

李娟花 张惠远 郝海广 等. 环境承载力评价方法及其业务化应用: 进展与展望[J]. 环境工程技术学报 2020 ,10(1) : 142-149.

LI J H ZHANG H Y HAO H G ,et al. Evaluation methods of environmental carrying capacity and their operational applications: progress and prospect [J]. Journal of Environmental Engineering Technology 2020 ,10(1) : 142-149.

环境承载力评价方法及其业务化应用: 进展与展望

李娟花 张惠远* 郝海广 张哲
中国环境科学研究院

摘要 开展环境承载力评价,建立资源环境承载力监测预警机制,是当前我国推进生态文明建设和加强生态环境管理的重要任务。总结了当前国内外环境承载力评价的方法,包括指标体系评价法、系统模型法、环境容量法及供需平衡法等,比较了各方法的内涵、表征形式及优缺点;分析了环境承载力评价方法在业务化应用中存在的不足,即评价方法综合性不够,评价结果预测作用弱,区域开放性和尺度效应考虑不足,应用性不足等问题;着眼于环境承载力评价方法的业务化应用,提出今后应进一步在区域生态环境系统综合评价、差异化的指标体系构建、评价方法的标准化、评价结果的模拟预测功能实现4个方面开展研究。

关键词 环境承载力; 评价方法; 业务化应用; 生态环境管理

中图分类号: X24 文章编号: 1674-991X(2020)01-0142-08 doi: 10. 12153/j. issn. 1674-991X. 20190055

Evaluation methods of environmental carrying capacity and their operational applications: progress and prospect

LI Juanhua, ZHANG Huiyuan*, HAO Haiguang, ZHANG Zhe
Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract It is an important task for China to carry out the environmental carrying capacity evaluation (ECCE) and establish the monitoring and early warning mechanism of resources and environment carrying capacity in ecological civilization construction and ecological and environmental management. The current evaluation methods of ECCE at home and abroad were summarized, including index system evaluation method, system model method, environmental capacity method and supply and demand balance method, and the connotation, representation forms, advantages and disadvantages of each method were compared. The shortcomings of the evaluation method of environmental carrying capacity in the operational application were analyzed, such as the insufficient comprehensiveness of the evaluation method, the weak prediction effect of the evaluation result, the insufficient consideration of the regional openness and scale effect, and the insufficient application. Focusing on the operational application of ECCE method, it was suggested that further research should be carried out in four aspects, including comprehensive evaluation of regional ecological environment system, construction of differentiated index system, standardization of evaluation methods, and realization of simulation and prediction function of evaluation results.

Key words environmental carrying capacity; evaluation method; operational application; ecological and environmental management

资源环境承载力最早于18世纪提出,随着人类活动不断发展和范围扩大,承载力内涵经历了人口承载力、环境承载力或资源承载力到生态承载力的演进过程。环境承载力的发展过程为:1798年

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503504); 国家自然科学基金项目(41471092, 41501095)

作者简介: 李娟花(1990—),女,助理研究员,主要研究方向为生态环境评价,lijh@craes.org.cn

* 责任作者: 张惠远(1964—),男,研究员,博士,主要从事生态环境评价与管理研究,zhanghy@craes.org.cn

Malthus^[1] 提出资源影响着人口的增长; 1982 年联合国粮农组织以人口为限制因子, 对全球 5 个区域 117 个发展中国家的土地资源人口承载力进行了研究^[2]; 1985 年联合国教科文组织采用 ECCO (evolution of capital creation options) 模型对肯尼亚等发展中国家的资源环境承载力进行了评价^[3]; 1990 年 Sleeser^[4] 采用 ECCO 模型, 综合考虑人口-资源-环境-发展间的相互关系, 对环境承载力进行了评价。承载力概念于 20 世纪 80 年代引入我国, 早期开展了以土地-粮食-人口为核心的土地资源承载力研究^[5], 之后广泛开展了以土地、水资源等要素为代表的资源承载力研究和对大气、水、土壤环境等单要素的环境承载力研究。目前, 资源环境承载力已成为描述区域经济社会发展限制条件的重要指标和衡量区域可持续发展的判断依据^[6]。

环境承载力是一个涉及环境、经济、社会等诸多方面的综合性概念, 诸多学者主要从容量、阈值、能力等角度阐述其内涵, 目前还未形成共识。Khanna 等^[7] 指出, 环境承载力应包含 2 层意思, 即对资源开发的承载能力和对环境污染的消纳能力。Bishop 等^[8-10] 对环境承载力的内涵进行了界定, 认为环境承载力是自然环境系统在不遭受严重退化和在人类可接受的生活水平前提下, 环境对人口的容纳能力和所能承载的人类活动的强烈程度。多数学者认为, 环境承载力是指在一定生活水平和环境质量要求下, 在不超出生态系统弹性限度条件下, 环境子系统所能容纳的污染物数量及可支撑的经济规模与相应的人口数量^[11-12]。当前环境承载力研究主要集中在概念内涵、理论基础、指标体系等方面, 主要应用于国土功能区划、城镇化建设与布局、人口空间布局、灾后重建规划、旅游、海洋产业等领域^[12-13]。探索建立资源环境承载力监测预警机制已被纳入我国生态文明建设任务中, 中共中央办公厅、国务院办公厅出台了《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》(厅字〔2017〕25 号)^[14], 国家发展和改革委员会联合 12 部委印发了《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》^[15], 这意味着我国资源环境承载力研究已由理论转向实践, 环境承载力评价实现业务化应用的需求十分迫切。但目前环境承载力评价从科学研究转向业务化应用还存在差距, 需要辨识各种承载力评价的方法及其优缺点, 分析承载力在应用实践中面临的主要问题, 进而探索实操性、科学性以及指导性较强的承载力评价方法体系。笔者系统总结了环境承载力评价方法的研

究进展, 分析了当前环境承载力评价方法在业务化应用中的不足和需求, 提出了面向业务化应用的环境承载力评价研究趋势和研究思路, 以期对相关研究和技术标准制定提供参考, 为推进建立我国环境承载力监测预警机制提供借鉴。

1 环境承载力评价方法

随着概念和理论研究不断丰富, 环境承载力评价取得了大量成果, 形成了多样化的评价方法。早期环境承载力评价主要针对单一要素或多个要素建立指标体系, 结合统计学方法计算得到承载力指数^[16]。之后, 环境承载力关注的焦点由外在表象转向复合系统内部机制, 系统动力学模型等被引入环境承载力评价中^[17]。此外, 也有研究从资源环境要素的供需平衡及污染物容量的角度开展评价^[18]。环境承载力评价常见的方法可以归纳为指标体系评价法、系统模拟法、供需平衡法和环境容量法 4 个类别。

1.1 指标体系评价法

指标体系评价法是从资源、环境、生态以及社会经济等层面, 选取区域关键要素建立指标体系, 对区域环境承载力进行评价, 评价结果一般为环境承载力综合指数。在具体评价过程采用相关统计学方法, 主要包括矢量模法、模糊评价法、层次分析法、主成分分析法等。根据评价所关注的环境要素数量, 可分为单要素评价和多要素评价。

单要素评价最初集中于探讨基于人粮关系的土地承载力研究^[19], 随着人类社会经济的发展, 资源耗竭和环境污染等问题相继出现, 单要素评价的研究对象逐渐扩展到水环境、大气环境、水资源和地质等诸多方面^[20-23]。有研究分别计算大气、水、生态环境等单要素承载力指数, 再结合权重将各分指数叠加得到资源环境综合承载力^[24-25], 或者根据短板效应理论, 选取水资源、土地资源、能源、水环境容量和大气环境容量等单要素评价结果的最小值作为承载力约束下的人口规模阈值^[26], 其研究本质上仍属于单要素评价。

由于资源环境问题的相互影响和累积作用, 单要素评价难以解决区域发展所面临的复杂环境问题, 针对区域多要素综合承载力的评价逐渐成为承载力研究的重要方向^[6]。一些研究基于“压力-状态-响应”、“压力-支撑力”以及“发展因子-限制因子”等模型, 从经济、社会、资源和环境方面分别选取指标, 构建环境承载力评价指标体系, 对区域承载

力进行了综合评价^[13 27-28]。如徐志青等^[29]从社会经济、水生态环境、水资源 3 个子系统选取了 19 项指标构成水环境承载力评价指标体系,评价珠江三角洲的水环境承载力。

指标体系评价法在承载力评价中最为常见,该方法能够综合反映区域承载状况,适用于区域承载力的宏观评价。但由于指标选取缺乏统一标准,评价结果可比性较差,对区域发展的指导性较弱。其中,单要素评价虽然针对性较强,但对区域整体性和系统性把握不足,较适用于工业园区等小尺度下的承载力评价;多要素综合评价能够反映区域综合承载状况,适用于区域发展现状的宏观评价,但评价结果针对性较差,难以指导具体区域产业布局。

1.2 系统模拟法

系统模拟法通过分析区域复合系统内资源、环境、生态以及社会经济等要素耦合机制,建立仿真模型模拟复合系统的运行过程,借助模型的输入、输出参数,分析不同方案下区域可承载的经济规模和人口数量,从而完成对区域承载力的评价和预测。系统模拟法采用的模型方法主要包括系统动力学模型法和以不确定性多目标模型为代表的优化模型法^[30]。

系统动力学模型法通过一阶微分方程组反映系统内各变量间的因果反馈关系,进行动力学仿真,并结合指数评价法得出区域环境承载力评价结果;优化模型法通过建立目标函数模拟区域复合系统,根据区域实际确定相应的约束条件,随后进行优化求解对区域承载力进行评价,其中以不确定性多目标模型法应用最广^[31-32]。

系统模拟法以复合系统内部要素间的信息反馈为基础,有利于处理复杂多变的非线性过程,评价结果具备优化和预测功能,适用于区域发展目标的制定。但模型构建及计算过程复杂,参变量难以科学率定,目前还较难全面应用于业务化管理。

1.3 供需平衡法

供需平衡法通过对比分析资源、环境及生态等承载主体和承载对象之间的供需关系来反映区域承载力的大小。该方法试图从区域能量流动和物质循环过程着手,将能量或其他某一类物质作为衡量区域承载能力的媒介,进而对区域资源环境承载力进行评价。具体方法主要包括自然植被净第一性生产力法、能值分析法、生态足迹法以及减量对比法等^[33]。

有的学者认为,植被净第一性生产力能准确反映

自然生态系统的生产能力和恢复能力,是评价自然生态系统承载力的重要指示指标^[34]。能值分析法和生态足迹法将人类对自然界的需求和占用转化为统一的物质能量量纲,进而对复合系统环境承载力进行整体评价^[35-38]。减量对比法主要是将环境污染的现状和环境质量标准要求进行对比,建立基于环境标准的环境承载力评价模型,进而评价区域、流域环境承载力^[39]。

供需平衡法从供给和需求 2 个层面开展承载力评价,得出具有统一量纲的环境承载力结果,可直观地反映区域复合系统的承载力大小,适用于单一要素评价及承载主体与承载对象间能量流动机制的探讨。但这种方法对复合系统结构和要素间相互作用机制考虑不足,评价结果与实际承载力大小可能存在一定偏差。

1.4 环境容量法

环境容量法根据环境质量要求和监测断面(点位)分布等因素,将评价区域划分为不同控制单元,运用环境容量模型分别计算各控制单元所能承载的污染物阈值,进而得到区域所能承载的污染物总量^[40]。根据环境要素和污染物的不同,环境容量法主要包括水环境容量法及大气环境容量法。

经过 30 多年的研究和实践,水环境容量核算方法体系已较为完善,《全国水环境容量核定技术指南》^[41]提出了零维、一维、感潮河段一维和二维、湖库等适用于不同条件的水质模型,能够适应不同水文状况下的污染物容量核算。张玉珍等^[42]根据九龙江特殊的水流特性和多年的水质监测结果,依据湖库化河段判定标准,采用河流一维容量模型和水库水环境容量计算方法,确定了不同河段的水环境容量;王玉敏等^[43]运用湖泊二维水质模型,将新疆博斯腾湖划分成网格,计算了水质目标下各污染物的水环境容量,为博斯腾湖流域水污染防治提供了技术依据;彭嘉玉等^[44]在不同设计水文条件下,建立了铁岭流域稳态水质模型,计算了铁岭控制单元的水环境容量。大气环境容量核算方法主要包括 A-P 值法、模拟法及线性规划法等^[45-46]。

环境容量法能直观地反映区域对污染物的容纳能力,对区域污染物总量控制和产业环境准入具有重要指导意义。但该方法计算量大,参变量难以准确率定,且环境容量计算模型忽略了资源数量和质量以及社会经济发展等因素的影响,仅靠污染物排放阈值难以综合反映区域承载状况。

4 种环境承载力评价方法对比见表 1。

表 1 环境承载力评价方法对比

Table1 Comparison of the evaluation methods of environmental carrying capacity

类别	方法	内涵	表征形式	优点	局限性
指标体系评价法	矢量模法	将各要素看作多维空间中的矢量,求得各矢量相加后的模即为相应状态下的环境承载力指数	环境承载力综合指数	结果客观合理,便于进行横向、纵向对比,能实现承载力的分层综合评估	确定指标权重时受主观因素影响较多,使计算结果产生偏差
	模糊评价法	借助综合评判矩阵进行多因素评价,利用合成运算得出评价对象相对于各评价等级的隶属度,再利用取大或取小运算确定评价对象的评语	环境承载力综合指数	能处理模糊的评价对象,一定程度上降低评价过程的主观影响	评价因素越多,模型运算过程遗失的信息越多,降低了评价的准确性
	层次分析法	将指标体系分级为若干层次,通过同层指标间重要程度的对比确定指标权重,逐层求和得到承载力指数	环境承载力综合指数	层次分明,评价结果科学、客观	因素较多时易造成计算混乱,确定指标权重时主观性较强
	主成分分析法	将多指标简化为几个相互独立且包含原指标大部分信息的综合指标的多元统计方法	环境承载力综合指数	消除了指标间的相关性带来的信息重叠	需借助专业软件进行较复杂运算,且主观性较强
	熵值法	在区域各因素提供信息量的基础上,客观对各指标赋权重,计算出反应区域承载力的综合指数	环境承载力综合指数	计算简便,结果较客观,克服了指标间的信息重叠	权重的确定过分依赖数据,缺乏各指标间的横向比较,所需样本数量多
系统模拟法	系统动力学模型法	根据系统内部组成要素互为因果的反馈特点,从系统内部结构寻找问题的根源及要素变动过程中系统整体的回馈	最佳发展方案及人口、GDP等承载力	在处理复杂、非线性和反馈问题上具有一定的优势,评价结果准确可靠	模型计算复杂,参变量难以科学率定,对系统长期发展的模拟欠佳
	优化模型法	通过建立目标函数对承载对象进行详细界定,结合系统优化结果对区域承载力进行评价和优化	环境承载力指数	能处理非线性、动态、不确定性、多目标等复杂问题,计算结果较为稳健	优化目标等因素的确定受主观影响较大,模型求解复杂
供需平衡法	自然植被净第一性生产力法	分析自然植被的净第一性生产力数据和背景值,研究确定区域生态承载力	有机物产量	计算简便,能科学反映自然生态系统生产和恢复能力	仅考虑了自然生态要素,未考虑生态系统与人类间的关系,难以综合反映区域承载状况
	生态足迹法	各种资源和能源消费被折算为耕地、林地、建筑用地、化石能源土地等生物生产面积类型,由此核算区域环境承载力	土地面积	方法相对成熟和稳健,结果直观且易于理解	涉及大量生产力转换参数,不同区域应用时面临本土化参数缺少问题和不同生产性土地功能替代性的假设问题
	能值分析法	把各种形式的能量转化为可以统一度量的价值标准——能值,对区域承载力进行统一量纲下的核算	土地面积	以能值为基础统一指标量纲,提高了承载力评价的可行性	能值转换系数难以体现系统的复杂非线性特征,对区域性、动态性考虑不足
	差量对比法	根据区域生态环境质量和人类所需求的生态环境质量之间的差量来衡量区域的承载力	无量纲化指数	评价结果准确可靠,方法简便易行	忽略了要素间的相互影响及社会经济等因素对承载力的影响,评价结果对区域的指导较为宏观
环境容量法	大气环境容量法	核算区域对 SO ₂ 、NO _x 等大气污染物的纳污能力	大气污染物排放限值	可计算不同尺度区域大气承载力限值	模型计算较为复杂,且仅考虑区域整体污染物排放上限,未考虑子区域的相互影响
	水环境容量法	核算水体对 N、P、COD 等水环境污染物的纳污能力	水污染物排放限值	有针对不同水文特点的计算方法,计算结果准确客观	以固定的水环境容量阈值来限定污染物入河量,难以反映水环境容量动态变化特性

2 业务化应用中的不足

环境承载力是制定区域发展规划和实施生态环境管理的重要依据,形成一套既科学合理又便于操作的环境承载力评价技术方法是当前科学界的迫切任务。但目前,环境承载力评价方法距离业务化应用尚有较大差距。

2.1 评价方法的综合性不够

环境承载力涉及资源、环境、社会、经济等诸多方面,各要素相互促进、相互制约,共同构成复杂系统,需要把它们结合起来视为一个系统,从宏观、综合的角度去评价区域的环境承载力,继而反映区域整体特征。但大多数对区域环境承载力的评价还停留在不同生态系统和水、大气环境等单要素承载力或是简单复合层面,而着眼于环境承载力综合评价的研究工作还不多,环境承载力综合评价尚没有统一的方法体系,缺乏一致的综合指标体系和评价模型^[47-48]。因此,从承载力本身的系统论和整体论出发,综合考虑资源、环境、社会、经济等诸多要素,对区域环境承载力进行综合研究变得尤为迫切。

2.2 评价结果的预测性作用弱

党的十八届三中全会提出“建立资源环境承载力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”,这表明我国环境管理正从末端治理向源头防控转变,因此要求环境承载力评价结果必须为决策提供支撑。承载力与生态环境禀赋、技术手段、社会选择和价值观理念等因素密切相关,自然资源开发利用方式和人类生产活动处于持续变化过程中,使得承载体和承载对象本质是动态的,相应区域环境承载力也随之发生变化。目前环境承载力研究主要偏重于现状和静态的分析与评价,缺乏对区域动态变化过程的分析及发展趋势研究,有部分研究运用系统模拟法对区域承载力的动态变化和发展趋势进行分析预测,但由于评价模型计算复杂和参变量不易把握,难以满足当前条件下业务化应用的需求。

2.3 区域开放性和尺度效应考虑不足

区域人口、资源、环境与社会经济系统作为高度开放的系统,与外界不断进行资源环境要素、产品的交换以及污染物的跨区输送^[49],因此不同区域间环境承载力也会相互影响^[50]。除了要综合考虑各单要素内生变量,还要重视开发系统内各空间单元及外部不同地区间的相互作用等影响。大尺度区域的承载力受小尺度的污染物行为等的影响,小尺度区

域的承载力也会受到大尺度因素的影响。同时,同一尺度下区域间的污染物、资源环境产品和服务等的流动,影响着区域环境承载力^[51]。当前研究出于方便量化评价的目的,多将评价区域看作封闭系统,通过选取区际交流类指标体现区域间的相互影响^[52],难以反映资源环境产品和污染物的流动对区域承载力的累积影响,导致评价结果与区域实际承载状况不一致,甚至相差极大。

2.4 评价方法的应用性不足

当前环境承载力研究主要集中于对概念内涵、指标体系和评价模型等学术层面的研究,处于重评价、轻应用的阶段。在学术界关于环境承载力的概念和内涵还未形成共识,对其内涵存在能力、规模、阈值、限值等不同观点,研究的重点主要集中于指标体系的设置、评价模型的构建、标准阈值研究等技术层面,而对评价结果的深入分析和转化应用、决策支撑等方面关注度不高。虽然当前环境承载力的评价也应用在国土功能区划、城镇化建设与布局等领域,但大多停留在战略引导层面,而对资源优化配置和节约集约开发、生态环境准入、优化国土空间开发格局等管理决策方面支撑力度不够,实用性不强。

3 面向业务化应用的环境承载力评价方法研究展望

环境承载力是制定环境质量标准、编制环境保护规划、优化国土空间开发和保护格局的重要依据。在当前我国大力推进生态文明建设和生态环境保护的背景下,环境管理已从宏观战略指导向精细化管理转变,由末端治理向源头防控转变,从各自为政向整体协作转变,从总量控制向质量效益转变,这要求环境承载力研究打破传统的单一要素和静态的、孤立的评价模式,向系统化、简化、动态化、标准化方向发展,探索研发应用性和操作性较强的环境承载力评价技术标准,以实现环境承载力评价与地方环境管理的紧密结合,发挥环境承载力对自然资源开发和经济社会发展决策的指导作用。

3.1 开展综合评价

在单要素评价的基础上实现区域生态环境系统综合评价。未来环境承载力应充分考虑到社会经济系统的开放性、资源的流动性,基于一个动态的社会经济平台对区域环境承载力进行综合研究,对资源环境系统和社会经济系统进行机制探讨与量化研究,实现从要素到区域综合、系统集成的转变,以揭示社会经济需求和自然生态环境保护需要相结合的

承载力阈值范围,为区域的可持续发展提供指导。

3.2 构建差异化的指标体系

立足区域资源环境本底条件和区域主体功能定位构建差异化的指标体系。根据区域主体功能定位,在禁止开发和限制开发区域、城市化和工业化集中发展区域,分别开展以生态环境保护目标、环境质量改善状况、环境容量盈余的环境承载力评价。考虑社会经济系统和生态环境系统要素间的相互作用,从生态环境、自然资源、经济社会等方面构建不同目标层或要素层,设计差异化的指标体系,通过配置不同的权重,最终评价体现不同区域差异的环境承载力。

3.3 推进评价方法的标准化

根据生态环境监测条件和系统复杂程度构建简便易行的评价模型方法标准规范。在生态环境问题比较单一的区域,选取有针对性的方法,避免计算复杂的模型;对于人口、经济社会和自然生态环境密切耦合的城市区域,加大监测力度,选择能够反映人与环境系统演化的综合模型进行运算以获得全面的评价结果。加快开展环境承载力评价试点实践,在实际应用中不断修订完善,制定统一的环境承载力评价技术标准规范。

3.4 实现评价结果的模拟预测功能

强化环境承载力评价的决策支持、模拟预测功能。充分发挥地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)等现代资源环境信息化技术,开展环境承载力基础数据库、应用信息系统、监测预警平台建设。一方面为继续深入开展承载力研究提供基础数据和资料参考;另一方面反映区域环境承载力空间特征和时间动态变化,实现评价结果的自动化和可视化,形象直观地展示区域环境承载力空间和时间的动态变化;同时结合区域发展趋势,实现对区域整体环境承载力和关键要素变化过程、驱动机制分析预测。为建立和完善承载力监测预警机制奠定基础,为区域生态环境管理和资源开发决策提供依据。

4 结语

环境承载力评价方法主要包括指标体系评价法、系统模拟法、供需平衡法、环境容量法等,不同评价方法的具体内涵、表征形式、适用对象、优点及局限性差异较大。当前环境承载力评价方法距离业务化应用尚有较大差距,体现在评价方法的综合性不够,评价结果的预测性作用较弱,区域的开放性和尺度效应考虑不足等方面。结合当前国内环境管理需

求的转变,建议今后应在生态环境系统综合评价、差异化的指标体系构建、评价方法的标准化、评价结果的模拟预测功能实现等方面开展研究。

为了满足国家和区域生态文明建设和生态环境管理科技需求,建立环境承载力监测预警机制,环境承载力评价方法需在已有研究的基础上进一步完善;在国家 and 不同区域尺度上形成既科学又便于操作的环境承载力评价标准规范,建立用于日常管理的环境承载力监测预警平台;面向业务化应用的环境承载力评价研究应向着系统化、简明化、动态化、标准化方向发展,依据区域功能定位和本底资源条件,考虑各要素间、不同空间的相互作用,创新完善指标体系的建立;应加强区域基础数据监测力度,着重考虑其综合性、动态性、准确性、实用性等方面,选择能够反映人与环境系统演化的模型方法进行评价和预测,在不同尺度上形成科学易行的环境承载力评价标准规范。

参考文献

- [1] MALTHUS T R. An essay on the principle of population [M]. London: Pickering, 1798.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Potential population supporting capacities of lands in developing world [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
- [3] Carrying capacity assessment with a pilot study of Kenya: a resource accounting methodology for exploring national options for sustainable development [R]. Paris and Rome: UNESCO & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
- [4] SLEESER M. Enhancement of carrying capacity options ECCO [M]. London: The Resource Use Institute, 1990.
- [5] FENG Z M, SUN T, YANG Y Z, et al. The progress of resources and environment carrying capacity: from single-factor carrying capacity research to comprehensive research [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(2): 125-134.
- [6] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践 [J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.
FENG Z M, YANG Y Z, YAN H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: from theory to practice [J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379-395.
- [7] KHANNA P, BABU P R, GEORGE M S. Carrying-capacity as a basis for sustainable development: a case study of national capital region in India [J]. Progress in Planning, 1999, 52(2): 101-166.
- [8] BISHOP A B. Carrying capacity in regional environmental management [J]. Conservation in Practice, 1974, 1(1): 17-24.
- [9] SCHNEIDER D. The carrying capacity concept as a planning tool [M]. Chicago: American Planning Association, 1978.
- [10] FURUYA K. Environmental carrying capacity in an aquaculture ground of seaweed and shellfish in northern Japan [C]// Determining environmental carrying capacity of coastal and marine areas: progress, constraints and future options. Hong

- Kong: PEMSEA Workshop Proceedings 2003:52-59.
- [11] 高吉喜. 可持续发展理论探讨: 生态承载力理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社 2001.
- [12] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础 [J]. 地理学报 2007, 62(4): 339-350.
FAN J. The scientific foundation of major function oriented zoning in China [J]. Acta Geographica Sinica 2007, 62(4): 339-350.
- [13] 徐琳瑜, 康鹏. 工业园区规划环境影响评价中的环境承载力方法研究 [J]. 环境科学学报 2013, 33(3): 918-930.
XU L Y, KANG P. Evaluation of environment carrying capacity on development planning of an industrial park [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2013, 33(3): 918-930.
- [14] 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《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》[A/OL]. (2017-09-20) [2019-04-06]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/20/content_5226466.htm.
- [15] 中国科学院地理科学与资源研究所. 国家发改委等 13 部委联合下发由地理资源所牵头编制的《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》[EB/OL]. (2016-10-18) [2019-04-06]. http://www.igsnr.ac.cn/xwzx/zhxw/201610/t20161018_4681388.html.
- [16] 郭秀锐, 毛显强, 冉圣宏. 国内环境承载力研究进展 [J]. 中国人口·资源与环境 2000, 10(3): 29-31.
GUO X R, MAO X Q, RAN S H. Research progress in environmental carrying capacity in China [J]. China Population, Resources and Environment 2000, 10(3): 29-31.
- [17] 李华姣, 安海忠. 国内外资源环境承载力模型和评价方法综述: 基于内容分析法 [J]. 中国国土资源经济 2013, 26(8): 65-68.
LI H J, AN H Z. Reviews on resources and environment carrying capacity model and evaluation methods both in China and abroad—based on content analysis [J]. Natural Resource Economics of China 2013, 26(8): 65-68.
- [18] 卢亚灵, 刘年磊, 程曦, 等. 京津冀区域大气环境承载力监测预警研究 [J]. 中国人口·资源与环境 2017, 27(5): 36-40.
LU Y L, LIU N L, CHENG X, et al. Monitoring and early warning of atmospheric environmental carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Population, Resources and Environment 2017, 27(5): 36-40.
- [19] 陈百明. “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 1991, 6(3): 197-205.
CHEN B M. 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, 1991, 6(3): 197-205.
- [20] 李磊, 贾磊, 赵晓雪, 等. 层次分析: 熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用 [J]. 长江流域资源与环境 2014, 23(4): 456-460.
LI L, JIA L, ZHAO X X, et al. Application of the AHP and entropy weight method in evaluation on city water environmental carrying capacity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin 2014, 23(4): 456-460.
- [21] 刘艳菊, 李巍, 郝芳华. 规划环境影响评价中大气环境承载力分析研究 [J]. 安全与环境学报 2009, 9(3): 78-83.
LIU Y J, LI W, HAO F H. On the application of atmospheric environment carrying capacity to the planning environmental impact assessment [J]. Journal of Safety and Environment 2009, 9(3): 78-83.
- [22] 张永勇, 夏军, 王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨 [J]. 地理科学进展 2007, 26(2): 126-132.
ZHANG Y Y, XIA J, WANG Z G. Research on regional water resources carrying capacity theory and method [J]. Progress in Geography 2007, 26(2): 126-132.
- [23] 魏子新, 周爱国, 王寒梅, 等. 地质环境容量与评价研究 [J]. 上海地质 2009(1): 40-44.
WEI Z X, ZHOU A G, WANG H M, et al. Study on evaluation of geological environmental capacity [J]. Shanghai Geology, 2009(1): 40-44.
- [24] 刘玉娟, 刘邵权, 刘斌涛, 等. 汶川地震重灾区雅安市资源环境承载力 [J]. 长江流域资源与环境 2010, 19(5): 554-559.
LIU Y J, LIU S Q, LIU B T, et al. Bearing capacity of resources and environment of Ya'an: heavily damaged area by Wenchuan earthquake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin 2010, 19(5): 554-559.
- [25] 雷勋平, 邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究 [J]. 环境科学学报 2016, 36(1): 314-323.
LEI X P, QIU G H. Empirical study about the carrying capacity evaluation of regional resources and environmental based on entropy-weight TOPSIS model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1): 314-323.
- [26] 薛英岚, 吴昊, 吴舜泽, 等. 基于环境承载力的适度人口规模研究: 以北海市为例 [J]. 环境保护科学 2016, 42(1): 1-6.
XUE Y L, WU H, WU S Z, et al. Study of a moderate population scale based on environmental carrying capacity: taking Beihai City as an example [J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(1): 1-6.
- [27] 皮庆, 王小林, 成金华, 等. 基于 PSR 模型的环境承载力评价指标体系与应用研究: 以武汉城市圈为例 [J]. 科技管理研究 2016, 36(6): 238-244.
PI Q, WANG X L, CHENG J H, et al. Environment carrying capacity evaluation system and applied research based on PSR model: a case study of Wuhan metropolitan area [J]. Science and Technology Management Research 2016, 36(6): 238-244.
- [28] 曾维华, 王华东, 薛纪渝, 等. 环境承载力理论及其在湄洲湾污染控制规划中的应用 [J]. 中国环境科学 1998, 18(增刊): 71-74.
ZENG W H, WANG H D, XUE J Y, et al. Theory of environment carrying capacity and its application of environmental planning on Meizhou Bay [J]. China Environmental Science, 1998, 18(Suppl): 71-74.
- [29] 徐志青, 刘雪瑜, 肖书虎, 等. 珠江三角洲地区水环境承载力评价及障碍因素研究 [J]. 环境工程技术学报 2019, 9(1): 44-54.
XU Z Q, LIU X Y, XIAO S H, et al. Evaluation and obstacle factors study of water environmental carrying capacity in the Pearl River Delta [J]. Journal of Environmental Engineering Technology 2019, 9(1): 44-52.
- [30] LI N, YANG H, WANG L C, et al. Optimization of industry structure based on water environmental carrying capacity under uncertainty of the Huai River Basin within Shandong Province, China [J]. Journal of Cleaner Production 2015, 112: 4594-4604.
- [31] 陈永霞, 薛惠锋, 王媛媛, 等. 基于系统动力学的环境承载力仿真与调控 [J]. 计算机仿真 2010, 27(2): 294-298.
CHEN Y X, XUE H F, WANG Y Y, et al. Simulation and adjustment of environmental carrying capacity based on system dynamics [J]. Computer Simulation 2010, 27(2): 294-298.

- [32] 李文龙,任圆. 城市综合承载力系统动力学仿真模型研究[J]. 生态经济 2017 33(2):78-80.
LI W L,REN Y. Research on system dynamics simulation model urban comprehensive carrying capacity [J]. Ecological Economy , 2017 33(2):78-80.
- [33] 王开运. 生态承载力复合模型系统与应用[M]. 北京: 科学出版社 2007.
- [34] 王家骥,姚小红,李京荣,等. 黑河流域生态承载力估测[J]. 环境科学研究 2000 13(2):44-48.
WANG J J,YAO X H,LI J R,et al. Assessment for ecological carrying capacity of Heihe River Basin [J]. Research of Environmental Science 2000 13(2):44-48.
- [35] 张子龙,陈兴鹏,焦文婷,等. 基于能值理论的环境承载力定量评价方法探讨及其应用[J]. 干旱区资源与环境 2011 25(8):18-23.
ZHANG Z L,CHEN X P,JIAO W T,et al. Quantitative measure method for environmental carrying capacity and its application: based on energy theory [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2011 25(8):18-23.
- [36] 胡晓芬,陈兴鹏,韩杰,等. 基于能值分析的汉藏回民族地区环境承载力评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版) 2017 53(2):206-212.
HU X F,CHEN X P,HAN J,et al. Evaluation of environmental carrying capacity of the Han ,Tibetan and Hui ethnic areas based on emery analysis [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) 2017 53(2):206-212.
- [37] 刘东,封志明,杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. 自然资源学报 2012 27(4):614-624.
LIU D,FENG Z M,YANG Y Z. Ecological balance between supply and demand in China using ecological footprint method [J]. Journal of Natural Resources 2012 27(4):614-624.
- [38] ZHAO S,LI Z Z,LI W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. Ecological Modelling 2005 18(1):65-75.
- [39] 刘年磊,卢亚灵,蒋洪强,等. 基于环境质量标准的环境承载力评价方法及其应用[J]. 地理科学进展 2017 36(3):296-305.
LIU N L,LU Y L,JIANG H Q,et al. Environmental carrying capacity evaluation methods and application based on environmental quality standards [J]. Progress in Geography , 2017 36(3):296-305.
- [40] 张会涓,陈然,赵言文. 基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究[J]. 水土保持通报 2012 32(2):186-189.
ZHANG H J,CHEN R,ZHAO Y W. Regional carrying capacity of water environment based on fuzzy matter-element model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2012 32(2):186-189.
- [41] 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京: 中国环境规划院 2003.
- [42] 张玉珍,曹文志,陈锦,等. 九龙江流域湖库化河段水环境容量研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版) 2015 31(6):85-89.
ZHANG Y Z,CAO W Z,CHEN J,et al. Study on the water environmental capacity of the Lake-Kuhua reach in Kowloon Basin [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition) 2015 31(6):85-89.
- [43] 王玉敏,周孝德,李家科. 湖泊水环境容量迭加计算方法研究[J]. 干旱区资源与环境 2005 19(6):108-112.
WANG Y M,ZHOU X D,LI J K. Study on lake water environmental capacity superposition calculation method [J]. Journal of Arid Resources and Environment ,2005 19(6):108-112.
- [44] 彭嘉玉,雷坤,乔飞,等. 基于不同设计水文条件的铁岭水环境容量核算[J]. 环境工程技术学报 2017 7(4):470-476.
PENG J Y,LEI K,QIAO F,et al. Calculation of water environmental capacity in Tieling based on different design hydrological conditions [J]. Journal of Environmental Engineering Technology 2017 7(4):470-476.
- [45] 钱跃东. 区域大气环境承载力评估方法研究[D]. 南京: 南京大学 2011.
- [46] 覃扬颂,支国强,李田富,等. 基于可开发利用土地的区域大气环境承载力研究[J]. 环境科学导刊 2016 35(增刊):164-167.
QING Y S,ZHI G Q,LI T F,et al. Study on regional atmospheric environmental carrying capacity based on development and utilization of land [J]. Environmental Science Survey ,2016 35(Suppl):164-167.
- [47] 邓伟. 山区资源环境承载力研究现状与关键问题[J]. 地理研究 2010 29(6):959-969.
DENG W. Discussion on mountain area resource and environment carrying capacity [J]. Geographical Research ,2010 29(6):959-969.
- [48] 牛方曲,封志明,刘慧. 资源环境承载力评价方法回顾与展望[J]. 资源科学 2018 40(4):655-663.
NIU F Q,FENG Z M,LIU H. A review on evaluating methods of regional resources and environment carrying capacity [J]. Resources Science 2018 40(4):655-663.
- [49] LANE M,DAWES L,GRACE P. The essential parameters of a resource-based carrying capacity assessment model: an Australian case study [J]. Ecological Modelling 2014 272:220-231.
- [50] 郭建军,李凯,江宝骅,等. 流域生态承载力空间尺度效应分析: 以石羊河流域为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版) , 2014 50(3):383-389.
GUO J J,LI K,JIANG B H,et al. Effects of the spatial scale on regional biocapacity: a case study of Shiyang River Basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) 2014 50(3):383-389.
- [51] 吕一河,傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法[J]. 生态学报 2001 21(12):2096-2105.
LÜ Y H,FU B J. Ecological scale and scaling [J]. Acta Ecologica Sinica 2001 21(12):2096-2105.
- [52] 刘晓丽,方创琳. 城市群资源环境承载力研究进展及展望[J]. 地理科学进展 2008 27(5):35-42.
LIU X L,FANG C L. Progress and prospect of study on carrying capacity of resource and environment of city clusters [J]. Progress in Geography 2008 27(5):35-42. ◇