

区域资源环境综合承载力研究进展与展望

吕一河^{1,2*}, 傅微¹, 李婷^{1,2}, 刘源鑫¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:区域资源环境综合承载力是人地关系和谐和可持续发展的重要基础,也是自然地理综合研究的前沿及热点内容。近年来,区域资源环境综合承载力研究取得了长足进展,体现在:①建立了综合、广泛的评价指标体系;②资源环境综合承载力与人地关系的调适;③综合研究方法的应用;④对资源环境综合承载力的时空动态研究的关注及尝试。目前,资源环境综合承载力研究应用于国土空间开发、产业规划、灾后重建、资源环境监测及预警等领域。未来仍需在完善指标体系的构建、研究尺度及动态变化等方面加强研究,以此深化综合自然地理理论及实践研究,为区域资源、社会和生态环境可持续性研究提供支撑。

关键词:资源环境承载力;综合;可持续发展;研究进展;展望

1 引言

自然地理环境各组分(气候、地貌、水文、土壤、植被、动物及人类社会)相互作用的格局与过程是自然地理综合研究的核心命题和长期任务之一。目前,世界范围内广泛开展了以资源环境为核心的社会—经济—自然复合生态系统对人类活动响应研究,并对可持续发展议题的关注度不断提高。一系列针对可持续发展提出的概念、理论和方法正用于模拟人与自然系统耦合作用所带来的生态环境影响和效应。其中,“资源环境承载力”这一概念涵盖资源、环境、生态、灾害、社会、经济等多维度内涵:在资源维度,承载力指资源供给环境系统与人类需求的能力;在环境维度,承载力指污染物稀释和自我净化的良好环境质量维持功能;在生态维度,承载力是为人类生存提供供给、调节、文化、支持服务的能力;在社会经济维度,承载力是自然资源与环境对人类及其社会经济活动承载的强度、范

围及相关阈值,在阈值体系之内,资源环境系统不至于发生显著的退化或崩溃。另外,从灾变响应的角度,也有灾害承载力的概念,是区域包括资源环境在内的承灾系统对于自然灾害的整体抗御能力(张明媛等, 2008; 刘朝峰等, 2011)。因此,理清资源环境承载力不同维度的内涵对于生态系统管理、环境保护、区域发展、环境变化的响应与适应等多学科领域或政策服务尤为重要。

通常从森林、海洋、矿产资源及土地利用等生态或环境系统不同方面探讨自然或城市生态系统的承载能力。本文通过检索主题“Carrying Capacity”并含“Resource”和“Environment”的中英文文献,对共计7495篇进行了计量分析,结果显示:近10年对于资源环境承载力的研究论文逐年增加,从2007年共计444篇增加至2017年903篇。其中水资源承载力、生态承载力、水环境承载力、指标体系等研究主题,以及如系统动力学、生态足迹等方法,占据关键词的主导位置。随着研究体系和研究方法的发

收稿日期:2017-12-12;修订日期:2018-01-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02);国家重点研发计划重点专项(2016YFC0501601)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02; National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0501601]。

通讯作者:吕一河(1974-),男,研究员,主要从事生态恢复及景观生态研究,E-mail: lyh@rcees.ac.cn。

引用格式:吕一河,傅微,李婷,等. 2018. 区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1): 130-138. [Lv Y H, Fu W, Li T, et al. 2018. Progress and prospects of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment[J]. Progress in Geography, 37(1): 130-138.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.014

展,相关研究集中在资源环境承载力概念内涵细化、评价指标体系的完善和扩展、不同区域或对象的应用实践,以及相关领域研究方法的统筹等方面。资源环境承载力在单要素承载力和综合承载力方面均有较大进展。从研究内容上来看,单要素资源环境承载力正向着时间和空间维度的深化方向拓展。根据承载主体、对象、研究尺度的不同,进一步细化了承载力各个层面、各个尺度的研究内容,包括地下水承载力、土壤水承载力(Liu et al, 2015)、植被承载力(Feng et al, 2016)、城市承载力(Wei et al, 2016)等。多要素的资源环境综合承载力正向着广度延伸和交互性拓展等方面发展。例如,国内外学者重点关注资源环境的输送、转移和互利互生作用,在不同的国家或区域从区域格局、跨区域影响与耦合(海洋内陆)以及城市群发展等方面展开资源环境综合承载力研究(Xu et al, 2011; Strassburg et al, 2014; Martire et al, 2015)。

随着上述研究的开展,对于资源环境承载力的研究手段及方法不断完善。但由于研究需求或侧重点的不同,对各类型承载力概念尚存在界定不清、分类不明等问题,从而给区域资源环境综合承

载力整合研究带来困难。因此,本文结合重点研究文献,根据承载力要素,对各类型承载力的内涵进行了梳理(表1)。在此基础上,以区域资源环境综合承载力评价指标体系的发展现状、人地关系的调适、综合研究方法以及时空动态研究为重点,整合了当前国内外相关研究热点及主要实践及应用,旨在为国内相关研究提供参考和借鉴。

2 国内外研究前沿

资源环境综合承载力研究中,综合性与区域性、人地关系是支撑其发展的重要理论框架。如何构建综合的评价体系使之更具备研究和实践的应用价值是近年来探寻的热点。当前,对资源环境综合承载力的研究前沿主要体现在以下几方面:①资源环境承载力评价指标体系的扩展及综合性;②资源环境综合承载力与人地关系的调适;③综合研究方法在相关研究领域的应用;④资源环境承载力的时空动态。

2.1 资源环境承载力评价指标体系的扩展及综合性

目前,资源环境综合承载能力研究中指标体系

表1 主要型承载力类型的内涵

Tab.1 Connotations of various types of carrying capacity

承载力要素		承载力内涵	细化方向
资源承载力	土地资源	一定时期内,一定区域的社会、经济、生态环境条件下,土地资源所能承载人类各种活动的规模和强度的阈值(彭文英等, 2015)。	城市土地承载力、耕地承载力、森林承载力
	水资源	在一定经济社会和科技发展水平条件下,以生态、环境健康发展和社会经济可持续发展协调为前提,区域水资源系统能够支撑社会经济可持续发展的合理规模(段春青等, 2010)。	湿地承载力、渔业资源承载力、地下水承载力
	矿产资源	在一个可预见的时期内,在当时的科学技术、自然环境和社会经济条件下,矿产资源的经济可采储量(或其生产能力)对社会经济发展的承载能力(王奎峰等, 2016)。	煤炭资源承载力、矿产资源安全承载力
	旅游资源	一定时期内,在可持续发展的标准下,生态旅游目的地的自然环境、社会经济环境和生态旅游资源对于开展生态旅游活动的容纳或支持能力(杨倩等, 2015)。	海滩资源承载力、自然保护区生态承载力、旅游资源空间承载力
	土壤水	在土壤中水、肥、气、热相互协调的前提下,一个地区土壤水资源供需协调的综合能力(Lazcano et al, 2014)。	土壤水含量承载力、耕地土壤水资源承载力
	植被	某一区域的某种植物在生命期的1至多年内,在现有的条件下,以维护水分生态良性循环和可持续发展为前提,当地土壤水分中雨水的补给量可支撑的植物群落健康生产或生长的最大数量(王延平等, 2012)。	土壤水分植被承载力、植被碳承载力
环境承载力	水环境	某一区域某一时期内,特定社会生产条件及经济发展水平下,以水为核心的资源环境有机整体在自身结构、功能不受破坏的前提下所能提供的承载人类社会活动的的能力(马巾英, 2015)。	河湖环境承载力、水产养殖环境承载力
	大气环境	在某一时期、某一区域,环境对人类活动所排放大气污染物的最大可能负荷的支撑阈值(徐大海等, 2013)。	大气环境容量、大气环境安全承载力
	土壤环境	在维持土壤环境系统功能结构不发生变化的前提下,其所能承受的人类作用在规模、强度和速度上的限值(Jiang et al, 2016)。	土壤环境容量、铅承载力、畜牧业环境承载力
	地质环境	一定条件下地质环境所能承受人类活动的影响与改变的最大支持能力(王奎峰等, 2015)。	生态地质环境承载力、山地环境承载力

包含内容愈加广泛。根据承载对象的不同,研究者从经济、社会、环境和资源条件等方面进行不同目标层或要素层的设定。例如,针对大型煤矿矿区,吴良兴(2009)以综合评价法为手段,通过分析研究区的资源环境现状,构建矿区资源环境承载力评价指标体系,包括矿产资源、水资源、土地资源、林业资源、旅游资源、大气环境、水环境、土壤环境8个方面;并选取了储采比、人均煤炭资源占有量、人均耕地面积占有量、森林覆盖率、单位面积年客流量、CO₂年排放总量、COD排放总量、工业固废处置利用率等20个主要评价指标,评价其资源环境承载力水平。姚治华等(2010)基于地质环境承载力的概念,从资源、环境、调节和社会经济四个方面构建了地质环境承载力评价指标体系,借助基于熵值—AHP的集对分析模型评价大庆市地质环境承载力。针对近海环境,Lin等(2011)在中国转型发展迅速的环渤海地区的13个城市,选取水资源、大气、地表水和近海环境四大要素,通过整合的综合指数来定量表征资源环境承载力。上述研究,体现了资源环境承载力评价指标体系的构建正向着综合性、区域性和广泛性的方向发展。

2.2 资源环境综合承载力与人地关系的调适

城市发展与资源环境承载力的交互是人地关系的典型表现形式。近年来,城市发展的超承载力问题已呈蔓延趋势,如何为城市居民提供优质生活环境已成为城市规划和管理者的重大挑战。Wang S P等(2017)建立了沿海地区污染源、汇、运移及转换等自然关系的综合定量评价指标体系,明确了21个控制因素中的5个高级别控制因子(分别为污水排除、家畜生产、氨氮排放、河流径流和废水处理),研究揭示了青岛资源环境的超载现象,并提出未来缓解人地矛盾的环境修复任务,包括扩大公共污水处理系统、增加污水处理量、调整产业结构以减少排污和扩大绿地面积;同时,还应实施陆源污染物减量和人工堤防清淤、自然海岸线修复等流域修复工程。新型城镇化过程及资源环境承载力预警能为区域发展提供决策依据。通过构建城镇化过程中资源环境承载力响应关系指标体系,运用响应指数和响应度识别出两者关系演变过程的主要因素,刘凯等(2016)提出将环境规制作为产业结构调整的动力,在环境规制下调整产业结构是促进城镇化与资源环境承载力协调发展主要方向。Jiang等(2017)

利用压力、承载、转化三维指标,对8个海洋工业园区的资源环境承载力进行评估,结论为大多数园区承载力状态低于区域实际承载力,在此基础上探讨了调控方向:环保状况较差的工业园区,需集中精力提高资源利用效率、缓解生态环境压力,而省市级政府亟需出台相关政策法规,保障海洋高效产业园区发展。当前,关于资源环境综合承载力的人地关系研究表明,各级政府在统筹区域发展和承载力关系中发挥着重要作用,通过调整产业结构、推进资源优化配置、合理引导城市规划能为维持和提升区域资源环境综合承载力发挥关键作用。

2.3 资源环境综合承载力的研究方法进展

综合研究理论与方法的兴起,推动了资源环境承载力模型研究的发展。层次分析法、主成分分析法以及DPSIR(驱动—压力—状态—影响—响应)等分析框架和概念模型在文献中使用频率较高。综合的定量评价方法包括:生态足迹法(David et al, 2015)、能值分析法(Peng et al, 2016)、系统动态模型(Gong et al, 2009; Meng et al, 2009)等。由于国内外广泛采用的生态足迹法贸易数据的缺乏,无法准确地测算出资源能源输入输出量(张可云等, 2011)。为解决这一问题,Ewing等(2012)建立了多区域输入输出建模框架(multi-regional input-output, MRIO),采用矩阵结构提高了研究框架透明度,整合并连接了碳足迹、水足迹和生态足迹三项指标,结果表明:通过与碳足迹核算方法的协调、全球经济部门供应链和国际贸易流程的清晰表达,能显著改进水足迹和生态足迹的核算,使得评估结果更加可靠。张可云等(2011)采用生产性生态足迹的测算方法分析比较中国31个省(市、区)生态承载力,并讨论区域间生态破坏转移问题,可为实现区域协调发展提供决策参考。在系统动态模型方面,由于系统动力模型将土地看作一个动态系统,运用动力学的基本原理,从整体上分析人口、资源、环境和发展之间的关系,是近年来评估资源环境综合承载力的热点方向(Wang C H et al, 2017)。通过建立系统动力模型,能够模拟不同策略下人口变化与承载潜力之间的动态关系,从而在政策层面指导社会经济活动,已广泛应用于区域经济、城市和城镇化、自然资源与生态系统管理及环境规划管理等领域。例如,对北京城市湿地资源进行分析和预测时,研究者根据12个核心变量,建立系统动力模型模拟北京市2006-

2030年人口、经济、供水和需求变化趋势以及水环境压力,并由此提出了5个优化案例以改善区域湿地资源承载力(Wang C H et al, 2017)。

此外,近年来研究者在承载力预警方面引入了生态系统服务评估、信息论等方法,丰富了资源环境综合承载力的预警研究。例如,徐卫华等(2017)从预警角度提出区域生态承载力评价的内容与方法,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,作为预警指标进行评估,由此在京津冀地区开展案例研究,并为划定区域生态保护红线、生态恢复工程以及长效监测考核和生态补偿机制提供对策建议。为有效评估农村公共环境安全承载力风险水平和发展趋势,Huang等(2018)提出了基于风险熵的环境承载力评估模型:构建遗传投影寻踪模型,将风险值与时间序列拟合,运用信息扩散论将各样本风险值划分为不同等级,采用风险熵的计算方法评估了农村环境承载力。通过汶川县实证分析表明,遗传投影寻踪方法能进行多维数据的有效一维投影,并全面反映农村环境承载力风险;不同的风险等级能反映各级农村环境承载力面临风险的可能性,可为决策者提供参考;而风险熵的评估较为准确地反映了农村环境承载力系统的异常水平,为风险预警提供了可信参考。上述模型的构建和方法的运用,可为相关部门有效预测环境承载力及风险预测提供及时的参考和借鉴。

2.4 资源环境综合承载力的时空动态研究

当前,综合资源环境承载力时空动态研究呈现出长期监测结果与多因子预测相融合的研究趋势。采用基于时间序列的因子分析方法表明:不同区域的综合承载力呈现出动态变化区域及空间分异特征。Liu等(2012)对长江三角洲16座城市不同时期的城市聚集区主要影响因素进行了资源环境综合承载力评价,表明承载力在空间上呈显著的梯度变化:上海、苏州、杭州、宁波等发达城市面临较高的承载力压力;在时间维度,变异系数呈明显扩大趋势:2000年到2008年,土地及水资源承载力已成为制约社会经济发展的两大关键因素。此外,相对资源承载力模型突出了自然资源与经济资源的优势和劣势之间的互补性,被广泛用于区域资源环境综合承载力时空动态实证分析,成为评价区域可持续发展的重要标准(黄常锋, 2011)。例如,李旭东(2013)运用并改进了相对资源承载力计算方法,研

究1995-2006年贵州乌蒙山区自然资源、经济资源、生活水平的相对承载力和综合承载力的时空动态变化过程,结果表明,山区大部分县域综合承载力长期处于超载状态,且随着时间的变化,综合资源承载力超载的县域在动态变化上具有一定的稳定性,该项研究对于统筹区域发展规划、协调山区人口、经济发展与资源利用的关系具有重要指导意义。

3 研究应用

3.1 国土空间开发及特定区域选址

资源环境承载力评价是引导资源空间配置向可持续性转变的重要依据,可具体支撑如生态红线、城镇开发边界三条控制线划定、国土空间整治与优化等应用需求(Wang et al, 2016)。其中,生态红线划定基于资源环境承载力评价的结果,并与生态脆弱性、生态系统服务功能评价、自然生态风险等相结合,划定不同等级的生态红线区。同时,资源环境承载力研究广泛应用于自然保护区和国家公园的设计、选址及布局。例如,Navarro Jurado等(2013)将海岸带自然保护区承载力与旅游者数量建立关系,识别了沿海旅游地的社会承载能力,从而为缓解游客超载带来的负面影响提供建议;Salerno等(2013)将国家公园与缓冲区水、土壤资源环境承载力联合研究,为旅游区选址规划及后续管理提供支持。上述相关研究方法充分考虑了研究对象现状和规划管理的适宜性。

3.2 产业规划

目前,服务于产业规划的资源环境承载力研究主要分为两类:一是资源环境承载力约束条件下的产业规划研究,包括产业规模调整、产业布局、产业结构调整和产业转移,如从提高经济效益角度提出产业布局的优化措施(邬娜等, 2015);建立基于环境承载力的产业结构升级与空间优化关系,促进环境保护与经济发展互利平衡的实现(Zhou et al, 2017)。另一类是产业发展对资源环境承载力的影响研究,包括产业生态足迹和产业资源环境影响评价。例如,通过区域工业发展模式和环境承载力之间的关系辨识,评估未来工业水污染压力的空间分布,为污染控制与区域环境承载能力协调适应提供可选的排放控制策略(Zhao et al, 2009; Li et al, 2016);通过对经济、社会、潜力和环境4个维度对国家层面的

能源资源承载力的可再生利用评估,服务于产业空间结构的优化分析(Martire et al, 2015)。随着新兴产业的发展,未来研究将侧重新兴产业发展的资源研究、特殊环境要求或新型环境影响研究以及循环经济所带来的资源承载力变动等问题(钟维琼等, 2016)。

3.3 灾后重建

资源环境承载力评价是灾后恢复重建规划的基础和重建工作的前提。2008年汶川大地震发生后,国务院将资源环境承载能力评价作为恢复重建规划的一项基础性工作,评价结果作为灾后重建规划的重要依据。至此,资源环境承载力从满足国家重大战略需求出发,开发综合集成评价技术,评价结果被相关国家规划直接采纳(樊杰, 2010; Gao et al, 2011)。在进行灾后重建资源环境承载力评价时,需选取具有区域典型性的评价指标,将通适性指标和特征性指标相结合,在情景模拟时应充分估计地域系统的开放性,将固定性指标和流动性指标相结合(樊杰, 2013)。例如,在汶川地震灾区(Gao et al, 2011)、青海省玉树地震灾区(樊杰, 2010)等重建规划工作中,以综合承载力指数排序和承载人口数量测算为主要目标,制定了“确定可承载的人口总规模,提出适宜人口居住和城乡居民点建设的范围以及产业发展导向”的目标任务;通过集成运用遥感与实地应急评估,比较分析灾前和灾后承载力变化;并采用自然地理条件、次生灾害危险性、社会经济发展基础等大类指标,综合评估了自然本底和开发现状交互关系的灾区综合承载力。

3.4 资源环境承载力监测及预警

承载力监测预警机制的建立,成为全面深化生态文明体制改革的一项重大任务(樊杰等, 2017)。作为生态文明体制改革总体方案的一项重要举措,国土资源的监测预警是综合资源环境承载力研究的切入点和落脚点。通过资源环境综合承载力研究能因地制宜地制定差异化、可操作的管控制度,并由此规范空间开发秩序,合理控制空间开发强度。最新版的资源环境承载力预警体系以县级行政区为评价单元,分为陆域评价和海域评价;采取“短板效应”原理确定资源环境超载程度的3种类型,并结合资源环境耗损过程评价划分为5个预警等级,通过陆海统筹校验最终形成资源环境承载力“三类五级”评价方案(樊杰等, 2017)。在小尺度水

平的资源环境承载力预警评价中,从区级和街道级两个层次构建了资源环境承载力预警评价指标体系,对资源环境承载力整体-局部的分配问题进行了探索与解答(叶有华等, 2017)。

4 研究展望

当前,国内外资源环境承载力研究取得了丰硕的成果。然而,对处于中等尺度的区域,自然资源与环境、经济社会发展的交互作用非常复杂,具有时间动态性和空间分异性,而且同时受到跨尺度因素的影响,使得资源环境承载力的研究仍然面临着严峻挑战,还需在以下方面进行深化:

(1) 与生态文明建设的新形势紧密结合,进行承载力研究内容的开拓创新

全球范围内生态保护与修复、可持续发展等在学术界和管理领域的关注度日益提高。联合国提出了面向2030年的可持续发展目标体系,成为各国努力的方向。中国已将推进生态文明建设作为重要国家发展战略之一,加大自然生态系统和环境保护力度、优化国土空间开发格局、加强生态文明制度建设等重要内容的落实,均需要资源环境承载力研究的有效支撑。20世纪90年代末以来,国家开展了一系列重大生态保护和建设工程(如天然林保护、退耕还林还草等),推动区域生态环境发生了显著变化。例如,随着退耕护岸林(草)工程成效的不断显现,黄土高原成为近年来中国植被恢复最显著的地区。然而,面对区域环境变化的新形势,必须开展资源环境承载力的综合研究,揭示社会经济需求和自然生态需求相结合的承载力阈值范围,以防范风险、促进区域可持续发展(Feng et al, 2016)。

(2) 完善评价指标体系,创新承载力研究方法评价指标体系。资源环境承载力评价指标涉及资源、环境、生态、社会经济等诸多系统,不同系统的评价指标之间又相互影响、相互制约。因此,如何更好的融合物质、能量、信息、空间和时间五位一体的方法将成为承载力研究必须关注和解决的问题(曾晨等, 2011)。构建差异化指标体系对不同区域的资源环境承载力进行科学认知不失为合理且具有效率的研究方法,各系统之间模糊界面的影响分析、相互关系和独立性,以及承载力的时间动态性等也值得进一步深入研究(Wang et al, 2015)。此

外,随着大数据、数据分发与共享、GIS等软件的普及和广泛使用,面向资源环境承载力的大数据管理、数据挖掘、综合评价和模拟模型构建、决策支持工具开发等也是需要加强的重点方向。

(3) 需更加重视资源环境承载力的时间动态和空间相互作用。随着全球化的发展,不同尺度之间关联研究和不同区域之间的资源环境相互作用不断加强,远程关联与耦合(Tele-connection 和 Tele-coupling)的问题成为生态环境领域研究的一大前沿和热点。例如,流域尺度与城市尺度的研究承载力结论存在差异,只有明确承载力的范围选择,考虑城市与流域资源环境的关联,加强流域尺度与城市尺度的融合研究,才能更准确的评价承载力(Nakayama et al, 2010; Zhang et al, 2014)。同时,自然资源处于持续变化中,使得承载体表现为动态性;而人类生产生活活动的内容、规模持续变化也使得承载对象表现出更强烈的动态性。因此,不同尺度不同范围内各系统要素之间存在内在的相互作用与关联、动态变化,在人类的技术和组织管理水平进步的背景下,都将会带来承载弹性的提升。因此,考虑资源环境承载力时间动态、空间互动及时空耦合下的适应性综合研究也成为未来研究的难点和前沿科学问题。

参考文献(References)

段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 2010. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 65(1): 82-90. [Duan C Q, Liu C M, Chen X N, et al. 2010. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method[J]. Acta Geographica Sinica, 65(1): 82-90.]

樊杰. 2010. 玉树地震灾后恢复重建: 资源环境承载能力评价[M]. 北京: 科学出版社. [Fan J. 2010. National earthquake reconstruction planning in Yushu: Resources environment carrying capacity evaluation[M]. Beijing, China: Science Press.] (未找到本条文献英文信息, 请核对)

樊杰. 2013. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局[J]. 中国科学院院刊, 28(2): 193-206. [Fan J. 2013. The strategy of major function oriented zoning and the optimization of territorial development patterns[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 28(2): 193-206.]

樊杰, 周侃, 王亚飞. 2017. 全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J]. 地理科学进展, 36(3): 266-276. [Fan J, Zhou K, Wang Y F. 2017. Basic points and

progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016)[J]. Progress in Geography, 36(3): 266-276.]

黄常锋, 何伦志. 2011. 相对资源承载力模型的改进及其实证分析[J]. 资源科学, 33(1): 41-49. [Huang C F, He L Z. 2011. Model modifications and empirical analysis of the relative carrying capacity of resources[J]. Resources Science, 33(1): 41-49.]

李旭东. 2013. 贵州乌蒙山区资源相对承载力的时空动态变化[J]. 地理研究, 32(2): 233-244. [Li X D. 2013. Temporal-spatial analysis of the relative carrying capacity of population and resources in Wumeng mountainous areas of Guizhou[J]. Geographical Research, 32(2): 233-244.]

刘朝峰, 苏经宇, 王威, 等. 2011. 区域地震灾害承载力评价的突变模型[J]. 中国安全科学学报, 21(11): 8-15. [Liu C F, Su J Y, Wang W, et al. 2011. Catastrophe model for evaluating regional earthquake-disaster-carrying capability[J]. China Safety Science Journal, 21(11): 8-15.]

刘凯, 任建兰, 张理娟, 等. 2016. 人地关系视角下城镇化的资源环境承载力响应: 以山东省为例[J]. 经济地理, 36(9): 77-84. [Liu K, Ren J L, Zhang L J, et al. 2016. Urbanization's resource environmental bearing capacity response from man-land relationship perspective: Take Shandong province as an example[J]. Economic Geography, 36(9): 77-84.]

马巾英. 2015. 东江湖库区水环境承载力评价及协调发展研究[J]. 经济地理, 35(11): 184-189. [Ma J Y. 2015. Dongjiang lake reservoir area' evaluation of water environmental carrying capacity and the research of the coordinated development[J]. Economic Geography, 35(11): 184-189.]

彭文英, 刘念北. 2015. 首都圈人口空间分布优化策略: 基于土地资源承载力估测[J]. 地理科学, 35(5): 558-564. [Peng W Y, Liu N B. 2015. Optimization strategy of population distribution in capital metropolitan region: Based on land resources carrying capacity evaluation[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(5): 558-564.]

王奎峰, 韩祥银, 王岳林, 等. 2016. 山东半岛矿产资源承载力及保障程度研究[J]. 地质调查与研究, 39(1): 47-55. [Wang K F, Han X Y, Wang Y L, et al. 2016. Study on the mineral resource carrying capacity and protection degree in Shandong Peninsula[J]. Geological Survey and Research, 39(1): 47-55.]

王奎峰, 李娜. 2015. 基于AHP和GIS耦合模型的山东半岛地质环境承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 25(5):

- 224-227. [Wang K F, Li N. 2015. Evaluation of geo-environmental carrying capacity in Shandong Peninsula based on AHP and GIS coupling model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 25(5): 224-227.]
- 王延平, 邵明安. 2012. 陕北黄土丘陵沟壑区人工草地的土壤水分植被承载力[J]. *农业工程学报*, 28(18): 134-141. [Wang Y P, Shao M A. 2012. Vegetation soil water carrying capacity of artificial pasture in loess region in northern Shaanxi, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(18): 134-141.]
- 邬娜, 傅泽强, 谢园园, 等. 2015. 基于生态承载力的产业布局优化研究进展述评[J]. *生态经济*, 31(5): 21-25. [Wu N, Fu Z Q, Xie Y Y, et al. 2015. Review on the research progress of industrial layout optimization based on ecological carrying capacity[J]. *Ecological Economy*, 31(5): 21-25.]
- 吴良兴. 2009. 大型煤矿矿区的资源环境承载力研究[D]. 西安: 西北大学. [Wu L X. 2009. Research on the carry capacity of resources and environment for the large-scale coal mining area[D]. Xi'an, China: Northwest University.]
- 徐大海, 王郁. 2013. 确定大气环境承载力的烟云足迹法[J]. *环境科学学报*, 33(6): 1734-1740. [Xu D H, Wang Y. 2013. Plume footprints analysis for determining the bearing capacity of atmospheric environment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 33(6): 1734-1740.]
- 徐卫华, 杨琰瑛, 张路, 等. 2017. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究[J]. *地理科学进展*, 36(3): 306-312. [Xu W H, Yan Y Y, Zhang L, et al. 2017. Evaluation methods and case study of regional ecological carrying capacity for early-warning[J]. *Progress in Geography*, 36(3): 306-312.]
- 杨倩, 蒙古军, 王晓东. 2015. 基于多维状态空间法的漓江上游生态旅游承载力空间评价及提升策略[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 51(1): 131-140. [Yang Q, Meng J J, Wang X D. 2015. Space differential evaluation and promotion strategy of ecotourism carrying capacity of upper reaches of Lijiang River based on the multi-level state space approach[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 51(1): 131-140.]
- 姚治华, 王红旗, 郝旭光. 2010. 基于集对分析的地质环境承载力研究: 以大庆市为例[J]. *环境科学与技术*, 33(10): 183-189. [Yao Z H, Wang H Q, Hao X G. 2010. Evaluation of geological environment carrying capacity based on set pair analysis: A case study in Daqing[J]. *Environmental Science & Technology*, 33(10): 183-189.]
- 叶有华, 韩宙, 孙芳芳, 等. 2017. 小尺度资源环境承载力预警评价研究: 以大鹏半岛为例[J]. *生态环境学报*, 26(8): 1275-1283. [Ye Y H, Han Z, Sun F F, et al. 2017. Early-warning for environmental and resource carrying capacity on small scale: A case study of Dapeng Peninsula, Guangdong[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(8): 1275-1283.]
- 曾晨, 刘艳芳, 张万顺, 等. 2011. 流域水生态承载力研究的起源和发展[J]. *长江流域资源与环境*, 20(2): 203-210. [Zeng C, Liu Y F, Zhang W S, et al. 2011. Origination and development of the concept of aquatic ecological carrying capacity in the basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 20(2): 203-210.]
- 张可云, 傅帅雄, 张文彬. 2011. 基于改进生态足迹模型的中国31个省级区域生态承载力实证研究[J]. *地理科学*, 31(9): 1084-1089. [Zhang K Y, Fu S X, Zhang W B. 2011. Ecological carrying capacity of 31 provinces based on improved ecological footprint model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 31(9): 1084-1089.]
- 张明媛, 袁永博, 周晶. 2008. 城市灾害相对承载力分析与模型的建立[J]. *自然灾害学报*, 17(5): 136-141. [Zhang M Y, Yuan Y B, Zhou J. 2008. Analysis and modeling of urban relative disaster-bearing capacity[J]. *Journal of Natural Disasters*, 17(5): 136-141.]
- 钟维琼, 代涛, 高湘昀. 2016. 产业发展与资源环境承载力研究综述[J]. *资源与产业*, 18(6): 74-80. [Zhong W Q, Dai T, Gao X Y. 2016. Research overview of industrial development and resource environment carrying capacity[J]. *Resources & Industries*, 18(6): 74-80.]
- David G S, Carvalho E D, Lemos D, et al. 2015. Ecological carrying capacity for intensive tilapia (*Oreochromis niloticus*) cage aquaculture in a large hydroelectrical reservoir in Southeastern Brazil[J]. *Aquacultural Engineering*, 66: 30-40.
- Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, et al. 2012. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework[J]. *Ecological Indicators*, 23: 1-8.
- Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. 2016. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 6(11): 1019-1022.
- Gao X L, Chen T, Fan J. 2011. Analysis of the population capacity in the reconstruction areas of 2008 Wenchuan Earth-

- quake[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 21(3): 521-538.
- Gong L, Jin C L. 2009. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources[J]. *Water Resources Management*, 23(12): 2505-2513.
- Huang X, Bai H. 2018. Risk prediction of rural public security environmental carrying capacity based on the risk entropy [J]. *Natural Hazards*, 90(1): 157-171.
- Jiang D K, Chen Z, Dai G L. 2017. Evaluation of the carrying capacity of marine industrial parks: A case study in China [J]. *Marine Policy*, 77: 111-119.
- Jiang H, Ma Y H, Wang Q, et al. 2016. Reviews on soil environmental capacity and carrying capacity[J]. *Agricultural Science & Technology*, 17(1): 217-222.
- Lazcano C, Barrios-Masias F H, Jackson L E. 2014. Arbuscular mycorrhizal effects on plant water relations and soil greenhouse gas emissions under changing moisture regimes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 74: 184-192.
- Li N, Yang H, Wang L C, et al. 2016. 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*, 112: 4594-4604.
- Lin L, Liu Y, Chen J N, et al. 2011. Comparative analysis of environmental carrying capacity of the Bohai Sea Rim area in China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 13 (11): 3178-3184.
- Liu B X, Shao M A. 2015. Modeling soil - water dynamics and soil - water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 159: 176-184.
- Liu H M. 2012. Comprehensive carrying capacity of the urban agglomeration in the Yangtze River Delta, China[J]. *Habitat International*, 36(4): 462-470.
- Martire S, Castellani V, Sala S. 2015. Carrying capacity assessment of forest resources: Enhancing environmental sustainability in energy production at local scale[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 94: 11-20.
- Meng L H, Chen Y N, Li W H, et al. 2009. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 19(1): 89-95.
- Nakayama T, Sun Y, Geng Y. 2010. Simulation of water resource and its relation to urban activity in Dalian City, northern China[J]. *Global and Planetary Change*, 73(3-4): 172-185.
- Navarro Jurado E, Damian I M, Fernández-Morales A. 2013. Carrying capacity model applied in coastal destinations[J]. *Annals of Tourism Research*, 43: 1-19.
- Peng J, Du Y Y, Liu Y X, et al. 2016. How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems[J]. *Ecological Indicators*, 60: 1017-1030.
- Salerno F, Viviano G, Manfredi E C, et al. 2013. Multiple carrying capacities from a management-oriented perspective to operationalize sustainable tourism in protected areas[J]. *Journal of Environmental Management*, 128: 116-125.
- Strassburg B B N, Latawiec A E, Barioni L G, et al. 2014. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil[J]. *Global Environmental Change*, 28: 84-97.
- Wang C H, Hou Y L, Xue Y J. 2017. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: Analysis of policy optimization for urban wetland water resources management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 161: 1180-1191.
- Wang L Y, Li F X, Gong Y, et al. 2016. A quality assessment of national territory use at the city level: A planning review perspective[J]. *Sustainability*, 8(2): 145.
- Wang S P, Li K Q, Liang S K, et al. 2017. An integrated method for the control factor identification of resources and environmental carrying capacity in coastal zones: A case study in Qingdao, China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 142: 90-97.
- Wang T X, Xu S G. 2015. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application[J]. *Ecological Indicators*, 52: 134-146.
- Wei Y G, Huang C, Li J, et al. 2016. An evaluation model for urban carrying capacity: A case study of China's mega-cities[J]. *Habitat International*, 53: 87-96.
- Xu S N, Chen Z Z, Li C H, et al. 2011. Assessing the carrying capacity of tilapia in an intertidal mangrove-based polyculture system of Pearl River Delta, China[J]. *Ecological Modelling*, 222(3): 846-856.
- Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, et al. 2014. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process[J]. *Eco-*

- logical Modelling, 275: 9-21.
- Zhao N, Liu Y, Chen J N. 2009. Regional industrial production's spatial distribution and water pollution control: a plant-level aggregation method for the case of a small region in China[J]. *Science of the Total Environment*, 407 (17): 4946-4953.
- Zhou X Y, Lei K, Meng W, et al. 2017. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 165: 1462-1472.

Progress and prospects of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment

LV Yihe^{1,2*}, FU Wei¹, LI Ting^{1,2}, LIU Yuanxin¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Science, CAS, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The integrated carrying capacity of regional resource and environment systems is an important foundation for the harmonious and sustainable development of the human-environment system, and thus has become a hot topic of integrated physical geography research. Great progress has been made in the study on the carrying capacity of regional integrated resource and environment systems. The main achievements include the establishment of a comprehensive and extensive evaluation index system, a focus on the coordination of human-environment relationships, development and application of comprehensive research methods, and a focus on the spatial and temporal dynamics of the integrated carrying capacity of resource and environment systems. At present, study on integrated carrying capacity of resource and environment systems are applied to regional economic development program management, such as spatial development, industrial planning, post-disaster reconstruction, and resource and environment monitoring and early warning. Future research, however, still needs to improve the evaluation index system and strengthen research on appropriate scale of analyses and dynamic changes of the integrated carrying capacity of resource and environment systems, in order to deepen the theoretical and empirical studies of integrated physical geography. This will provide supports for the research on the sustainability of regional resources, society, and ecological environment.

Key words: carrying capacity of resource and environment system; integrated carrying capacity; sustainable development; progress; outlooks