

引用格式: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.] DOI:10.18402/resci.2018.04.01

资源环境承载力评价方法回顾与展望

牛方曲^{1,2}, 封志明¹, 刘 慧¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国西南地缘环境与边疆发展协同创新中心, 昆明 650500)

摘要:中国经济的快速发展导致资源大量消耗和环境污染加剧,资源环境承载力研究成为热点。本文对国内外资源环境承载力相关研究进行了系统的回顾,以人口总量为出口界定了资源环境承载力概念,在此基础上对资源环境承载力评价方法研究进行了展望,总结分析了资源环境承载力评价方法存在的不足。研究认为:目前对资源环境承载力认知并未统一,评价方法也存在差异;研究侧重单要素评价,而对资源环境要素与社会经济要素的相互作用机理、区域资源环境承载力综合评价研究较为薄弱;在开放的系统下如何剥离要素流动导致的资源环境压力转移,率定社会经济系统对当地资源环境压力,透析区域资源环境承载力并提供可操作的政策建议有待进一步深化。为此,将区域社会经济同人口、资源、生态环境予以集成,开展综合评价的理论方法研究具有重要意义。

关键词:资源环境承载力;承载状态;评价方法;约束因素;社会经济;回顾

DOI:10.18402/resci.2018.04.01

1 引言

20世纪70年代以来,在人口急剧增长和需求迅速扩张的双重压力下,以协调人地关系为中心的承载力研究再度兴起。中国在改革开放以来取得了经济高速增长和大规模工业化、城市化的辉煌成就,但国土开发和建设布局存在无序和混乱现象,单位经济产出的资源消耗量过大,经济社会发展与资源、生态、环境之间的矛盾日益严重。诸多问题使许多学者和决策者认识到按照资源环境条件统筹国土空间规划建设的紧迫性和重要意义。

国家“十一五”规划纲要^[1]明确提出“根据资源环境承载能力、现有开发密度和发展潜力,统筹考虑未来我国人口分布、经济布局、国土利用和城镇化格局,将国土空间划分为优化开发、重点开发、限制开发和禁止开发四类主体功能区”。2008年汶川特大地震发生后,国家提出将资源环境承载力评价作为灾后恢复重建规划的基础和重建工作的前提。此后,科学认知区域的资源环境承载力,不仅

在玉树地震、舟曲特大泥石流灾后恢复重建总体规划、专项规划和实施规划得到应用,而且被逐步推广到越来越多的社会经济发展规划和国土空间规划中。国家“十二五”规划纲要^[2]提出对人口密集、开发强度偏高、资源环境负荷过重的部分城市化地区要优化开发,对资源环境承载能力较强、集聚人口和经济条件较好的城市化地区要重点开发等具体要求。2012年11月党的“十八大”报告针对中国资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势,提出“要按照人口资源环境相均衡、经济社会生态效益相统一的原则,控制开发强度,调整空间结构,促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀,给自然留下更多修复空间,给农业留下更多良田,给子孙后代留下天蓝、地绿、水净的美好家园”。2013年11月12日,中国共产党十八届三中全会更是将“建立资源环境承载能力监测预警机制,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”作为新时期中央深化改革

收稿日期:2017-08-01;修订日期:2018-02-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503506);国家自然科学基金项目(41371536)。

作者简介:牛方曲,男,安徽淮南人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事区域、城市可持续发展模拟分析研究。E-mail: niufq@lreis.ac.cn

的重要任务之一列入了《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》^[3]。

国家一系列战略决策凸显对资源环境承载力评价工作之重视、需求之迫切。与之相适应,学界也开展了大量研究工作,有着丰富的文献,为辅助决策发挥了很好的作用。本文对目前国内外资源环境承载力评价方法进行了回顾,探究资源环境承载力评价研究现状和发展趋势,揭示进一步研究面临的问题,在此基础上讨论了资源环境承载力认知,并对评价方法研究进行了展望,希望为推进资源环境承载力研究提供参考。

2 资源环境承载力概念辨析与评价方法概述

资源环境承载力(Resource Environment Carrying Capacity)并没有完全统一的认知。明确以“承载力”为关键词的发文来自生物领域。Errington于1934年将承载力定义为生态系统基于有限的食物和避难所、以及捕食者和人类开采同时存在的限制条件下达到饱和水平时的最大生物量,并以野生鹌鹑为例,评价了区域生态环境的承载力,即区域所能承载的野生鹌鹑的最大种群数量^[4]。之后从人类社会经济角度研究资源环境承载力的文献大量涌现,提出了资源承载力(例如土地资源承载力^[5-7]、水资源承载力^[8-10]、矿产资源承载力^[11]等)、环境承载力^[12,13](如大气环境承载力、土壤环境承载力等)、生态承载力^[14]等。而本文关注的是各类方法所选择的视角,从方法论角度将研究分为四大类:人口论系列、生态足迹系列、初级资产账户系列和其它方法。

2.1 人口论系列

人口论系列研究采用资源环境所能支撑的最大人口量表征承载力,即人口承载力。人口论的鼻祖Malthus于1798年发表论文《人口原理》(An Essay on the Principle of Population)^[15]是19和20世纪最具影响力的人口学说,也被认为是现代资源环境承载力概念的基础^[16]。Malthus认为,人口以几何级数增加,生活资料以算术级数增加,人口增长必然超过生活资料增长,人口过剩和食物匮乏是必然,因此,必将发生强大的妨碍,阻止人口的增加,这种妨碍通常是贫穷与罪恶。马氏理论包含有三个基本假设:第一,食物是人类生存的必需品,并且是人

口增长的唯一限制因素;第二,人口以指数级速度增长,Malthus是通过观察北美人口增长现象得出的该结论,忽略了当时北美移民的影响;第三,食物生产只能线性速度增长。基于上述假设,Malthus解释了英格兰地区的食物匮乏和灾难。

Verhulst^[17]、Pearl^[18]等学者用数学方程描述了环境容量对人口增长的限制(公式(1)),称作Verhulst-Pearl逻辑曲线。其中 N 为人口; r 为人口增长量; K 为环境的容纳能力。根据该公式,当 N 为 $K/2$ 时,人口增长率最大,而当 N 趋近于 K 时,人口增长率趋近于零。该模型采用容纳能力指标反映食物的约束对人口增长的限制作用,被认为是当今承载力定量研究的起源。

$$\frac{dN}{dt} = r \times N[(K - N)/K] \quad (1)$$

Malthus最早看到了环境对人类物资需求的限制^[19]。奠定了之后的“人口增长-资源环境-发展”研究框架。马氏理论虽然有着重要的影响力,但后人对其并非全盘接受。该理论侧重的是食物的限制,且对承载力的限制指标的阈值描述较为模糊,此外Malthus没有考虑制度因素对人口增长的限制作用。总而言之,Malthus理论中人口的增长只会受到自然资源的限制,实证上,该模型只是在时间段内得到验证,更适用于低收入国家而非发达国家(高收入国家人口可能出现负增长),此外,马氏人口论需要剥离出社会经济系统对本地资源环境的压力是多少,而这正是目前区域资源环境承载力评价要回答的问题。

关注于马氏人口理论的假设,开展人口承载力研究的文献不断出现^[20]。各研究对承载力有着不同的定义和评价方法,Seidl等认为这源自研究目标不同,各个文献提到的Malthus人口论中存在的不足,在之后乃至目前的概念中仍然存在,大多承载力概念适合于评价中短期物种数量^[16]。人口论系列考虑的是资源限制,而随着经济发展和人口增长,资源消耗增加的同时污染排放也进一步加剧,因此之后许多学者着眼于生态环境来研究人口承载力^[21,22]。

2.2 生态足迹系列

进入20世纪90年代Wackernage和Rees提出了生态足迹(Ecological Footprint)的概念^[23-26]。任何已知人口(个人、国家或地区)的生态足迹是生产这些

2018年4月

人口消费的所有资源及吸纳这些人口产生废弃物所必需的生态生产性土地面积和水域面积的总和,包括化石燃料用地、可耕地、林地、草地、建筑用地和水域等六大类。之后生态足迹被用于计算全球、国家、区域、城市生态需求情况。关于其实现方法的文献也很丰富^[26-34]。生态足迹在评价人类活动与生态环境的相互作用强度方面发挥了很好的作用。

生态足迹实则是提供了一个资源利用清算工具,用于计算特定的人口使用了多少的生态生产性土地和水域面积,而不论其发生在地球的哪里^[33]。生态足迹可用于计算特定区域生态盈余和生态赤字,在计算全球生态环境承载力、国家或地区自然资源负债情况以及比较不同人群的生态消耗方面可以发挥很好的作用。

虽然世界人口的生态足迹可以反映人类对地球资源的消耗状态,但就区域尺度而言,由于涉及跨区占用问题,未能反映本地生态环境的承载状态(对当地的压力)。例如一个高收入的城市或国家的生态足迹会超出其自身的土地或水域面积,但其当地的资源环境可能并未超载。此外,生态足迹并没有回答每个区域如何使用或使用何种资源。因此,对于一个开放区域系统来说,当地资源环境对其社会经济系统的承载能力是多少,并未得到回答。

2.3 初级资产账户系列

Peter等学者从生物学角度提出初级净产出(Net Primary Production, NPP)(或称初级资产账户)概念^[35],用于度量人类对地球生物圈层的影响。NPP是生物(通常为植物)吸收太阳能减去其呼吸作用消耗的能量而剩下的能量。简而言之,即植物通过光合作用吸收太阳能,并将其储备为地球的能量。Peter等学者认为NPP提供了所有消费物体生存、增长、繁殖所需要的能量,NPP是地球上食物的总来源^[35, 36]。Peter等学者将NPP看作是区域的能量输入,而把人类的消耗看作是输出,并在全球尺度开展了研究。之后有学者基于该思想开展研究^[37, 38]。如果将地球看作一个封闭的系统,除了其储备的能量,其能源来源只有太阳能。从这个角度而言,若人类消耗的地球能量的速度高过了NPP,地球能量储备肯定是会逐渐减少的,并最终枯竭。因此NPP为可持续发展研究提供了很好的工具。联合国粮

农组织基于粮食产量与人均热量需求定义了承载力的计算方法^[39]。

与人口论系列方法、生态足迹评价方法类似,采用NPP的方法评价人类活动对地球资源的消耗情况,可用于比较不同地区的能值消耗,但对于区域当地资源环境的承压状态未作关注。由于地区的开放性,其消耗资源可能来自于其他地区,即压力不在本地,因此,与区域资源环境承载力评价的初衷并不吻合,难以直接应用于区域资源环境承载力评价。

2.4 其它评价方法

除了上述视角外,学者还提出其它诸多资源环境承载力评价方法^[40-45],常用的包括综合指数法、比较法。源于生态系统的复杂性和承载力的社会属性,各类方法难以为人類社会的实践提供切实可行的决策^[46]。①综合指数法,具体包括数学模型处理法和指标加权法。选取一系列指标,通过数学处理或直接加权得出一个综合指数,表征资源环境承载力^[47-49]。综合指数法得出的评价结果通常为一个无量纲的表征值,甚至将承载对象与承载体做加权(如人口、GDP等与土地资源或水资源加权),物理意义不明确,导致分级阈值的率定缺乏说服力,对政策具体指导意义不强。此外,就所选指标而言,综合指数法评价结果多是承载状态,而非承载力,例如土地资源或水资源使用量或比例。②比较法,首先选定一个资源环境承载状态合理的区域,然后将研究区域的各项指标与其对比,评价研究区的承载情况。但承载状态合理的区域难以选定,且没有回答承载力是多少的问题。此外,常用的具体方法还有短板理论,也称为木桶理论,按照“木桶理论”的短板效应,区域综合承载力的大小最终取决于对经济社会发展具有“瓶颈”作用的制约因素,在计算出各个单因素承载力后,取最小值。短板理论或单要素评价研究^[50-55]可以归属于上述各类方法。

综上所述,资源环境承载力的认知未统一,评价方法和结果存在差异;将资源环境要素与社会经济要素挂钩,探索二者相互作用机理方面较为薄弱,具体政策意义不清晰;综合考虑要素的流动性,剥离社会经济活动对当地的压力方面少有关关注,资源环境承载力多要素综合评价模型研究有待深

化^[56,57]。为此,从资源环境承载力认知出发,界定资源环境承载力内涵,将社会经济同人口、资源、生态环境予以集成,探索社会经济和资源环境要素间相互作用机理,建立要素间定量关系,是推进资源环境承载力综合评价方法研究面临的问题。

3 资源环境承载力评价方法分析与展望

3.1 资源环境承载力认知

对资源环境承载力认知的剖析是开展综合评价的基础,也将影响评价方法的选择。比较直观且容易接受的资源环境承载力的概念当属来自于生态领域的定义,即区域所能供养的最大种群数量。为科学合理理解资源环境承载力的内涵,将物种、人类与资源环境相互作用模式作对比,如图1所示。

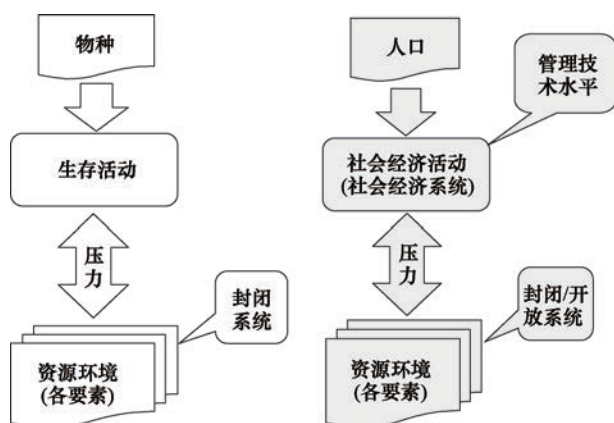


图1 物种及人口与资源环境相互作用模式

Figure 1 Interaction among resources, environment and species, mankind

生物对区域的压力是通过基本的生存活动,物种承载力计算方式也是基于生物对区域生活资料的需求,依据当地生活资料,因此区域可看作是一个封闭的系统,自然资源是有限的。不同的物种所需的生活资料不同,对应的区域承载力也会不同。与之对应,人类通过社会经济活动对资源环境施加压力。不同于生物的生存活动,人类的生产、生活内容更为复杂。人类社会经济活动所需的生产生活资料可以来自本地,也可以通过市场交换,实现区域间流动,因此,区域系统可以是封闭的,也可以是开放的。区域社会经济系统受人口素质、技术、管理水平影响,不同的发展水平下,区域所能承载的人口必然不同。因此,资源环境承载力评价针对的应是特定社会经济系统,或称区域系统。

根据上述讨论,人类社会经济活动与物种的生存活动对资源环境的压力模式所不同的是人类多了生产活动,区域间存在要素流动。至此,要对资源环境承载力下一个定义还要面临的问题是,采用人口还是经济规模指标来评价资源环境承载力?回顾历史上资源环境承载力相关研究,多数落实为人口指标,即可承载的人口数量。也存在“经济总量”、“产业规模”等指标,但通常没有阐述其具体含义。特定区域内,人口从事着社会经济活动,二者是密不可分的一个整体,区域经济规模是区域人口活动的结果。据此,人口可作为区域资源环境承载力评价的出口。

综合以上分析,参考物种承载力概念,本文认为资源环境承载力评价应落实为人口数量,即特定的区域(社会经济系统)内,在自然生态环境不受破坏并维系良好的生态系统前提下,区域资源环境所能承载的人口数量的上限。如此以来,资源环境承载力将有明确的量纲,也便于区域间综合比较和决策参考。就出口指标而言与马氏人口论相同,但评价方法上需要考虑多个维度,而不限于资源数量。

3.2 资源环境承载力的维度分析

上述资源环境承载力概念涉及到地域系统、尺度、承载对象、承载体、承载模式、阈值、系统开放性、动态性等诸多方面。这些维度(关键点)是开展区域资源环境承载力评价研究需要面对的。

(1)地域系统。承载力概念限定了“特定的区域”,实则是限定了特定的空间及社会经济系统,即特定的生产生活方式。每一个区域均对应着自身的社会、经济、文化。社会经济对资源环境的压力是受人口素质、管理技术水平等要素影响。为辅助决策,资源环境承载力评价要解决在特定的生产生活方式下,区域所能承载的人口上限。区域决策要考虑的是在其特定生产生活方式下资源环境承载力的大小。

(2)尺度,包括空间尺度和时间尺度。空间尺度的不同,受资源环境限制也不同,通常空间尺度越大,资源越丰富。若在国家尺度评价资源环境承载力,要素的流动涉及国际贸易、地缘政治等因素影响,而若在全球尺度开展研究,地球可视为一个封闭系统,其资源量、环境容量将是有限的。此外,

2018年4月

不同的时间尺度下资源环境承载力评价也有所不同,不同时间尺度资源环境承载力关注的要素有所不同,例如,短期内碳排放影响并不显著,但若从长远角度考虑人类生存环境变化(全球气候变化),碳污染不容忽视。

(3)承载对象,即人口,资源环境承载力评价需要确定承载人口的上限,超过这一上限,将破坏生态环境。而人口是通过社会经济活动施压于资源环境,因此承载力评价需要确定社会经济影响因素。如此以来,评价结果落实为人口指标,具有明确的量纲,便于比较,影响因素落实于社会经济要素,便于决策参考。

(4)承载体,即资源环境。承载力评价需要确定采用哪些要素描述承载体。目前被重点关注的资源环境要素包括气象气候、土地、水、矿产、海洋资源、环境容量和生态系统等。土地是非再生资源,空间占用具有排他性;水和气象气候属于可再生资源,开发利用水平不能超出其再生能力。矿产资源形成期限较长,可视为不可再生资源。环境容量规定污染物的排放水平要低于自然界的净化能力。生态系统要求稳定和处于良性循环状态。上诉要素由于数量有限,在特定的消费水平下,支撑的人口也是有限的,不同的区域需要根据区域特点确定承载体。

(5)承载模式,即资源环境要素与社会经济要素相互作用机理。人类的生产生活需要占用资源,并排放废物。不同的生产生活方式下两类要素的相互作用机理与强度不同,影响资源环境承载力评价结果。如何在辨析承载对象与资源环境要素之间作用机理的基础上,确定二者的定量关系是资源环境承载力评价的难点问题,也是核心问题。

(6)阈值。资源环境承载力指的是生态环境在未被破坏情况下能够承载的人口上限,因此需要明确生态环境在什么情况下不会发生不可逆的变化。生态系统本身应有其承载的极限值,同时地方或国家为保护生态环境而设定的限制指标同样需要考虑,如废弃物排放标准等。

(7)系统的开放性(封闭性)。全球一体化的背景下,区域之间联系不断加强,各区域通常是一个开放的系统。封闭系统的承载力评价是回答“一方

水土养育一方人”的问题,而开放的系统下可移动资源(如煤炭、石油、粮食等)可通过区域间流动实现互补,不限于当地储备,而不可移动要素(如土地)需要重点考量。此外,环境要素通常难以通过区域流动得到弥补,如空气污染、土壤污染等,当超过一定限度,必然对当地人口健康产生威胁。系统开放性问题的本质是,资源环境承载力评价应解析到社会经济系统对本地的压力。

(8)动态性。社会经济系统受技术水平、社会发展、产业类型及规模影响,可以通过技术或管理水平的进步、调控人类生产生活方式提升资源环境承载力。资源环境承载力是动态变化的,而资源环境本底是有限的。技术进步的含义涉及领域十分宽泛,但并不意味着承载力一定会提高,需要视具体技术及其应用领域的特点加以甄别。资源环境承载力评价应能够反应其动态特征,为社会经济系统调整与结构优化提供依据,提升对资源环境变化的响应能力。

3.3 资源环境承载力服务于适宜性分区、限制性分类、警示性分级

为辅助决策,区域资源环境承载力评价需实现适宜性分区、限制性分类、警示性分级。单要素评价的适宜性分区、限制性分类需要确定关键参数并率定阈值。关键参数可以是资源环境瓶颈因素,也可以是社会经济因素,可选指标很多^[58],需因地制宜。对于城市化地区,空气质量(灰霾污染程度)是重要考虑指标;对于农牧地区,耕地面积幅度、草原平衡指数;对于生态涵养区,生态环境质量变化状态、植被覆盖度指数变动度。这些往往与大尺度自然地理单元、经济社会发展类型或阶段等相关。不同的区域有制约其发展的关键因素,参数的率定和阈值的界定需要针对研究区域细化模型来确定。

警示性分级的关键阈值设定在于根据资源环境承载力评价结果,将区域划分为若干不同的预警级别,需要参考国家或地方资源环境方面的政策,并考量指标的连续性和突变性。目前常用的方法是,根据综合评价指数对区域超载或承载状态进行分级,例如超载、临界状态、不超载。由于单一指数较为笼统,参数分级阈值的界定说服力较弱,分级状态对具体政策的制定指导意义不强。而将承载

状态落实到具体社会经济要素,确定社会经济系统哪些环节导致超载,辅助决策方面更具操作性。

4 结语

本文对国内外资源环境承载力相关研究进行了系统的回顾、分析。并在总结各类区域资源环境承载力评价方法不足的基础上,讨论了资源环境承载力认知概念,并对资源环境承载力综合评价方法研究进行了展望。

目前资源环境承载力评价方法多样,有关承载力的基础理论与实践依据的争论时有发生。研究方法而言,主要有人口论系列研究、生态足迹系列研究、初级资产账户(能值)系列研究等。上述方法对于评价全球尺度下人地关系可发挥很好的作用,也可以用于比较不同区域或城市对地球生态系统的消耗情况,但这些方法并非针对开放的、区域尺度资源环境承载力评价而提出。另还有综合指数法、比较法等方法。各类方法对资源环境与社会经济要素相互作用的机理性探索较为薄弱,在具体政策指导意义上可操作性较弱。因此将区域社会经济同人口、资源、生态环境予以集成,进行资源环境承载力综合评价理论方法研究亟需深化。

本文在做上述总结分析的基础上对资源环境承载力综合评价方法研究进行了展望,探究了资源环境承载力的内涵,并讨论了资源环境承载力评价涉及的关键问题,为进一步开展资源环境承载力综合评价方法研究、构建综合评价模型提供参考。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要.(2006-3-16)[2017-11-15].http://www.gov.cn/jztzl/2006-03/16/content_228841.htm. [The Central People's Government of the People's Republic of China. The Eleventh Five-year Plan Outline for the National Economy and Social Development of the People's Republic of China. (2006-3-17) [2017-11-15]. http://www.gov.cn/jztzl/2006-03/16/content_228841.htm.]

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要.(2011-3-16)[2017-11-15]. http://jiuban.moa.gov.cn/fwllm/jjps/201103/t20110317_1949003.htm. [The Central People's Government of the People's Republic of China. The Twelfth Five-year Plan Outline for the National Economy and Social Development of the People's Republic of China. (2011-

3-17)[2017-11-15]. http://jiuban.moa.gov.cn/fwllm/jjps/201103/t20110317_1949003.htm.]

[3] 中国共产党新闻网. 中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定[EB/OL]. (2013-11-15)[2017-07-20]. <http://cpc.people.com.cn/n/2013/1115/c64094-23559163.html>. [www. cpcnews. cn. Decision of the CPC Central Committee on Several Important Issues of Deepening the Reform[EB/OL]. (2013-11-15)[2017-07-20]. <http://cpc.people.com.cn/n/2013/1115/c64094-23559163.html>.]

[4] Errington P L. Vulnerability of bobwhite populations to predation [J]. *Ecology*, 1934, 15(2): 110-127.

[5] 郑振源. 中国土地的人口承载潜力研究[J]. 中国土地科学, 1996, 10(4): 33-38. [Zheng Z Y. Research of potential population carrying capacity of Chinese land [J]. *China Land Science*, 1996, 10(4): 33-38.]

[6] 党安荣, 阎守邕, 吴宏歧, 等. 基于 GIS 的中国土地生产潜力研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 910-915. [Dang A R, Yan S Y, Wu H Q, et al. A GIS based study on the potential land productivity of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 910-915.]

[7] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究[J]. 地理研究, 2014, 33(8): 1395-1405. [Feng Z M, Yang Y Z, You Z. Research on land resources restriction on population distribution in China, 2000- 2010[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1395-1405.]

[8] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992. [Shi Y F, Qu Y G. The Carrying Capacity of Water Resources and Its Reasonable Use of Urumqi River[M]. Beijing: Science Press, 1992.]

[9] 封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 689-699. [Feng Z M, Liu D W. A study on water resources carrying capacity in Jingjinji Region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 689-699.]

[10] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997, (8): 73-79. [Gao Y C, Liu C M. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, (8): 73-79.]

[11] 徐强. 区域矿产资源承载能力分析几个问题的探讨[J]. 自然资源学报, 1996, 11(2): 135-140. [Xu Q. An exploration of several problems about the analysis of regional mineral resources carrying capacity[J]. *Journal of Natural Resources*, 1996, 11(2): 135-140.]

[12] 徐大海, 王郁. 确定大气环境承载力的烟云足迹法[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1734-1740. [Xu D H, Wang Y. Plume footprints analysis for determining the bearing capacity of atmospheric environment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(6): 1734-1740.]

[13] 曾维华, 杨月梅, 陈荣昌, 等. 环境承载力理论在区域规划环境影响评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(6): 27-

2018年4月

- [13] [Zeng W H, Yang Y M, Chen R C, *et al.* Application of environmental carrying capacity in environmental impact assessment in planning[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(6): 27–31.]
- [14] 齐亚彬. 资源环境承载力研究进展及其主要问题剖析[J]. 中国国土资源经济, 2005, 18(5): 7–11. [Qi Y B. The present situation of resource environmental bearing-capacity research and analysis of its main problems [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2005, 18(5): 7–11.]
- [15] Malthus T R. An Essay on the Principle of Population[M]. London: J. Johnson, 2001.
- [16] Seidl I, Tisdell C A. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity[J]. *Ecological Economics*, 1999, 31(3): 395–408.
- [17] Verhulst P F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement [J]. *Correspondence Math. Phys*, 1938, 10: 113–121.
- [18] Pearl R, Reed L S. On the rate of growth of the population of the US since 1790 and its mathematical representation[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1920, 6(6): 275–288.
- [19] Bowen I. Population[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1954.
- [20] William A. The African Husband Man[M]. Edinburg: Oliver and Boyd, 1965.
- [21] 高吉喜. 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, 2001. [Gao J X. Theoretical Exploration of Sustainable Development-Theory, Method and Application of Ecological Carrying Capacity [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.]
- [22] 代富强, 吕志强, 周启刚. 生态承载力约束下的重庆市适度人口规模情景预测[J]. 人口与经济, 2012, (5): 80–86. [Dai F Q, Lv Z Q, Zhou Q G. The scenario prediction of optimum population size under the constraint of ecological carrying capacity in Chongqing municipality[J]. *Population & Economics*, 2012, (5): 80–86.]
- [23] Wackernagel M. Land Use: Measuring a Community's Appropriated Carrying Capacity as an Indicator for Sustainability[R]. Vancouver: UBC Task Force on Healthy and Sustainable Communities, 1991.
- [24] Wackernagel M. Using Appropriated Carrying Capacity as an Indicator, Measuring the Sustainability of a Community[R]. Vancouver: UBC Task Force on Healthy and Sustainable Communities, 1991.
- [25] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121–130.
- [26] Wackernagel M, Rees B. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Philadelphia: New Society Publishers, 1996.
- [27] Ferng, J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity[J]. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 159–172.
- [28] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia[J]. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 229–255.
- [29] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 231–246.
- [30] Loh J, Goldfinger S. Living Planet Report 2006[M]. Gland: WWF International, 2006.
- [31] Galli A, Kitzes J, Wermer P, *et al.* An exploration of the mathematics behind the Ecological Footprint[J]. *International Journal of Ecodynamics*, 2007, 2(4): 250–257.
- [32] Kitzes J, Peller A, Goldfinger S, *et al.* Current methods for calculating national ecological footprint accounts[J]. *Science for Environment and Sustainable Society*, 2007, 4(1): 1–9.
- [33] Kitzes J, Wackernagel M, Loh J, *et al.* Shrink and share: humanity's present and future Ecological Footprint[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363: 467–475.
- [34] Kitzes J, Wackernagel M. Answers to common questions in ecological footprint accounting[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(4): 812–817.
- [35] Vitousek P M, Ehrlich P R, Ehrlich A H, *et al.* Human appropriation of the products of photosynthesis[J]. *BioScience*, 1986, 36(6): 368–373.
- [36] Krausmann F, Haberl H, Erb K H, *et al.* Resource flows and land use in Austria 1950–2000: using the MEFA framework to monitor society–nature interaction for sustainability [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 215–230.
- [37] Elisa S N, Enrique O. Carrying capacity using emergy and a new calculation of the ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1200–1207.
- [38] Lei K, Zhou S Q. Per capita resource consumption and resource carrying capacity: a comparison of the sustainability of 17 mainstream countries[J]. *Energy Policy*, 2012, 42(1): 603–612.
- [39] 卢良恕, 刘志澄. 中国中长期食物发展战略[M]. 北京: 农业出版社, 1993. [Lu L S, Liu Z C. Medium Term Food Development Strategy in China[M]. Beijing: Agricultural Press, 1993.]
- [40] 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.]
- [41] 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[J]. 地理研究, 2015, 34(1): 39–52. [Zhou K, Fan J. Characteristics and influence factors of resources and environment carrying

- capacity in underdeveloped areas of China[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(1): 39–52.]
- [42] 樊杰, 王亚飞, 汤青. 等. 全国资源环境承载力检测预警学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 2015, 35(1): 1–10. [Fan J, Wang Y F, Tang Q, *et al.* Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity[J]. *Geographical Sciences*, 2015, 35(1): 1–10.]
- [43] 刘晓丽. 城市群地区资源环境承载力理论与实践[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013. [Liu X L. Theory and Practice of Resources and Environment Carrying Capacity of City Clusters [M]. Beijing: China Economic Press, 2013.]
- [44] 毛汉英, 余丹林. 环渤海地区区域承载力研究[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 363–371. [Mao H Y, Yu D L. Regional carrying capacity in Bohai Rim[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 363–371.]
- [45] 洪阳, 叶文虎. 可持续环境承载力的度量及其应用[J]. 中国人口·资源与环境, 1998, 8(3): 55–58. [Hong Y, Ye W H. Theoretical analysis of sustainable environmental carrying capacity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 1998, 8(3): 55–58.]
- [46] 张林波, 李兴, 李文华, 等. 人类承载力研究面临的困境与原因[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 889–897. [Zhang L B, Li X, Li W H, *et al.* Human carrying capacity research: dilemma and reasons[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 889–897.]
- [47] Tian Y, Sun C W, Mcmillen D P, *et al.* A spatial differentiation study on comprehensive carrying capacity of the urban agglomeration in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2018, 68: 11–22.
- [48] Zhang M, Liu Y M, Wu J, *et al.* Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 68: 90–97.
- [49] Ma P P, Ye G Q, Peng X, *et al.* Development of an index system for evaluation of ecological carrying capacity of marine ecosystems [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 144: 23–30.
- [50] Zhou Y J, Zhou J X. Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity constrained by GDP-PM2. 5[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 637–652.
- [51] 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[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1180–1191.
- [52] Lu Y, Xu H W, Wang Y X, *et al.* Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: a case in Huai'an City[J]. *Water Resources and Industry*, 2017, 18: 71–77.
- [53] Wang R, Cheng J H, Zhu Y L, *et al.* Evaluation on the coupling coordination of resources and environment carrying capacity in Chinese mining economic zones[J]. *Resources Policy*, 2017, 53: 20–25.
- [54] Ren C F, Guo P, Li M, *et al.* An innovative method for water resources carrying capacity research—Metabolic theory of regional water resources[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 167: 139–146.
- [55] Meriem N A A, Ewa B A. Algiers carrying capacity with respect to per capita domestic water use[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2014, 13: 1–11.
- [56] 樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1060–1068. [Fan J. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human–environment system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1060–1068.]
- [57] 高湘昀, 安海忠, 刘红红. 我国资源环境承载力的研究评述[J]. 资源与产业, 2012, 14(6): 116–120. [Gao X Y, An H Z, Liu H H. Views on China's resources and environmental loading capacity [J]. *Resource & Industries*, 2012, 14(6): 116–120.]
- [58] 张林波, 刘孝富, 舒俭民, 等. 人类承载力“K值”影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(6): 54–59. [Zhang L B, Liu X F, Shu J M, *et al.* Factors influencing the “K Value” of human carrying capacity[J]. *China Population Resources and Environment*, 2007, 17(6): 54–59.]

A review on evaluating methods of regional resources and environment carrying capacity

NIU Fangqu^{1,2}, FENG Zhiming¹, LIU Hui¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Collaborative Innovation Center for Geopolitical Setting of Southwest China and Borderland Development, Kunming 650500, China*)

Abstract: China is now experiencing increasing resource consumption and environmental deterioration because of rapid economic development and urbanization. Research on resources and environmental capacity is becoming focused. Here we systematically reviewed and analyzed research in China and abroad, focusing on evaluation methods. Based on research gaps, it could be drawn that there is no generally accepted definition or consensus of resource and environmental capacity, which leads to differences in methodologies and conclusions. The maximum population, ecological footprint, and emergy are often used methodologies to evaluate regional resources and environmental capacity taking ecological system and socio-economic system as a black box. There is a lack of research into interaction mechanisms between them, and political implications are weak. These methods are not suitable to evaluate carrying capacity at regional scales. Research integrating regional economy, population, resources and the ecological environment remains to be furthered in relation to both theories and techniques. Defining resources and environmental capacity using the maximum number of populations that can be carried as indicator, we discussed the dimension of resources and environmental capacity and developed an evaluation process. According to this process, determining factors and socio-economic influencing factors as well as the interaction mechanism of them need to be identified first, then to evaluate the carrying capacity of each socio-economic factors, and comprehensive regional resource and environmental capacity based on mutual restraint of these factors. The evaluation of resources and environmental capacity requires much future work.

Key words: resources and environmental carrying capacity; carrying status; evaluating methods; constraint factors; social economy; review