统模型法

系统模型法是从系统整体角度反映区域生态承载力的数理模型方法,是近年来评估资源环境承载力的热点方法^[53]。目前国内生态承载力评价模型有神经网络模型^[54]、集对分析模型^[55]、灰色系统模型^[56]、多元回归模型^[57]、相对资源环境承载力模型^[58-59]、多模型互补对接支持下的系统动力学模型^[60],另有将以上两种或两种以上模型进行整合的综合评价模型^[59]。最近,张盛^[61]建立了针对于水生态承载力研究的粒子群引力搜索算法-投影追踪模型,以此模型解析了京津冀地区的水资源生态效应,以及经济社会效益最大化的内在驱动。

生态承载力核算需要的模型必须在技术上可靠,理论依据充分,能反映承载力问题的非线性、多元性、开放性、多重反馈性等基本特征系统模型法的应用与逐步发展对生态承载力研究的定量评估有很大的提高,其最大的优点是可以进行系统、动态的反馈分析,能够表达生态系统的作用机制。但系统的复杂性使得模型构建非常困难,建模方法及参数选择的不同会引起模型结果各异,且模拟结果的验证较为困难,因此系统模型法适用于对研究区内部结构和作用机制比较清晰的情况下进行宏观的承载力动态研究。

2.6 生态系统服务消耗评价法

生态系统服务是指人类从生态系统获得的福祉和效益,主要分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务四大类^[62]。生态承载力的基础是生态系统的结构和生态过程,承载主体是区域的生态系统,表现为生态系统服务,是生态承载力的限制性因素。甄霖^[63]认为人类所需要的生态系统服务包括产品和服务,表现为直接消费和间接消费。近年来,消费结构发生了变化,人类对生态系统服务的需求在世界大部分地区变得更加多样化,这种消费需求的增长甚至超过了人口增长,这已成为影响生态系统的核心因素,通过改变消费模式来减少生态系统的压力已经成为生态管理的焦点^[64]。千年生态系统评估^[65]提供了一个概念框架,将许多关于生态系统服务的研究成果汇集在一起,把所有与人类密切相关的生态系统服务纳入评估体系,对每种生态系统服务进行承载力评估,应用“木桶效应”,取最小值为区域承载力^[66]。曹智以“生态系统—生态系统服务—人口和经济”为研究主线,提出了“基于生态系统服务的生态承载力”(Ecosystem-services-based Ecological Carrying Capacity, ESECC)^[67]概念:“区域生态系统结构、过程及其空间格局决定的生态系统服务所能支撑的具有一定发展水平的人口和经济规模”,他构建了基于生态系统服务的生态承载力计算模型,计算了云南红河县的各生态系统服务生态承载力情况。也有学者构建基于生态系统服务的生态足迹模型计算区域水生生态承载力^[68-69]。

生态系统服务消耗评价法在分析生态服务和消费的基础上,不仅揭示了人类生产与生活、社会经济发展和资源环境之间的供求关系,而且还体现了生态结构之间的关系,因而能够产生更全面、更精确的生态承载力核算结果,这将有助于指导人类生活和社会经济消费模式的调整 and 转变。但这种方法是把生态系统看作一个“黑箱”,只考虑了生态系统服务量,不考虑各种生态系统服务之间的相互作用和边际效应,且模型参数弹性

较小,在小尺度生态承载力研究时准确度不高。

3 当前生态承载力研究中存在的问题

上述研究生态承载力的方法都有其各自的侧重点、优缺点和适用范围(表 2),由于生态系统的开放性和复杂性,目前生态承载力研究仍难以定量化表征生态系统的供给容纳能力、区间贸易流动影响、生态系统的弹性、人类活动与生态系统的相互作用关系,仍存在诸多的问题和薄弱环节。

表 2 生态承载力主要研究方法优缺点及适用范围
Table 2 The advantages and disadvantages of the research method of ecological carrying capacity

研究方法 Research method	本质 Essence	优势 Advantage	缺陷 Disadvantage	适用范围 Range of application
生态足迹法 Ecological footprint	土地生产能力估测	在面对复杂区域生态系统时有更大的应用空间	对自然系统提供资源、消纳废弃物的功能、区域贸易的影响描述不周,模型参数弹性不足	国家或国际范围
人类净初级生产力占用 Human appropriation of net primary production	人类对 NPP 的占用	能定量表示区域生态系统的生态上限	忽略了生物量进出口问题、缺乏研究数据	全球与国家范围
状态空间法 State-space techniques	系统外部特征和内部性能的时域定量分析	可描述区域生态承载力的动态变化,还可以定量计算不同情形下生态承载力之间的差异	对人的主观能动作用、资源替代作用不够重视	一定时间尺度内的区域承载力研究
综合分析法 Comprehensive evaluation schemes	承载媒体的客观承载力与被承载对象压力大小的计算	考虑因素较为全面,可跨越不同单位尺度	操作复杂,指数精确性待证	结构功能复杂的区域
系统模型法 Systematic models	从整体生态系统动态变化角度	系统、动态的反馈分析	模型构建困难,结果验证困难	作用机理清晰
生态系统服务消耗评价法 Ecosystem services consumption method	生态系统服务量计算	揭示了人类生产与生活、社会经济、资源环境之间的供求关系,能够产生更全面的生态承载力核算结果	把生态系统看做一个“黑箱”,不考虑各种生态系统服务之间的相互作用和边际效应,模型参数弹性较小,小范围承载力研究准确度低	适用于大尺度

3.1 生态承载力理论体系不完善,研究方法有待创新

生态系统的复杂性决定了生态承载力的内涵和外延较为宽泛,而生态承载力理论发展历史较短,其涉及的研究深度尚显不足,因此其概念阐述仍存在较大的分歧。传统的生态承载力研究主要是以探索资源环境要素与承载力之间的关系为切入点,多采用静态、经验统计学方法来定量评估承载力,对承载力计算过程中各个要素之间的形成过程机理缺乏科学的阐释,忽略了生态系统结构、过程及其功能对生态承载力的传导作用,这种传统研究对于资源环境-社会经济系统中各个要素间的互相作用对承载力影响的探讨不够深入,理论体系不完善,阻碍了生态承载力核算及应用的进一步发展。国内外关于生态承载力的研究方法虽多,但各自有其局限性,亟需在完善理论的基础上进行评估方法创新,建立高可信度的多因素耦合生态承载力评价模型。

3.2 缺乏动态预测研究和预警机制

目前大多生态承载力研究侧重于对现状的静态评估,生态承载力动态演化规律和动态预测研究不够深入,无法建立科学实用的预警机制。生态承载力作为可持续发展政策制定的重要参量,其未来的承载力预估则更为重要,而中国部分地区的资源环境要素、生态系统结构功能和资源环境承载力协同变化的观测与实验数据缺乏及整合研究不足是制约资源环境承载力动态评估的薄弱环节^[61]。

3.3 承载力应用落实不到位

目前承载力研究多应用于区域单因素承载力评估与政策制定领域,而承载力核算最终的应用价值,除了根据核算结果提出各类区划和承载力提高方案,辅助主体功能规划、加强生态安全也是承载力研究的重要方面。主体功能区各自合理的发展路径对区域发展有着重要的作用^[70],是保证区域发展有序进行的重要依据^[71]。我国仍缺乏包含未来发展趋势的动态生态规划,而生态补偿机制也不健全,涉及到生态保护的各项政策不能形成一个以生态保护为专门目标的完整系统,致使环境保护者的利益得不到有效保障,也制约了生态承载力评估的实际应用效果。

4 生态承载力研究未来发展趋势

当前,国内外生态承载力的研究已取得了丰硕的成果。然而,生态系统的交互作用非常复杂,跨尺度也增加了承载力核算难度,这使得生态承载力的研究仍然面临着严峻的挑战,未来生态承载力的可能研究需要从以下几个方面进行深化和突破:

4.1 完善生态承载力理论体系,深入承载力过程机理、承载机制研究

在现有的研究基础之上,充分考虑生态系统中各要素间的相互作用过程及其对生态承载力的影响,科学定义生态承载力,并构建与现实相契合、能客观衡量生态承载状况的理论与方法体系,是生态承载力精确核算的基础。生态系统与承载对象之间存在着复杂的反馈机制,这是无法通过加长研究数据时间序列进行克服的难点,准确评估区域生态承载力还需要对生态承载力形成过程、驱动机制和承载机制有准确的认知。承载机制是生态系统的承载功能及其系统中各要素之间的承载作用关系,这种承载关系不是简单的供应关系或者界面接触关系,而是双方内部多因素间的复杂互馈作用,具有可变性、弹性、扩展性、相对性、容限性和客观性,难以定量刻画。深入分析生态系统的结构、过程和功能对资源环境要素变化的响应函数,研究承载力内部形成机制与承载机制,是未来生态承载力研究取得进展的基础和关键。

4.2 与全球变化的相结合,加强生态承载力时空动态评估

近 100 年以来,全球平均气温上升了 0.85°C ^[72],在 RCP8.5 情景下,未来中国气候将继续增暖^[73],气候变化会通过影响植物生产力的方式或者加深资源供需之间的矛盾,从而影响区域承载力的提升^[74];也有研究也表明,气候变化情境下海南岛的生态承载力有增大的趋势^[75]。另外,全球经济增长与科技进步也极大的影响了区域生态承载力的大小。科技是把双刃剑,科技进步在提高社会生产力水平和提供便利化生活的同时,也带来了生态破坏和环境污染等一系列负面影响,同样需要科技的力量提高环境治理水平和力度,加大科技投入,加强环境污染治理力度和监测水平是未来环境保护的积极对策。全球气候、经济变化对生态系统将产生巨大影响,甚至改变生态系统的结构和功能,未来的生态承载力研究需与全球变化的相结合,实现生态承载力动态评估。

目前中国已开始应用 RS 和 GIS 技术加强生态动态监测,开展资源环境要素、碳水通量和气象要素的长期定位监测,结合实地的样带调查、长期观测资料的整理,通过观测研究全面获取各种资源环境要素的时空格局特征,为生态承载力量化研究提供有力的数据支撑。在加强生态动态监测的基础上,把握区域时空动态变化及时空耦合下的适应性综合研究,是未来生态承载力核算的难点和前沿问题^[76]。

4.3 完善生态承载力评价指标体系,尤其需要加入生态系统服务的空间流动因素

生态承载力的评价是对生态压力的综合评价,指标体系框架的构建需要涵盖研究区域的资源、环境、人口和社会经济等多个领域,目前“目标层—准则层—指标层”指标体系具有普适性,但不同区域经济、自然环境的不同需要相应的评价指标体系。例如,山区生态承载力与平原生态承载力核算不应采用相同的研究模式。在中国山区生态承载力研究中,山区丰富的资源一定程度上弥补了其资源环境—社会经济系统的封闭性,但是对承担水源涵养、水土保持等重要环境功能的地区带来了负面影响,不同的民族文化对区域承载力的影响也不尽相同^[77],未来生态承载力评价体系应该纳入诸如社会制度与分配方式、自然环境的区域空间分异、封

闭性特征和民族文化类型等评价指标。

另外,现有的生态承载力计算多忽略了生态系统服务的空间流动^[78-79]、预先舍弃了贸易、人口和资源的区际流动因素^[80],计算存在很大不确定性。未来生态承载力发展需要完善承载力评价指标体系,尤其需要加入生态系统服务的空间流动因素以便提高生态承载力核算结果的科学性和可信度。美国佛蒙特大学开展了生态系统服务人工智能项目^[81](Artificial Intelligence for Ecosystem Services, ARIES),设想集成生态学与地理学的常用模型来模拟生态系统服务的区域流动过程并制图,但是此项目设计规模宏大,需要大量的数据支持和学科支撑,目前进展缓慢。

4.4 从生态承载力入手解决生态脆弱区资源环境问题

中国生态脆弱区占国土面积 60% 以上,资源环境要素空间分异特征非常显著,要素对环境变化响应敏感,承载力受到短板要素制约较明显,总体承载力较弱。有些地区生态超载问题日趋严重,修复代价巨大^[82-83]。脆弱区的生态变化会强烈干扰邻域资源环境承载力的生产力和生态服务状况,甚至导致生态系统突变,威胁区域生态环境安全和可持续发展。在现有的经济环境背景下,将生态承载力作为抓手来解决生态脆弱区的问题,是解决生态脆弱区资源环境问题的突破口和着力点。

未来需要在气候变化和社会经济发展情景下,结合生态系统环境状况,科学分析脆弱区生态承载力的承载反馈机制,从脆弱区承载体、承载对象与承载过程三个方面入手,充分考虑脆弱区生态产品空间流动过程和区域空间分异特征等,建立脆弱区资源环境要素、生态系统结构功能与生态承载力之间的定量关系,发展基于生态脆弱区上中下游一体化的承载力评估方法体系,提高脆弱区承载力评估的可信度,解决限制生态脆弱区可持续发展的资源环境问题。

4.5 建立区域资源环境监测预警机制,并落实到生态规划及生态安全领域

当生态系统承载能力超过承载阈值时,生态系统会产生不可逆转的负面影响,地球生命支持系统的功能就会发生突变^[84]。因此,揭示生态体系维持生态功能的阈值,建立资源环境监测预警机制是全面深化生态文明改革的重大任务^[85-86]。徐卫华^[21]采用生态系统服务功能和生态退化状况表征生态系统健康度,进行生态承载力预警评估。Huang^[87]结合风险值与时间序列将风险值划分为了不同等级,基于风险熵构建了承载力计算模型,这种模型较为准确的反映了环境承载力的异常变动,可为建立生态承载力预警机制提供及时的参考。随着生态承载力研究的逐步发展,建立起科学的资源环境预警机制是未来生态承载力发展的重要目标和热点问题。

另外,生态承载力核算与预警的成果不仅应用于资源调整 and 环境保护方面。结合区域生态承载力,将经济社会发展水平、未来开发潜力和文化等因素作为指标体系,对地域功能进行科学识别,是未来区域发展的必然趋势^[88]。例如,Navarro^[89]等将自然保护区承载力与游客数量相结合,分析了沿海城市的社会承载力,为旅游规划提供建议。评价国家社会、经济与环境等多维度的资源承载力状况,可为产业空间优化提供依据^[90]。未来承载力研究将侧重于新兴产业发展的资源、环境研究以及循环经济状态下承载力变动问题^[91]。面对生态文明建设的新形势,确定适宜经济增长和自然保护和谐发展的承载力阈值,是有保证区域健康可持续发展的首要问题^[76-92]。

4.6 优化整合生态承载力研究方法,开发由多因素耦合的动态研究模型

传统的生态承载力理论大多是基于单一资源环境因子对单一物种或功能属性的演变建立起来的,特别是资源的短缺(如水和土壤)以及环境承载能力(如大气、水、土壤)^[66],承载力计算方法也因问题不同而有各自的侧重点和片面性^[92]。然而,生态系统属于复杂的人类环境系统,耦合了许多资源和环境因素,任何单一因素或相关环节的变化都可能导致承载能力的改变。

生态承载力研究急需一个多因素耦合模型来模拟社会和生态整体之间的关系,这需要通过系统动力学法构建出生态-环境-资源复杂巨系统的内部结构关系,在微观上寻求更精确的度量方法,宏观上结构更全面、动态关系更清晰,来优化整合生态承载力研究方法,逐步实现不同方法的优势互补和模型过程整合;利用系统动

力学和多目标模型来测量区域承载能力衰减对人类环境复杂系统运行机制的分析,模拟生态系统供给和人类需求的动态变化,以准确地评价生态承载力的状态和阈值,从而为规划可持续资源利用和生态文明建设提供科学依据。

5 结语

生态文明建设离不开科学合理的生态规划,生态系统的复杂性决定了生态承载力的评价研究将会是充满挑战的工作。中国针对区域生态承载力的研究多基于传统方法,忽略了很多重要的影响因素,无法满足社会经济发展对承载力的实际需求,研究水平仍需要提高。

在全球变化背景下,基于已有的理论基础与研究方法,逐渐完善生态承载力理论方法与指标体系,深入研究承载过程与承载机制,科学量化生态系统结构和功能与生态服务的关系,解决生态服务交叉和权衡问题,根据中国不同区域复杂生态系统特征进行动态分析,为解决生态脆弱区资源环境问题找到解决突破口。建全区域资源环境监测预警机制,并将生态承载力研究成果落实到主体功能规划、生态安全及区域可持续策略的制定上,具有重要的现实意义和紧迫性。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告. 中国经济周刊, 2017, (42): 68-96.
- [2] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 潘韬, 李鹏. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.
- [3] 樊杰, 王亚飞, 汤青, 周侃. 全国资源环境承载力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程. 地理科学, 2015, 35(1): 1-10.
- [4] Park E P, Watson B E. Introduction to the Science of Sociology. Chicago: The University of Chicago Press, 1970: 1-12.
- [5] Rees W E. The ecology of sustainable development. Ecologist, 1990, 20(1): 18-23.
- [6] 陈端吕, 董明辉, 彭保发. 生态承载力研究综述. 湖南文理学院学报: 社会科学版, 2005, 30(5): 70-73.
- [7] Park R E. Sociology and the Social Sciences. The American Journal of Sociology, 1921, 26(4): 401-424.
- [8] Guthery F S. Principles of Wildlife Management by J. A. Bailey. Geological Society of America Bulletin, 2010.
- [9] Catton W R. Carrying-capacity and the death of a culture—a tale of 2 autopsies. Sociological Inquiry, 1993, 63(2): 202-223.
- [10] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective. Ecological Economics, 1997, 20(1): 3-24.
- [11] Lunt I D, Byrne M, Hellmann J J, Mitchell N J, Garnett S T, Hayward M W, Martin T G, Madden E M, Williams S E, Zander K K. Using assisted colonisation to conserve biodiversity and restore ecosystem function under climate change. Biological Conservation, 2013, 157(11): 172-177.
- [12] 杨贤智. 环境管理学. 桃园: 科技图书股份有限公司, 1994: 332-335.
- [13] 王中根, 夏军. 区域生态环境承载力的量化方法研究. 长江职工大学学报, 1999, 16(4): 9-12.
- [14] 王家骥, 姚小红, 李京荣, 常虹, 王渊高. 黑河流域生态承载力估测. 环境科学研究, 2000, 13(2): 44-48.
- [15] 高吉喜. 可持续发展理论探索. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 219-225.
- [16] 齐亚彬. 资源环境承载力研究进展及其主要问题剖析. 中国国土资源经济, 2005, 18(5): 7-11.
- [17] 杨志峰, 隋欣. 基于生态系统健康的生态承载力评价. 环境科学学报, 2005, 25(5): 586-594.
- [18] 王开运. 生态承载力复合模型系统与应用. 北京: 科学出版社, 2007: 99-105.
- [19] 沈渭寿, 张慧, 邹长新, 燕守广, 赵卫. 区域生态承载力与生态安全研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 323-225.
- [20] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞. 中国生态资源承载力研究. 北京: 科学出版社, 2011: 21-30.
- [21] 徐卫华, 杨琰瑛, 张路, 肖霖, 王效科, 欧阳志云. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究. 地理科学进展, 2017, 36(3): 306-312.
- [22] 叶菁, 谢巧巧, 谭宁焱. 基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究. 农业工程学报, 2017, 33(11): 262-271.
- [23] Bayliss-Smith T. Constraints on population growth: The case of the Polynesian Outlier Atolls in the precontact period. Human Ecology, 1974, 2(4): 259-295.
- [24] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616.
- [25] 徐中民, 张志强, 程国栋, 陈东景. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. 应用生态学报, 2003, 14(2): 280-285.
- [26] Siche R, Pereira L, Agostinho F, Ortega E. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [27] 谢文瑄, 黄庆旭, 何春阳. 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系. 生态学报, 2017, 37(3): 969-978.
- [28] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例. 生态学报, 2017, 37(9): 2982-2993.

- [29] 杨艳, 牛建明, 张庆, 张艳楠. 基于生态足迹的半干旱草原区生态承载力与可持续发展研究——以内蒙古锡林郭勒盟为例. 生态学报, 2011, 31(17): 5096-5104.
- [30] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 冯茂秋, 朱芳. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异. 生态学报, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [31] 陈成忠, 林振山. 中国人均生态足迹与生物承载力变化的 EMD 分析及情景预测. 生态学报, 2007, 27(12): 5291-5299.
- [32] 符国基, 徐恒力, 陈文婷. 海南省自然生态承载力研究. 自然资源学报, 2008, 23(3): 412-421.
- [33] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, Galli A, Ercein A E, Weinzettel J, Steen-Olsen K. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework. *Ecological Indicators*, 2012, 23(4): 1-8.
- [34] Lieth H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975.
- [35] Medková H, Vačkář D, Weinzettel J. Appropriation of potential net primary production by cropland in terrestrial ecoregions. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 150: 294-300.
- [36] Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D, Linares A C, Jenkins M, Kapos V, Monfreda C, Loh J, Myers N, Norgaard R, Randers J. Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(14): 9266-9271.
- [37] Haberl H, Erb K-H, Krausmann F. Human Appropriation of Net Primary Production: Patterns, Trends, and Planetary Boundaries. *Annual Review of Environment and Resources*, 2014, 39(39): 363-391.
- [38] O'Neill D W, Tyedmers P H, Beazley K F. Human appropriation of net primary production (HANPP) in Nova Scotia, Canada. *Regional Environmental Change*, 2007, 7(1): 1-14.
- [39] Wrška T, Erb K-H, Schulz N B, Peterseil J, Hahn C, Haberl H. Linking pattern and process in cultural landscapes. An empirical study based on spatially explicit indicators. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 289-306.
- [40] Haberl H, Krausmann F, Erb K-H, Schulz N B, Rojstaczer S, Sterling S M, Moore N. Human appropriation of net primary production. *Science*, 2002, 296(5575): 1968-1969.
- [41] Sjafrie N D M, Adrianto L, Damar A, Boer M. Human appropriation of net primary production (HANPP) in seagrass ecosystem: an example from the east coast of Bintan Regency, Kepulauan Riau Province, Indonesia. *Environment, Development and Sustainability*, 2018, 20(2): 865-881.
- [42] Plutzer C, Kroisleitner C, Haberl H, Fetzel T, Bulgheroni C, Beringer T, Hostert P, Kastner T, Kuemmerle T, Lauk C. Changes in the spatial patterns of human appropriation of net primary production (HANPP) in Europe 1990-2006. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(5): 1225-1238.
- [43] 彭建, 王仰麟, 吴健生. 净初级生产力的区域占用: 一种衡量区域可持续发展的新方法. 自然资源学报, 2007, 22(1): 153-158.
- [44] 毛汉英, 余丹林. 环渤海地区区域承载力研究. 地理学报, 2001, 56(3): 363-371.
- [45] 纪学朋, 白永平, 杜海波, 王军邦, 周亮. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. 生态学报, 2017, 37(17): 5861-5870.
- [46] 高吉喜. 可持续发展理论探索. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 20-23.
- [47] 金悦, 陆兆华, 檀菲菲, 张萌, 张红玉. 典型资源型城市生态承载力评价——以唐山市为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4852-4859.
- [48] 董楠楠, 王有乐. 基于模糊综合评价法和层次分析法的张掖市黑河湿地水质评价. 湖北农业科学, 2016, 55(21): 5535-5539, 5542-5542.
- [49] 霍正文, 孙超. 灰关联综合分析法在石羊河流域生态健康评价中的应用. 地下水, 2017, 39(5): 99-101.
- [50] 夏军, 王中根, 左其亨. 生态环境承载力的一种量化方法研究——以海河流域为例. 自然资源学报, 2004, 19(6): 786-794.
- [51] 张彬, 杨联安, 向莹, 姜晓清, 杜挺, 宋英强, 杨煜岑, 王晶. 基于 RS 和 GIS 的生态环境质量综合评价与时空变化分析——以湖北省秭归县为例. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2016, 47(1): 64-71.
- [52] Wang C H, Hou Y L, Xue Y J. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: analysis of policy optimization for urban wetland water resources management. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1180-1191.
- [53] Lein J K. Mapping environmental carrying capacity using an artificial neural network: A first experiment. *Land Degradation & Development*, 2010, 6(1): 17-28.
- [54] 王红旗, 田雅楠, 孙静雯, 张亚夫. 基于集对分析的内蒙古自治区资源环境承载力评价研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(2/3): 292-296.
- [55] 贾树海, 王晋, 潘锦华, 马月, 邱志伟, 沈玉玉. 辽宁中部平原耕地生产潜力及人口承载力的研究. 浙江农业科学, 2010, 1(3): 617-620.
- [56] Vetter S, Bond W J. Changing predictors of spatial and temporal variability in stocking rates in a severely degraded communal rangeland. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(2): 190-199.
- [57] 孙慧, 刘媛媛. 相对资源承载力模型的扩展与实证. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 126-135.
- [58] 郭轲, 王立群. 京津冀地区资源环境承载力动态变化及其驱动因子. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3818-3826.
- [59] 方创琳, 鲍超, 张传国. 干旱地区生态-生产-生活承载力变化情势与演变情景分析. 生态学报, 2003, 23(9): 1915-1923.
- [60] 张盛, 王铁宇, 张红, 李奇锋, 周云桥, 宋帅. 多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例. 生态学报, 2017, 37(12): 4159-4168.
- [61] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [62] 甄霖, 刘雪林, 魏云洁. 生态系统服务消费模式、计量及其管理框架构建. 资源科学, 2008, 30(1): 100-106.
- [63] Gerbens-Leenes P W, Nonhebel S. Consumption patterns and their effects on land required for food. *Ecological Economics*, 2002, 42(1/2): 185-199.

- [64] Carpenter S R, DeFries R, Dietz T, Mooney H A, Polasky S, Reid W V, Scholes R J. Millennium ecosystem assessment: research needs. *Science*, 2006, 314(5797): 257-258.
- [65] Du W P, Yan H M, Yang Y Z, Liu F. Evaluation methods and research trends for ecological carrying capacity. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(2): 115-124.
- [66] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 白艳莹. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11.
- [67] 焦雯珺, 闵庆文, 李文华, Fuller A M. 基于 ESEF 的水生态承载力: 理论、模型与应用. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1041-1048.
- [68] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析. *生态学报*, 2013, 33(13): 4111-4124.
- [69] Wang L Y, Li F X, Gong Y, Jiang P H, Huang Q H, Hong W Y, Chen D. A quality assessment of national territory use at the city level: a planning review perspective. *Sustainability*, 2016, 8(2): 145-145.
- [70] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. *地理学报*, 2007, 62(4): 339-350.
- [72] Stocker T, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P. Summary for policymakers//IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1-100.
- [73] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 16-27.
- [74] 陈丽萍, 赵华东, 赵华军. 基于气候改变情况下的水资源动态承载力分析. *水资源开发与管理*, 2017, (11): 55-58.
- [75] 陈炫, 陶忠良, 吴志祥, 周兆德. 气候变化对海南岛生态承载力的影响分析. *华南热带农业大学学报*, 2007, 13(1): 33-37.
- [76] 吕一河, 傅微, 李婷, 刘源鑫. 区域资源环境综合承载力研究进展与展望. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 130-136.
- [77] 邓伟. 山区资源环境承载力研究现状与关键问题. *地理研究*, 2010, 29(6): 959-969.
- [78] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 洁徐. 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.
- [79] Semmens D J, Diffendorfer J E, López-Hoffman L, Shapiro CS D. Accounting for the ecosystem services of migratory species: Quantifying migration support and spatial subsidies. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2236-2242.
- [80] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39(4): 24-33.
- [81] Bagstad K J, Semmens D, Winthrop R, Jaworski D, Larson J. Ecosystem services valuation to support decisionmaking on public lands—A case study of the San Pedro River watershed, Arizona. *Scientific Investigations Report 2012-5251*, 2012.
- [82] 周侃, 樊杰. 中国欠发达地区资源环境承载力特征与影响因素——以宁夏西海固地区和云南怒江州为例. *地理研究*, 2015, 34(1): 39-52.
- [83] 赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究——一个基于生态地理区域的研究(英文). *地理学报*, 2014, 24(2): 237-248.
- [84] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413(6856): 591-596.
- [85] 樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载能力预警(2016 版)的基点和技术方法进展. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 266-276.
- [86] 叶有华, 韩宙, 孙芳芳, 张原, 黄涛, 陈礼, 李鑫. 小尺度资源环境承载力预警评价研究——以大鹏半岛为例. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 1275-1283.
- [87] Huang X, Bai H. Risk prediction of rural public security environmental carrying capacity based on the risk entropy. *Natural Hazards*, 2018, 90(1): 157-171.
- [88] Zhou X Y, Lei K, Meng W, Khu S-T. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 1462-1472.
- [89] Jurado E N, Damian I M, Fernández-Morales A. Carrying capacity model applied in coastal destinations. *Annals of Tourism Research*, 2013, 43(7): 1-19.
- [90] Martire S, Castellani V, Sala S. Carrying capacity assessment of forest resources: enhancing environmental sustainability in energy production at local scale. *Resources Conservation and Recycling*, 2015, 94: 11-20.
- [91] 钟维琼, 代涛, 高湘昀. 产业发展与资源环境承载力研究综述. *资源与产业*, 2016, 18(6): 74-80.
- [92] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.