

生态承载力评价方法研究进展

魏晓旭^{1, 2}, 颜长珍¹

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 生态承载力是当前生态学、地理学、经济学等领域的研究热点, 生态承载力评价方法的研究对于区域社会经济协调可持续发展具有重要的意义。在详细阐述生态承载力概念、内涵、国内主要研究领域、研究机构的基础上, 重点分析比较了目前生态承载力所涉及的研究方法, 并比较了不同模型之间的优缺点, 最后分析总结了目前生态承载力研究存在的不足和未来需要加强的领域和方向。从方法上来看, 目前所用方法主要有: (1) 指标体系综合评价法; (2) 产品周期综合评价法; (3) 结合不同学科和不同方法的综合评价法。目前生态承载力的研究缺乏科学完整的研究体系, 尚未构建具有普适性的评价指标体系, 演化趋势与模拟预测研究不足, 格局分异研究较少, 未来应该在以下几个方面深入研究: (1) 加强生态承载力模型集成研究。由于生态承载力问题十分复杂, 涉及资源、环境、生态、社会、经济等诸多要素, 因此需要综合各个要素之间的相互关系及影响机制, 进行不同模型集成和综合研究; (2) 应从影响生态承载力的主动与被动因子, 动态与静态因子出发, 构建综合性和普适性较强的评价体系; (3) 加强生态承载力的动态模拟研究, 实现对生态承载力潜力的估算和动态变化过程的监测; (4) 研究不同尺度下生态承载力时空变化特征及空间分异, 并对比分析各模型对不同尺度的精度要求和结果的可靠性。

关键词: 生态承载力; 评价方法; 可持续发展; 研究进展

Research and model application in ecological carrying capacity

WEI Xiaoxu^{1, 2}, YAN Changzhen¹

1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

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

Abstract: Background, aim, and scope Ecological carrying capacity (ECC) is a research frontier in the domain of ecology, geography and economics, which is of great significance for the coordinated and sustainable development of local social economy. The concept of carrying capacity can be dated back to the 1920s, which is used to describe the limitation of natural resources and environment and its influence in the development of human society. Since 1990s, with the continuous expansion of the application scope on carrying capacity, and the concept of ecological carrying capacity has been derived. In this study, we aim to put forward the fields and directions of ecological

收稿日期: 2018-10-17; 录用日期: 2018-12-15; 网络出版: 2018-12-23

Received Date: 2018-10-17; Accepted Date: 2018-12-15; Online first: 2018-12-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0500201); 国家自然科学基金项目 (41730752)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0500201); National Natural Science Foundation of China (41730752)

通信作者: 魏晓旭, E-mail: weixiaoxu@lzb.ac.cn

Corresponding Author: WEI Xiaoxu, E-mail: weixiaoxu@lzb.ac.cn

引用格式: 魏晓旭, 颜长珍. 2019. 生态承载力评价方法研究进展 [J]. 地球环境学报, 10(5): 441–452.

Citation: Wei X X, Yan C Z. 2019. Research and model application in ecological carrying capacity [J]. Journal of Earth Environment, 10(5): 441–452.

carrying capacity that need to be strengthened in the future through comparing the models and methods and analyzing existing problem. **Materials and methods** The conception of ecological carrying capacity, connotation, research field, research institutions were analyzed, and various research methods, advantages and disadvantages of models were also analyzed and compared on the basis of comparative analysis the different models. Last, the deficiencies of current research of ecological carrying capacity and the research direction in the future were summarized. **Results** Seen from the perspective methods, it mainly includes: (1) comprehensive evaluation indicator system; (2) product cycle comprehensive evaluation method; (3) comprehensive evaluation method combining different disciplines and methods. **Discussion** There is a lack of scientific and complete research system, a universal evaluation index system has not been built and the evolution trend and simulation research are scarce. **Conclusions** The research on ecological carrying capacity should be lucubrated as follows: (1) to strengthen the integration research on ecological carrying capacity model. Ecological carrying capacity is very complex field, involving resources, environment, ecology, society, economy and many other discipline, it is necessary to integrate the mutual relations and influence mechanism among various elements, and conduct different model integration and comprehensive research. (2) establish the comprehensive indicator system, including five major categories of indicators: population, economy, resources, environment and ecology. Start from the active factor, passive factor, dynamic factor and static factor, and build a comprehensive and relatively universal evaluation system; (3) strengthen the dynamic simulation research, and realize the estimation of ecological carrying capacity potential and the prediction of dynamic change process; (4) study the spatial and temporal variation characteristics and spatial differentiation of ecological carrying capacity at different scales, and analyze the accuracy requirements of each model at different scales and the reliability of the results. **Recommendations and perspectives** The studies on research and model application in ecological carrying capacity have made a great progress and achievements. However, there are still some shortages concerning scientific and complete research system, universal evaluation index system, and the evolution trend and simulation research which have not been addressed and investigated further. As mentioned above problems, we suggested research directions that we need to do in future works.

Key words: ecological carrying capacity; assessment methods; sustainable development; research progress

20 世纪以来,随着科技的快速发展,人类积累了丰富的物质财富和精神财富,然而,环境污染、资源枯竭以及生态恶化等问题也相伴而来,严重威胁着人类社会的健康可持续发展(Cohen, 1995; 许联芳等, 2006)。针对以上问题,我国政府先后采取了一系列措施,包括生态文明建设宏伟蓝图的战略决策、《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》以及资源环境承载能力监测预警技术指南的发布,这在指标体系和方法方面为资源环境承载力的评价提供了理论依据,也在一定程度上促进了我国对资源环境承载力的相关研究工作。生态承载力评价作为资源环境承载力评价中不可或缺的主要内容,其研究内容和评价方法已成为评价可持续发展能力基础支持系统的方法之一,将可持续发展的理念融入生态承载力评价方法中,逐渐成为地理学、生态学、环境学、资源学等不同学科广泛关注的焦点和前沿领域(IUCN et al, 1991;

许联芳等, 2006)。由于生态承载力所受影响因素多,影响机制复杂多变,目前关于生态承载力的评价方法还没形成完整规范的体系,学术界对于生态承载力的定义也存在不一致性(高吉喜, 2001; 孟爱云等, 2006)。本文对现有研究成果进行了较为系统的梳理与总结,阐述了生态承载力的起源、演化与内涵,分析了生态承载力的评价方法,并探讨了生态承载力评价方法存在的不足以及未来生态承载力的研究方向等,以期为区域乃至全国的生态承载力评价提供一定参考。

1 生态承载力概念的起源与发展现状

1.1 生态承载力概念起源与演化

承载力(carrying capacity)一词原为物理力学中的一个物理量,指物体在不产生任何破坏时所能承受的最大负荷,可以通过野外的或室内的力学试验得到具体数据(高吉喜, 2001; 向芸芸和蒙古

军, 2012)。随着城市化和工业化的快速发展, 植被退化、土壤流失以及环境污染与资源短缺等一系列问题的出现, 承载力一词逐渐被用来描述生态系统对环境变化的最大承受能力。Park and Burgess (1921) 首次提出了承载力的概念, 用以表征资源环境限制因子对人类社会物质增长过程的重要影响, 这一概念的提出, 为后来的生态承载力、资源承载力乃至环境承载力都产生了重要影响。美国学者 Hadwen and Palmer (1922) 研究驯鹿数量时也提出“承载力”一词, 承载力逐渐引起了一些学者的广泛关注; Errington (1934) 将承载力思想和方法应用到野生生物的研究当中, 初步解释了生物量数量密度与物种恢复之间的关系; Odum (1953) 出版了全球第一部生态学教材, 系统地介绍了承载力的含义和应用, 生态承载力由此正式成为生态学研究的重要领域。20 世纪 60 年代以后, 西方发达国家普遍经历了生态环境质量下降的问题, 生态环境承载力引起了他们的注意, 结合承载力的思想, 学者们提出了环境容量 (environmental capacity) 的概念。1972 年, 意大利学者在《增长的极限》首先指出土地和资源环境无法支撑人类经济的无限增长, 人们需要注重生态容量和环境容量 (Meadows et al, 1972)。1973 年, 联合国召开人类环境会议, 提出了承载力评估和可持续发展理念 (United Nations Environment Program, 1973); 1985 年联合国教科文组织 (UNESCO) 和世界粮农组织 (FAO) 又在理解并综合应用前人研究成果的基础上提出了资源承载力 (resources carrying capacity) 的概念 (UNESCO and FAO, 1985)。1987 年, 世界环境与发展委员会年出版了《我们共同的未来》发展报告, 该报告对可持续发展的具体含义进行了构思, 提出了可持续发展千年大计实施方略 (World Commission on Environment and Development, 1987)。20 世纪 90 年代以来, 承载力的概念和应用范围不断扩大, 从最初的物理领域逐渐扩展到生态学、地理学等诸多领域, 并衍生出一系列概念, 如种群承载力 (Smaal et al, 1997)、草地承载力 (刘东霞等, 2007)、土地承载力 (陈百明, 1991)、环境承载力 (高吉喜, 2001)、资源环境承载力 (高吉喜, 2001)、生态承载力 (王宁等, 2004), 人们将可持续发展理念融入承载力的概念里面, 其评价体系也更加注重资源环境的可持续性 (Bicknell et al, 1998; 朱泽生和孙玲, 2006; Yue et al, 2006)。

生态承载力指在一定区域范围内, 作为子项的自然资源、生态环境以及社会经济等协调可持续发展的前提下, 自然 - 经济 - 社会复合生态系统所能最大限度地容纳的人类活动强度 (Bicknell et al, 1998; 朱泽生和孙玲, 2006; Yue et al, 2006), 该含义与生态容量、环境容量等一脉相承, 同属可持续发展范畴。目前, 生态承载力研究的热点问题处于对不同尺度不同领域的综合评价指标体系研究、评价方法和评价模型研究以及评价结果的具体应用阶段。因此, 从承载力及生态承载力概念的提出以及发展历程来看, 其理论系统和方法上已经发生了较为深刻的变化 (表 1), 从过去的单一认识和评论发展到今天全面认知和综合评价, 并且在社会、经济、人口、环境保护和生态治理等诸多领域得到了较为广泛的应用。生态承载力概念的起源与演化是随着社会发展和人类进步而不断发展变化的, 也是人类改造和利用自然界的必然结果。

1.2 生态承载力的内涵

自生态承载力概念提出以来, 其内涵更多地表现为承载体与被承载者二者之间的平衡与协调关系及二者间的动态变化过程。随着人们对复合生态系统理论的认识和应用的加深, 生态承载力的相关评价工作也越来越注重综合承载力的评价, 并将人类活动对承载力的影响纳入评价体系中, 这也体现了复合生态承载力越来越受到学者的认同 (Seidl et al, 1999)。目前, 生态承载力被广泛认为是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 (郭秀锐等, 2000)。生态承载力的研究对象、研究内容和主要对象之间的关系已经基本理顺 (王书华等, 2001)。其中, 资源承载力是基础条件, 环境承载力是约束条件, 生态弹性力是支持条件 (向芸芸和蒙吉军, 2012)。此外, 生态承载力还具有较为明确的空间尺度性, 不同尺度对生态承载力机制和发展变化的影响不同, 并体现为生态系统结构和过程的空间差异性 (王旭光等, 2001)。

总体来看, 目前关于生态承载力的内涵包括 3 个方面: (1) 主要以资源、环境、社会经济、人类活动的复合生态系统为研究对象; (2) 从开始考虑自然系统自我调节与维持能力到综合考虑人类社会活动对系统的正负反馈综合效应的变化过程; (3) 空间尺度对生态承载力有显著影响, 不同的尺度对生态承载力的影响主要表现在生态系统结构和变化过程的空间差异性。

表 1 承载力概念研究的发展
Tab.1 Development of carrying capacity research

承载力类型 Types of carrying capacity	相关学科 Related disciplines	含义 Implications
种群承载力 Carrying capacity of biomes	生态学、生物学 Ecology, biology	一定范围内生态系统对其中的种群的可承载量 (Smaal et al, 1997)。 The capacity of the ecosystem to the biomes within a certain range (Smaal et al, 1997).
草地承载力 Carrying capacity of grassland	生态学、地理学 Ecology, geography	特定范围内草场可供放养的载畜量 (刘东霞等, 2007)。 The grazing capacity of the grassland within a certain range (Liu et al, 2007).
土地承载力 Carrying capacity of land	人口学、土地资源管理 Demography, land resources management	一定条件下区域土地资源的生产力以及可承载的人口数量 (UNESCO and FAO, 1985; 陈百明, 1991)。 The productivity of the land resources and capacity to populations within a certain region (UNESCO and FAO, 1985; Chen, 1991).
水资源承载力 Carrying capacity of water resources	水资源学、生态学 Science of water resources, Ecology	一定范围内水资源量可供养活的人口数和农业生产强度 (方创琳等, 1999; 姚治君等, 2002; 杨志峰等, 2005)。 The capacity of the water resources to the populations and density of agricultural productivity within a certain range (Fang et al, 1999; Yao et al, 2002; Yang et al, 2005).
环境承载力 Carrying capacity of environment	生态学、地理学、环境科学 Ecology, biology, environmental science	环境对污染物的容纳能力以及对人类开发强度的支持能力 (高吉喜, 2001)。 The capacity of the environment for pollution and intensity of human development (Gao et al, 2001).
资源承载力 Carrying capacity of resources	资源学、地理学、生态学 Resource science, geography, ecology	资源的数量和质量对该空间内人口的基本生存和发展的支撑能力 (高吉喜, 2001)。 The ability of resources to support the basic survival and development of the population in quantity and quality (Gao et al, 2001).
资源环境承载力 Carrying capacity of environmental resources	生态学、地理学、环境科学、资源学 Ecology, geography, environmental science, resource science	一定地域内生态系统的服务功能及可以承载的最大资源开发强度与环境污染排放量 (高吉喜, 2001)。 The service function of ecosystem and the capacity to maximum developmental intensity and environmental pollution discharge in a certain region (Gao et al, 2001).
生态承载力 Ecological carrying capacity	资源学、地理学、生态学 Resource science, geography, ecology	生态系统的自我维持、自我调节能力, 资源与环境对社会经济活动强度的支撑能力及可承载的具有一定生活水平的人口数量 (王宁等, 2004)。 The self-sustainability and self-regulated ability of the ecosystem, the ability of resources and environment to support scio-economic development, and the capacity to populations (Wang et al, 2004).

2 生态承载力研究方法

对于生态承载力的量化, 国内外提出了许多简单直观、易于理解、易于操作的思路和方法。本文依据目前生态承载力评价思路的不同将生态承载力评价方法分为三类: (1) 指标体系综合评价法; (2) 产品周期综合评价法; (3) 结合不同学科和不同方法的综合评价法。

2.1 基于各种指标体系的综合评价方法

2.1.1 综合评价指标体系 (comprehensive evaluation index system)

随着经济的快速发展和城市化进程的加快, 人地之间的联系也日益密切, 人与环境之间的各种

矛盾也日益增多, 因此, 构建一个持续发展核心指标体系框架去评价生态承载力已被认可, 且得到了广泛应用 (顾康康, 2012)。该评价体系是在“经济、社会、环境和机构”4大系统的概念模型和“压力—状态—响应”概念体系基础上发展的 (吕贻峰等, 1999; 余敬和姚书振, 2002)。该评价指标体系中, 压力指标用来表示人类的一些不合理行为造成区域发展不协调、不可持续发展; 状态指标则指区域在一定时间段内影响4大系统的各子要素的现实情况; 响应指标指人类为提高区域人地系统的可持续发展能力而采取的对策和措施等 (顾康康, 2012)。该评价体系从驱动力、状态以及响应三大方面入手, 构建了共有

132个不同类别的具体指标,其中驱动力类、状态类以及响应类指标分别为42个、53个和37个。该套指标体系为开展各种生态承载力的研究提供了清晰而明确的思路和方法,是至今应用最广泛、认同感最高和传播速度最快的评价指标体系,得到了各领域专家学者的广泛好评(唐剑武等,1998),但其也有明显的短板,包括指标体系过于庞大,所需数据量较大,在一些统计工作开展并不充分的国家和地区,其获取有效数据存在困难,且该指标体系由于数据获取而受行政区划影响较大,在一些区域无法打破行政界线的限制,其结果可靠性存在不足。

2.1.2 生态足迹模型(ecological footprint model)

生态足迹模型是加拿大学者Rees(1992)提出的一种定量测度区域可持续发展状态的新理论和新方法,即依据人类对土地的连续依赖性,估算该区域的人口对各类土地资源消耗的总和,并与该区域的生物生产性土地资源的承载力进行比较,得出该区域的生态盈余/赤字情况,为生态补偿和转移支付政策的实施提供一定的参考,生态足迹理论和方法的研究已经成为国内外研究的热点。从研究区域来看,主要集中体现在单个省市、区域以及国家层面的研究(张志强等,2003;Wackernagel et al, 2004;张爱菊等,2013);从理论方法上来看,一些学者从不同角度改进和发展了具有代表性的模型,如基于产量因子的选择的生态足迹模型(马明德等,2014)、生态足迹模型的修正(周涛等,2015)以及其他模型的耦合应用等(朱新玲和黎鹏,2015);从应用领域来看,涉及交通、能源、森林以及区域生态安全与评价等方面(张佳琦等,2015;江平等,2015)。生态足迹模型的数据获取方式有多种,包括调查问卷、查阅统计资料、国土资源调查以及遥感等方式获得。生态足迹法由于其理论方法来源于实际调查或统计数据,且具有明确的理论基础,数据源易获取、理论基础明确,计算过程相对简单,结果易验证,因此该理论提出后很快应用于世界各地可持续发展问题研究中(Feng et al, 2008)。但同时,生态足迹法只基于现状数据进行评价,评价结果只反映区域的现状,而不能对未来情景进行模拟和预测。此外,对生态生产性土地进行生物生产转化时其转换因子只考虑生物物理因素,无法全面考虑与人

类技术进步、社会全面发展等方面的影响。尽管如此,生态足迹法模型将仍然发挥它的重要作用,并将不断发展完善,为人类可持续发展评价做出贡献。

2.1.3 状态空间法(state space model)

状态空间是欧氏几何空间用于定量描述系统状态的一种有效方法,它的主要数学基础是线性代数,通常由表示系统各要素状态微量的三维空间轴组成(黄宁生等,2000)。这种方法现在通常用于区域承载力的定量化研究(王宗明等,2004)。这种方法其基本原理是:将状态空间中所有的资源、环境和生态等构成的综合承载力作为点状要素,这些点构成了特定区域承载力的空间曲面,而低于此空间曲面的点表示在特定的资源环境和生态状况下,人类活动低于该承载力,反之则认为人类经济和社会活动已经超出了区域承载能力(顾康康,2012)。利用这一原理,众多学者对不同区域和不同人类活动方式下的综合承载力进行了有效评价,刘少华(2018)利用该方法评价了宁夏回族自治区的综合生态生产力,得到了较好的结果;罗斯丹等(2018)利用状态空间法研究了山东省金融发展状况以及对当地扶贫开发工作的推动力,能够指导省级区划内的经济发展及扶贫工作。熊建新等(2012)利用该方法对洞庭湖区生态承载力进行了综合评价,徐扬等(2018)利用该方法分析评价了山东半岛的旅游综合承载力。由此可见,该方法在不同尺度、不同区域和不同领域的应用也十分广泛。但该方法同样有不足之处,该方法由体现不同状态承载力能力的分指标构成,最终结果能评价出其承载力空间点高于或低于综合生态承载力空间点的情况,而无法得到具体的生态承载力大小。

2.1.4 供需平衡法(balance of supply and demand method)

承载力的根本问题在于一定时期内一定区域的资源环境系统对当地社会经济满足程度(王中根,1999)。从基本原理来讲,可以用资源供应量与资源需求量之间的差值表达某地区的承载能力情况,此方法在研究生态承载力和具体的生态承载力时同样适用,根据这种方法可以将生态承载力的指标体系分为2大类,生态环境类和社会经济系统类,生态环境类指标的计算可用生态环境质量综合评价方法计算,而社会经济类

指标的计算可用 GDP、固定资产投资额、工农业及服务业产值等指标计算。目前,采用供需平衡法计算时仍然采用简单实用的传统计算方法,在思路方法上缺乏创新,且需要确定不同指标体系的权重,存在较强的主观性,此外按照此方法提供的思路,社会经济类指标的选取过于简单,且对人类消费情况没有过多体现,不足以体现人类活动以及生活质量、社会进步对区域生态承载力的影响。

2.2 产品周期综合评价法

2.2.1 能值理论方法 (emergy theory method)

能值理论是美国著名生态学家 H. T. Odum 综合生态系统、经济学原理而创立的一种新的研究方法,把各种形式的能量统一转化为太阳能(焦耳)来表征不同系统中潜在的能量和效率。通过将系统中不同类、不同度量单位转化为同一标准的能值来衡量和分析,从而评价其在系统中的作用和功能(王玉平, 1998)。能值分析以同一种能量类别单位—太阳能值来分析生态系统中不同的能量流和物质流,通过一系列能值指标来反映系统结构特征和效率(李晓文等, 2001)。能值理论的提出解决了不同领域、不同专业和不同层次中对价值和能量进行度量量的问题,在经济学领域、生态学领域和能源领域进行了广泛应用。在生态承载力领域,由于能值理论能够将表征承载力的各个方面以统一的度量标准定量计算出结果,因而应用也较为广泛(杨贤智等, 1990; 王中根和夏军, 1999; 王宁等, 2004)。当然,该理论也有它自身的不足,主要有 3 点:(1) 太阳能值和转换率受不同产品、不同生态类型和效率变化的影响,其值也不断地发生变化;(2) 较难以提出系统可持续性的阈值,目前只是在不同空间尺度上进行横向比较及不同时期尺度上进行纵向比较,进而判断生态系统可持续性发展程度(Haberl et al, 2004);(3) 无法判断所研究区域的资源是否属于可再生和非可再生资源(冯霄等, 2005)。

2.2.2 生命周期方法 (life cycle method)

生命周期理论的应用十分广泛,事物从产生到消亡的过程可看作一个生命周期,该理论方法在政治、经济、环境、生命等领域均有应用,在资源环境领域,生命周期评价指对特定区域的生态系统从物质和能量的产生、加工、运输到消耗、后期处置、环境改善等过程的评价(王家骥等,

2000)。值得注意的是,生命周期在生态承载力评价方面得到了广泛应用。Piccinno et al (2018) 利用该理论建立了基于光伏发电系统的经济环境评价模型,将光伏发电的全过程与经济环境承载能力结合起来,从定量评估结果出发,给出了光伏系统最优实施策略;肖汉雄等(2018)对生命周期在资源环境领域的具体应用进行了总结,得出了未来该模型改进和优化的方向,为该模型在生态承载力领域的应用提供了参考,又将该模型应用于环境影响评价当中,并从生态环境承载力研究角度出发,指出该模型的应用构架,丰富和深化了现有被应用的模型。生命周期理论是评价生态承载力的有效工具,可以评估生态系统对影响其平衡、稳定和协调发展的能力,但同时该模型需要在自然条件、生态系统综合和一定人口及经济规模下的载负能力进行评估,同时该模型是对自然条件和一定规模社会经济条件下生态系统的综合载负能力的评估。

2.3 结合不同学科和不同方法的综合评价法

2.3.1 自然植被净第一性生产力评价法 (net primary productivity of natural vegetation, NPP)

自然植被净第一性生产力作为表征植物活动的关键变量,是陆地生态系统中表征物质流、能量流和生态信息流的主要手段,NPP 反映了生态系统自我生产、消费、调节的能力,是生态系统健康与自我恢复能力监测的重要手段(Field et al, 1998),该方法的应用为资源开发利用和生态恢复提供了科学依据。关于 NPP 的研究在国外已有很久的历史,Lieth et al (1975) 首先开始对 NPP 的模型进行研究,初次提出了生态生产力的概念;后来,Bakshi et al (2000) 对 NPP 进行了深入研究,建立不同的计算模型,为后来应用定量模型评价奠定了基础;国内学者也对 NPP 进行了大量研究,产生了许多有影响的成果(孙善磊等, 2010; 王钊和李登科, 2018; 张猛和曾永年, 2018)。目前关于 NPP 的模型可分为四类:基于气候统计模型、基于生物响应过程模型、基于光能利用率模型和基于生态遥感模型。基于气候统计模型是根据样区或定点观测结果与影响植被生产力的气候因子(如气温、降水、蒸散发等)之间建立简单的回归模型,进而估算区域的植被生产力。这种模型的特点是考虑的参数较少,也不必考虑复杂的环境因子和植被生物

物理过程,数据获取也较为容易,因此该模型在不同区域的应用较为普遍,较为典型的模型包括Miami模型、Chikugo(筑后)模型、Thornthwaite Memorial(桑斯维特纪念模型)模型等(Leith and Witteraker, 1975; Uchijima and Seino, 1985);生理生态过程模型是通过对植物光合作用、有机物分解及营养元素的循环过程的模拟得到,该过程的模拟有较强的机理性和系统性,也是大多学者认可的较为可靠的NPP估算模型,目前模型主要包括BEPS模型、CENTURY模型(Parton et al, 1993; Feng and Zhao, 2011)和BIOME-BGC模型(Running and Hunt, 1993)等;光能利用率模型估算NPP是近年来较为流行的模型,该模型以植物光合作用和光能利用率为基础建立的评估模型,是以植被累积生物量与太阳入射辐射被植物冠层吸收、能量转化为基本原理,目前所用模型大多以植被总初级生产力(GPP)与光合有效辐射之间的关系为纽带来研究NPP的估算。生态遥感模型也是目前生态领域开展NPP估算工作的重点之一,由于遥感数据的多源和大面积同步观测特性,使得该模型可以对较大尺度的生态系统格局和过程进行模拟,目前该模型已经被广泛应用,包括CASA模型(Potter et al, 1993)、EC-LUE(Yuan et al, 2007)模型和VPM(Xiao et al, 2004)模型等。

尽管众多学者发展了一系列NPP估算模型,但这些模型的估算结果只是在生产力角度对生态承载力进行评价,不能反映生态环境的变化以及人类各种社会经济活动对生态的影响。

2.3.2 系统动力学方法(system dynamics, SD)

系统动力学最早出现于1956年,由美国麻省理工学院(MIT)的福瑞斯特(J. W. Forrester)教授首创,是专门研究系统问题和系统科学的综合学科,由于该方法集成了控制论、信息论、系统论的思想,因此在研究事物内部要素组成及其发展变化时是经常用到的方法(贾立斌等, 2018)。系统动力学模型的理论基础是时滞微分方程,通过该方程反映系统各个模块变量之间的回馈关系,从而进行系统仿真模拟(高伟等, 2018)。在对生态承载力进行评价时,可用系统动力学模型对表征生态承载力的各决策变量进行预测,然后将各预测的指标纳入到综合承载力的计算中,最后得到相应的承载力评价结果及最佳的优选方案。因此应用系统动力学方法进行生态承载力研究时

需要对各指标进行预测和模拟,所以对指标的选择、指标的预测模拟等提出了较高要求,如果各参变量出现误差或错误,则会导致最终结果的不合理。因此系统动力学方法适用于中短期发展变化问题的模拟预测(王西琴等, 2014)。

2.3.3 “3S技术”综合分析方法

对于生态承载力的研究,由早先的经典统计模型到当前的过程模型、时空一体化模型的综合应用,经历了不断变化、不断深入的过程(张猛等, 2014)。近年来,随着遥感(RS)技术、地理信息技术(GIS)和全球定位技术(GPS)的快速发展,高光谱和多时相遥感影像数据为生态承载力监测提供了非常丰富和多元化的信息,并通过不间断的常态化监测,可及时了解掌握关于生态承载力的最新发展变化,为区域生态恢复和治理提供科学参考;而GIS技术在生态承载力领域的应用,使得关于生态承载力监测的综合数据库建立成为可能,并在生态监测评价中提供数据共享、多源数据协同分析、时空数据综合叠置分析等诸多作用。利用RS和GIS技术可对区域环境开发、区域资源环境变化、人类活动对生态承载力的影响、过去,现在和未来区域生态承载力发展变化等进行常态化监测评价。特别是随着我国对生态环境的重视和生态文明建设的推进,我国学者利用RS和GIS对不同区域生态承载力进行了大量研究(唐怡等, 2014; 苏岫等, 2018; 孙金辉等, 2018),许多研究成果已经在部门规划、生态治理中得到了应用,已成为相关部门进行生态建设的重要参考。

3 生态承载力研究存在的问题

综上所述,目前已在方法上对生态承载力的研究取得了丰硕成果,且对各承载力之间的相互关系有了清晰的认识,其研究方法已从定性描述发展到定量分析和机理研究阶段,越来越趋近于承载力问题的科学本质(Du et al, 2018)。生态承载力与资源环境承载力、生产承载力、生活承载力等相比有各自不同特点(杨阳等, 2018),生态承载力作为综合性生态单元,对区域初级生产力、生态系统服务功能和区域资源环境可持续发展能力产生一定的影响。但现阶段研究还存在以下几个方面的不足:(1)缺乏科学完整的研究体系。近年来,关于生态承载力的研究尽管在理论上已明确了研究的对象和问题,但研究精度还需深入。当前主要从社会经济、资源环境、生态

系统等子系统入手,但对复合系统中各子系统间的关联考虑较少;(2)目前尚未构建起普适性、广泛认可性的生态承载力评价指标体系。由于地域区位、自然环境、人文风情等差异,使得同一模型对指标体系需求和所得结果不同,因此需要深入探索各种模型之间的兼容性和普适性,同一区域不同模型所计算结果的差异性更应引起关注;

(3)生态承载力演化趋势与模拟预测研究不足。生态承载力是生态系统健康状况、恢复状况和承载对象压力的综合体现,既与生态系统演替紧密相关,又与系统内部之间的相互反馈机制相关。目前关于生态承载力研究虽有长时间序列的动态演变研究,但都是对过去和当前的承载力的对比分析,没有实现对未来发展趋势的情景模拟和预测,因此其缺乏一定的现实意义。(4)生态承载力尺度问题与格局分异研究较少。在全球变化大背景下,生态承载力研究必须和空间尺度结合起来才具现实意义,一般情况下,大尺度研究生态承载力科学问题,小尺度开展机制机理和科学问题验证研究,最终实现以可持续发展为目标的承载力研究,为一系列的决策科学提供依据(Du et al., 2018)。

4 生态承载力未来的研究方向

随着社会进步和生产力进一步发展,生态环境问题也呈现多样化、复杂化的特点,生态保护也日渐成为全社会的共识,因此,相关生态评价也逐渐成为生态学、地理学、环境学、经济学等领域学者的研究重点,作为生态学领域非常重要的课题之一,生态承载力研究必将成为热点和前沿阵地。从目前发展趋势来看,未来关于生态承载力研究将重点围绕以下几个方面展开:

(1)不同生态承载力模型的集成研究。由于生态承载力问题十分复杂,涉及资源、环境、生态、社会、经济等诸多要素,因此需要综合各个要素之间的相互关系及影响机制,进行不同模型集成和综合研究。当前,国内外关于生态承载力的评价模型已取得一系列成果,但从整体来看,很多模型仅从某一个领域、某一个视角、某一个区域开展研究,而集成不同学科特点和更加普适性的模型较少,因此未来在此领域开展研究工作是十分必要的。

(2)研究构建系统评价指标体系。从目前生态承载力的评价指标体系来看,主要包括人口、

经济、资源、环境、生态 5 大类指标,未来应从主动因子、被动因子,动态因子和静态因子出发,构建综合性强,较为普适的评价体系。

(3)加强生态承载力的动态模拟研究。生态承载力问题随着时间和空间变化,其现状格局和空间分布特征也随之发生变化。监测这种变化过程,对于生态治理、生态修复等工作显得尤为重要。由于生态承载力的变化机制和动因受多种因素综合影响,因此,未来应着重对生态承载力的动态变化内在机制进行探索和研究。

(4)研究不同尺度下生态承载力时空变化特征及空间分异。生态承载力供给与自然资源禀赋、土地资源格局等密切相关,具有明确的空间分异特性(向芸芸和蒙古军, 2012)。因此,要求未来对生态承载力的研究要在宏观上和微观上综合入手,既要满足大尺度复杂系统的建模要求,又要在微观上对生态系统的格局和机理进行探索,最终为区域经济社会的可持续发展提供决策依据。

5 结论

生态承载力理论与方法研究对于促进经济社会可持续发展意义重大,生态系统承载能力的不断提高是实现可持续发展的必要条件。从全文分析可以看出:(1)关于生态承载力的概念、内涵和不同承载力之间的关系目前已基本理清,承载力研究已经进入一个全新的发展阶段,不同领域不同学科的交叉和综合研究越来越多;(2)关于生态承载力的研究方法目前主要包括指标体系综合评价法、产品周期综合评价法和综合评价法三大类,每一类均包含多种方法或模型;(3)生态承载力研究经历了由少到多,再到稳定发展的过程,且研究的领域和范围日益广泛,其成果也得到了实际应用;(4)生态承载力的研究还有诸多不足,未来关于生态承载力的研究任重而道远。

参考文献

- 陈百明. 1991. “中国土地资源生产能力及人口承载力”项目研究方法概论[J]. *自然资源学报*, 6(3): 197–205.
- [Chen B M. 1991. An outline of the research method of the project “The productivity and population carrying capacity of the land resource in China” [J]. *Journal of Natural Resources*, 6(3): 197–205.]
- 方创琳, 余丹林. 1999. 区域可持续发展 SD 规划模型的试验优控——以干旱区柴达木盆地为例[J]. *生态学*

- 报, 19(6): 767–774. [Fang C L, Yu D L. 1999. Study on optimal control experiment of the resources development and corresponding development between economy and eco environment in the Qiadam Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 19(6): 767–774.]
- 冯 霄, 闵淑玲, 代玉利, 等. 2005. 多产品工业系统的能值分析 [J]. *过程工程学报*, 5(3): 317–321. [Feng X, Min S L, Dai Y L, et al. 2005. Emergy analysis of industrial multi-product systems [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 5(3): 317–321.]
- 高吉喜. 2001. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. [Gao J X. 2001. Theory explore of sustainable development—ecological carrying capacity theory, method and application [M]. Beijing: China Environment Science Press.]
- 高 伟, 刘 永, 和树庄. 2018. 基于 SD 模型的流域分质水资源承载力预警研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 54(3): 673–679. [Gao W, Liu Y, He S Z. 2018. A system dynamic forewarning model of watershed dual water resources carrying capacity [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 54(3): 673–679.]
- 顾康康. 2012. 生态承载力的概念及其研究方法 [J]. *生态环境学报*, 21(2): 389–396. [Gu K K. 2012. Concepts and assessment methods of ecological carrying capacity [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(2): 389–396.]
- 郭秀锐, 毛显强, 冉圣宏. 2000. 国内环境承载力研究进展 [J]. *中国人口·资源与环境*, 10(S1): 29–31. [Guo X R, Mao X Q, Ran S H. 2000. Research progress in environmental carrying capacity in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 10(S1): 29–31.]
- 黄宁生, 匡耀求. 2000. 广东相对资源承载力与可持续发展问题 [J]. *经济地理*, 20(2): 52–56. [Huang N S, Kuang Y Q. 2000. The carrying capacity of resources and the problems of sustainable development in Guangdong Province [J]. *Economic Geography*, 20(2): 52–56.]
- 贾立斌, 袁国华. 2018. 基于系统动力学的土地资源承载力评价与监测预警——以安徽省凤台县为例 [J]. *国土资源科技管理*, 35(1): 61–72. [Jia L B, Yuan G H. 2018. Carrying capacity assessment, monitoring and warning for land resources based on system dynamics: taking Fengtai County, Anhui Province as an example [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 35(1): 61–72.]
- 江平平, 陈银蓉, 张 苗. 2015. 低碳概念下武汉市生态足迹的动态分析与预测 [J]. *水土保持研究*, 22(1): 246–251. [Jiang P P, Chen Y R, Zhang M. 2015. Analysis and prediction of ecological footprint under the concept of low-carbon in Wuhan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 22(1): 246–251.]
- 李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 2001. 辽河三角洲滨海湿地景观规划各预案对指示物种生态承载力的影响 [J]. *生态学报*, 21(5): 709–715. [Li X W, Xiao D N, Hu Y M. 2001. The effects of different land-use scenarios on habitat carrying of indicator species in the Liaohe River Delta wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(5): 709–715.]
- 刘东霞, 张兵兵, 卢欣石. 2007. 草地生态承载力研究进展及展望 [J]. *中国草地学报*, 29(1): 91–97. [Liu D X, Zhang B B, Lu X S. 2007. Progress and prospect on ecological carrying capacity in grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 29(1): 91–97.]
- 刘少华. 2018. 基于状态空间模型的宁夏全要素生产率测算 [J]. *西部金融*, (3): 41–45. [Liu S H. 2018. The measurement of total factor productivity in Ningxia district by the state space model [J]. *West China Finance*, (3): 41–45.]
- 罗斯丹, 李恬悦, 陈 晓. 2018. 山东省普惠金融发展的减贫效应研究——基于状态空间模型的实证分析 [J]. *中国海洋大学学报 (社会科学版)*, (2): 66–73. [Luo S D, Li T Y, Chen X. 2018. The inclusive finance development in Shandong Province and its impact on poverty reduction based on state space model [J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, (2): 66–73.]
- 吕贻峰, 李江风, 周 伟, 等. 1999. 阳新县矿产资源现状优势评价及资源承载力分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 8(4): 386–390. [Lü Y F, Li J F, Zhou W, et al. 1999. Assessment on the superiority and bearing capacity of mineral resources in Yangxin County [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 8(4): 386–390.]
- 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 2014. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 [J]. *生态学报*, 34(3): 682–689. [Ma M D, Ma X J, Xie Y Z, et al. 2014. Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of Ningxia and influencing factors: partial least-squares regression (PLS) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(3): 682–689.]
- 孟爱云, 濮励杰. 2006. 城市生态系统承载能力初步研究——以江苏省吴江市为例 [J]. *自然资源学报*, 21(5): 768–774. [Meng A Y, Pu L J. 2006. A preliminary study on the evaluation of urban ecosystem carrying capacity—a case study from Wujiang City, Jiangsu Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 21(5): 768–774.]
- 苏 岫, 索安宁, 宋德瑞, 等. 2018. 基于遥感的长江经济带邻近海域滩涂生态承载力评估 [J]. *海洋环境科学*, 37(4): 528–536. [Su X, Suo A N, Song D R, et al. 2018.

- Ecological carrying capacity assessment of tidal flat in the Yangtze River Economic Belt by remote sensing [J]. *Marine Environmental Science*, 37(4): 528–536.]
- 孙金辉, 谢忠胜, 陈欢, 等. 2018. 基于层次分析法的北川县环境地质承载力评价 [J]. *水土保持通报*, 38(4): 125–128. [Sun J H, Xie Z S, Chen H, et al. 2018. Assessment of geological environment carrying capacity of Beichuan County based on AHP [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(4): 125–128.]
- 孙善磊, 周锁铨, 石建红, 等. 2010. 应用三种模型对浙江省植被净第一性生产力 (NPP) 的模拟与比较 [J]. *中国农业气象*, 31(2): 271–276, 309. [Sun S L, Zhou S Q, Shi J H, et al. 2010. Calculation and comparison of vegetation net primary productivity (NPP) in Zhejiang Province with three models [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 31(2): 271–276, 309.]
- 唐剑武, 叶文虎. 1998. 环境承载力的本质及其定量化初步研究 [J]. *中国环境科学*, 18(3): 227–230. [Tang J W, Ye W H. 1998. Study on environmental bearing capacity and its quantification [J]. *China Environmental Science*, 18(3): 227–230.]
- 唐怡, 韦仕川. 2018. 基于 GIS 和 PSR 模型的生态环境承载力时空差异研究——以海南省为例 [J]. *中国农学通报*, 34(11): 40–47. [Tang Y, Wei S C. 2018. Spatial-temporal difference of eco-environmental carrying capacity based on PSR model and GIS: a case study of Hainan Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 34(11): 40–47.]
- 王家骥, 姚小红, 李京荣, 等. 2000. 黑河流域生态承载力估测 [J]. *环境科学研究*, 13(2): 44–48. [Wang J J, Yao X H, Li J R, et al. 2000. Assessment for ecological carrying capacity of Heihe River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 13(2): 44–48.]
- 王宁, 刘平, 黄锡欢. 2004. 生态承载力研究进展 [J]. *中国农学通报*, 20(6): 278–281, 385. [Wang N, Liu P, Huang X H. 2004. Research progress in ecological carrying capacity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 20(6): 278–281, 385.]
- 王书华, 毛汉英. 2001. 土地综合承载力指标体系设计及评价——中国东部沿海地区案例研究 [J]. *自然资源学报*, 16(3): 248–254. [Wang S H, Mao H Y. 2001. Design and evaluation on the indicator system of land comprehensive carrying capacity [J]. *Journal of Natural Resources*, 16(3): 248–254.]
- 王西琴, 高伟, 曾勇. 2014. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证 [J]. *系统工程理论与实践*, 34(5): 1352–1360. [Wang X Q, Gao W, Zeng Y. 2014. Methods and case study on water ecological carrying capacity using SD model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 34(5): 1352–1360.]
- 王旭光, 高玉慧, 王英华, 等. 2001. 黑龙江省土地承载力与农业可持续发展 [J]. *国土与自然资源研究*, (2): 30–32. [Wang X G, Gao Y H, Wang Y H, et al. 2001. Land capacity and agricultural sustainable development in Heilongjiang Province [J]. *Territory & Natural Resources Study*, (2): 30–32.]
- 王玉平. 1998. 矿产资源人口承载力研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 8(3): 19–22. [Wang Y P. 1998. Population carrying capacity of mineral resources [J]. *China Population, Resources and Environment*, 8(3): 19–22.]
- 王钊, 李登科. 2018. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素 [J]. *应用生态学报*, 29(6): 1876–1884. [Wang Z, Li D K. 2018. Spatial-temporal distribution of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Shaanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(6): 1876–1884.]
- 王中根, 夏军. 1999. 区域生态环境承载力的量化方法研究 [J]. *长江职工大学学报*, 16(4): 9–12. [Wang Z G, Xia J. 1999. Quantitative analysis on bearing capacity of ecological environment [J]. *Journal of Changjiang Vocational University*, 16(4): 9–12.]
- 王宗明, 张柏, 何艳芬, 等. 2004. 吉林省相对资源承载力动态分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 18(2): 5–10. [Wang Z M, Zhang B, He Y F, et al. 2004. Analysis of dynamic changes of relative carrying capacity of resources in Jilin Province [J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 18(2): 5–10.]
- 向芸芸, 蒙古军. 2012. 生态承载力研究和应用进展 [J]. *生态学杂志*, 31(11): 2958–2965. [Xiang Y Y, Meng J J. 2012. Research and application advances in ecological carrying capacity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 31(11): 2958–2965.]
- 肖汉雄, 杨丹辉. 2018. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用 [J]. *城市与环境研究*, 5(1): 88–105. [Xiao H X, Yang D H. 2018. Methods and applications of environmental impact assessment based on product life cycle: A review [J]. *Urban and Environmental Studies*, 5(1): 88–105.]
- 熊建新, 陈端吕, 谢雪梅. 2012. 基于状态空间法的洞庭湖区生态承载力综合评价研究 [J]. *经济地理*, 32(11): 138–142. [Xiong J X, Chen D L, Xie X M. 2012.

- Comprehensive evaluation on ecological carrying capacity based on state-space techniques in Dongting Lake region [J]. *Economic Geography*, 32(11): 138–142.]
- 许联芳, 杨勋林, 王克林, 等. 2006. 生态承载力研究进展 [J]. *生态环境*, 15(5): 1111–1116. [Xu L F, Yang X L, Wang K L, et al. 2006. Research progress in ecological carrying capacity [J]. *Ecology and Environment*, 15(5): 1111–1116.]
- 徐 扬, 张兰新, 李念春. 2018. 基于状态空间法的旅游环境承载力评价分析——以山东半岛蓝色经济区五城市为例 [J]. *国土资源科技管理*, 35(2): 83–92. [Xu Y, Zhang L X, Li N C. 2018. Evaluation and analysis of tourism environmental carrying capacity based on state-space method: taking five cities in blue ocean economic zone of Shandong peninsula as an example [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 35(2): 83–92.]
- 杨贤智, 李景锟, 廖延梅. 1990. 环境管理学 [M]. 北京: 高等教育出版社: 150–155. [Yang X Z, Li J K, Liao Y M. 1990. Environmental management [M]. Beijing: Higher Education Press: 150–155.]
- 杨 阳, 朱元骏, 安韶山. 2018. 黄土高原生态水文过程研究进展 [J]. *生态学报*, 38(11): 4052–4063. [Yang Y, Zhu Y J, An S S. 2018. Review on ecohydrological processes in Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(11): 4052–4063.]
- 杨志峰, 隋 欣. 2005. 基于生态系统健康的生态承载力评价 [J]. *环境科学学报*, 25(5): 586–594. [Yang Z F, Sui X. 2005. Assessment of the ecological carrying capacity based on the ecosystem health [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(5): 586–594.]
- 姚治君, 王建华, 江 东, 等. 2002. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析 [J]. *水科学进展*, 13(1): 111–115. [Yao Z J, Wang J H, Jiang D, et al. 2002. Advances in study on regional water resources carrying capacity and research on its theory [J]. *Advances in Water Science*, 13(1): 111–115.]
- 余 敬, 姚书振. 2002. 矿产资源可持续力及其系统构建 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(1): 85–89. [Yu J, Yao S Z. 2002. Mineral resources sustainable power and system construction [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(1): 85–89.]
- 张爱菊, 张白汝, 向书坚. 2013. 中部6省生态足迹的测算与比较分析 [J]. *生态环境学报*, 22(4): 625–631. [Zhang A J, Zhang B R, Xiang S J. 2013. Calculation and analysis of ecological footprint based on six provinces of central China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(4): 625–631.]
- 张佳琦, 段玉山, 伍燕南. 2015. 基于生态足迹的苏州市可持续发展动态研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 24(2): 177–184. [Zhang J Q, Duan Y S, Wu Y N. 2015. Dynamic analysis of sustainable development in Suzhou on ecological footprint [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(2): 177–184.]
- 张 猛, 秦建新, 符 静. 2014. 基于RS与GIS的洞庭湖区生态承载力时空评价 [J]. *地理空间信息*, 12(6): 18–21. [Zhang M, Qin X J, Fu J. 2014. Spatio-temporal analysis of ecological capacity in Dongting Lake based on remote sensing and geographic information system [J]. *Geospatial Information*, 12(6): 18–21.]
- 张 猛, 曾永年. 2018. 融合高时空分辨率数据估算植被净初级生产力 [J]. *遥感学报*, 22(1): 143–152. [Zhang M, Zeng Y N. 2018. Net primary production estimation by using fusion remote sensing data with high spatial and temporal resolution [J]. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 143–152.]
- 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 2001. 中国西部12省(区、市)的生态足迹 [J]. *地理学报*, 56(5): 599–610. [Zhang Z Q, Xu Z M, Cheng G D, et al. 2001. The ecological footprints of the 12 provinces of west China in 1999 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 56(5): 599–610.]
- 周 涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 2015. 生态足迹的模型修正与方法改进 [J]. *生态学报*, 35(14): 4592–4603. [Zhou T, Wang Y P, Gong J Z, et al. 2015. Ecological footprint model modification and method improvement [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(14): 4592–4603.]
- 朱新玲, 黎 鹏. 2015. 基于BP神经网络的湖北省生态足迹拟合与预测研究 [J]. *武汉科技大学学报(社会科学版)*, 17(1): 77–80. [Zhu X L, Li P. 2015. Study on ecological footprint fitting and prediction in Hubei province based on BP neural network [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology (Social Science Edition)*, 17(1): 77–80.]
- 朱泽生, 孙 玲. 2006. 东台市滩涂生态系统服务价值研究 [J]. *应用生态学报*, 17(5): 878–882. [Zhu Z S, Sun L. 2006. Ecosystem services value of coastal tidal zone in Dongtai City of Jiangsu Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(5): 878–882.]
- Bakshi B R. 2000. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2/3/4/5/6/7): 1767–1773.

- Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, et al. 1998. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy [J]. *Ecological Economics*, 27(2): 149–160.
- Cohen J. 1995. Population growth and earth's human carrying capacity [J]. *Science*, 269(5222): 341–346.
- Du W P, Yan H M, Yang Y Z, et al. 2018. Evaluation methods and research trends for ecological carrying capacity [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 9(2): 115–124.
- Errington P L. 1934. Vulnerability of bob-white populations to predation [J]. *Ecology*, 15(2): 110–127.
- Feng L H, Zhang X C, Luo G Y. 2008. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(3): 269–278.
- Feng X M, Zhao Y S. 2011. Grazing intensity monitoring in Northern China steppe: Integrating CENTURY model and MODIS data [J]. *Ecological Indicators*, 11(1): 175–182.
- Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 281(5374): 237–240.
- Haberl H, Fischer-Kowalski M, Krausmann F, et al. 2004. Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer [J]. *Land Use Policy*, 21(3): 199–213.
- Hadwen I A S, Palmer L J. 1922. Reindeer in Alaska [M]. Washington, D. C.: U. S. Dept. of Agriculture.
- IUCN, UNEP, WWF. 1991. Caring for the Earth: a strategy for sustainable living [R]. Gland, Switzerland: IUCN.
- Lieth H, Whittaker R H. 1975. Primary productivity of the biosphere [M]. New York: Springer-Verlag.
- Meadows H, Meadows D L, Randers J, et al. 1972. The limits to growth: a report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind [M]. New York: Universe Books.
- Odum E P. 1953. Fundamentals of ecology [M]. Philadelphia: W. B. Saunders Company.
- Park R E, Burgess E W. 1921. Introduction to the Science of Sociology [M]. Chicago: University of Chicago Press.
- Piccinno F, Hischer R, Seeger S, et al. 2018. Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: Application of the life cycle assessment scale-up framework [J]. *Journal of Cleaner Production*, 174: 283–295.
- Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4): 811–841.
- Running S W, Hunt E R Jr. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models [M]// Ehleringer J R, Field C B. Scaling physiological processes. San Diego: Academic Press: 141–158.
- Rees W E. 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. *Environment and Urbanization*, 4(2): 120–130.
- Seidl I, Tisdell C A. 1999. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity [J]. *Ecological Economics*, 31(3): 395–408.
- Smaal A C, Prins T C, Dankers N, et al. 1997. Minimum requirements for modelling bivalve carrying capacity [J]. *Aquatic Ecology*, 31(4): 423–428.
- UNESCO, FAO. 1985. Carrying capacity assessment with a pilot study of Kenya: a resource accounting methodology for sustainable development [R]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Uchijima Z, Seino H. 1985. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations (1): Chikugo model for evaluating productivity [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 40(4): 343–352.
- Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, et al. 2004. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges [J]. *Land Use Policy*, 21(3): 271–278.
- World Commission on Environment and Development. 1987. Our common future [M]. England: Oxford University Press.
- Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B, et al. 2004. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 256–270.
- Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, et al. 2007. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3/4): 189–207.
- Yue D X, Xu X F, Li Z Z, et al. 2006. Spatiotemporal analysis of ecological footprint and biological capacity of Gansu, China 1991–2015: down from the environmental cliff [J]. *Ecological Economics*, 58(2): 393–406.