

# 基于共轭角力机制的区域资源环境 综合承载力评价模型

黄贤金, 宋娅娅

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

**摘要:**厘清区域资源环境与生产生活要素的相互作用机制,探索区域资源环境承载力的内生机制与评价模型,对支撑国土空间规划编制乃至战略实施具有重要理论和实践意义。基于“压力—状态—响应”模型思路,提出区域资源环境与生产生活要素的“共轭角力”理论机制,将资源环境承载力解构为“支撑力—敏感点”“恢复力—脆弱点”“损害力—临界点”“发展力—平衡点”四对相互作用力,并据此提出集开发建设、环境灾害、资源生态及社会福祉四个维度的DENS评价模型,为科学地揭示资源环境承载力的理论特征提供借鉴。

**关键词:** 资源环境承载力;人地地域系统;共轭角力机制;DENS模型

资源环境承载力是区域发展战略决策尤其是国土空间优化布局的基础,近年来在指导区域可持续发展<sup>[1-2]</sup>、国土空间规划<sup>[3-4]</sup>、城镇化建设<sup>[5-6]</sup>、灾后重建规划<sup>[7-8]</sup>、产业规划<sup>[9]</sup>等领域发挥了举足轻重的作用。

承载力是认知区域人地关系的重要工具,随着人地关系的变化,人们对于承载力的认知也不断深化。这一思想最早可追溯到马尔萨斯时代,马尔萨斯在《人口原理》中提出资源的有限性及对人口增长的限制;1921年生态学家帕克和伯吉斯首次明确提出了承载力的概念,即特定环境条件下某种类个体存在数量上限;之后承载力研究范围迅速扩展到了整个生态系统,研究目的由种群平衡延伸到社会决策。20世纪60年代开始,一系列专家学者围绕土地资源、水资源等单要素开展了一系列承载力研究,随后逐渐扩展到环境承载力以及多要素综合承载力。概念不断丰富和完善,逐渐演变为反映资源环境本底和经济社会活动间交互程度的科学度量<sup>[1,10-11]</sup>。作为生态学、地理学、资源环境科学等学科的研究热点和理论前沿,资源环境承载力研究探讨人类及其社会经济活动与资源环境协调发展的科学问题<sup>[12-13]</sup>,到20世纪70年代步入系统发展时期,统一的理论基础和方法体系尚未完全成形,有关承载力基础理论与实践依据的争论仍时有发生<sup>[14-16]</sup>。Rockstrom等<sup>[17]</sup>提出“行星边界理论(Planetary boundaries framework)”,从土地系统变化、淡水利用、大气环境演变等九个关键维度刻画了人类活动导致的环境影响并据此勾勒出全球尺度下人类活动的环境承载预警边界,其理论进一步传承并发展了资源环境承载力理论,并在全球可持续发展的背景下赋予了其新内涵<sup>[18]</sup>。综合已有研究成果,将资源环境承载力定义为在一定时期经济社会发展水平下,以资源合理开发利用、环境有效保护、人地协调发展为准则,特定区域的地域系统对人口和经济社会发展的支撑能力。

收稿日期: 2019-06-20; 修订日期: 2019-08-27

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(17ZDA061); 江苏省国土资源科技项目(2010021)

作者简介: 黄贤金(1968-),男,江苏扬中人,教授,博士生导师,研究方向为资源地理与土地利用。

E-mail: hxj369@nju.edu.cn

承载力也是优化国土空间格局的政策工具。尤其是自中共中央十八届三中全会以来,业已将资源环境承载力作为支撑生态文明建设的重要政策指引。由于承载力具有基础性、有限性、空间可调控性、动态变化性、区域关联性多维特征,在引导构建人与自然和谐的国土空间格局中发挥着重要的参考作用。其基础性表征资源环境承载力评价是合理安排生产、生活、生态用地空间的重要依据,例如在水资源缺乏地区,就表现为“以水定人、以水定产、以水定城”;有限性指明资源环境承载力具有一定的弹性空间和承载限度,当然技术进步以及资源的可替代性有利于改善资源环境要素的稀缺性;空间可调控性表示资源环境可承载的极限值允许区间范围内,资源环境系统具有一定的自我调整与恢复能力,人类亦可通过相应的调控措施应对资源环境的阶段性超载,实现合理承载;动态变化性表示随着区域发展功能定位调整,以及资源环境要素节约集约利用水平提升、技术进步及生产生活方式的改变,资源环境承载力也将产生相应的变化;区域关联性指资源环境承载力水平,与所处区域空间的功能定位及周边区域特征相联系,其承载能力受区域之间的经济社会联系及关键资源环境要素的影响。正因为如此,使得资源环境承载力既具有科学性的特征,也具有“伪命题”的特征。这也从另一个角度说明了人与自然关系的复杂性,以及人地关系科学发展的渐进性。

承载力是特定空间承载体和承载对象相互作用关系的统一,即区域人地关系系统中人地互构的统一,因此,资源环境的可持续承载,不仅意味着资源环境系统自身的可持续性,还意味着对于人类发展系统(包括人口、经济、基础设施等)的支撑能力。例如,灾害空间不仅对于人类社会,其对于资源环境系统也具有弱承载力性。从空间分布上看,我国滑坡灾害高生态风险区面积为13.5万 $\text{km}^2$ <sup>[19]</sup>,不仅造成这一区域生态服务价值的损失,也加剧了人类活动的危险性。因此,作为资源环境系统对开发建设“支撑力”、环境灾害要素“损害力”、资源生态要素“恢复力”以及社会福祉“发展力”的综合体现,仍不失为对区域资源环境系统、经济社会发展系统尤其是人与自然关系定量化并具有较高精准性的诊断。资源环境承载力理论在支撑区域发展乃至“未来地球(Future Earth)”的综合发展决策中亦发挥着重要作用<sup>[20]</sup>。

生态文明以及美丽中国战略的提出,为发挥承载力人地关系系统认知工具、政策工具的作用提供了新的契机。随着城镇化与工业化进程快速推进以及经济社会持续发展,中国国土空间开发利用格局发生明显重构<sup>[21]</sup>,过度依赖高资源消耗与高污染排放的粗放型发展模式亦使区域空间开发失衡、“三生空间”冲突加剧、生态环境破坏严重等问题日趋严峻<sup>[22]</sup>,使得国内学界更加重视资源环境承载力的相关研究。在发展国外资源环境承载力评价的理论与方法基础上,近年来中国学者逐渐开展了以土地<sup>[23-25]</sup>、水<sup>[26-27]</sup>、环境<sup>[28-29]</sup>、生态<sup>[30-31]</sup>等为研究对象的单要素承载力,区域综合承载力<sup>[32]</sup>以及国土开发度与国土空间开发建设适宜性<sup>[33-34]</sup>等相关研究,研究尺度集中于城市<sup>[35]</sup>、城市群<sup>[36]</sup>、省域<sup>[37]</sup>和国家、区域层面<sup>[38]</sup>,研究方法由早期的农业生态区划、供需平衡等静态方法向系统动力学、多目标规划方法等动态转变<sup>[39]</sup>,逐渐开始关注资源环境要素跨区域的隐形流动。但有关资源环境承载力的系统性、综合性研究以及评价模型支撑仍有待进一步提升,尤其在气候变化、新全球化背景下资源环境系统的不确定性以及复杂性(流动)不断加剧;随着经济社会发展进步,人地关系地域系统面临技术革新、人口转型、绿色转型、社会转型的新时代背景,亟须建立综合性的、体现交互作用的、满足多维转型发展需求的资源环境承

承载力评价模型。

综上所述,资源环境承载力评价内涵从单一资源走向各类主要自然资源、环境要素等评价,评价方法不断丰富;评价对象更多地侧重于典型区域、流域。但绝大多数研究多从单一视角开展相关研究,或是测算单一资源的承载力,或是对承载状况进行综合评判,缺乏体现地域特色、多结果输出的综合模型,难以指导地区精细化发展。从发展趋势来看,需要加强资源环境承载力评价的理论创新,揭示区域内、外各类限制性的自然资源及环境要素等之间的多元复合“角力”关系,支撑资源环境承载力评价及预警体系构建,并形成具有指导性的资源环境承载力评价技术标准。

鉴于此,本文从“压力—状态—响应”机理出发尝试提出“共轭角力”机制,以系统描述人地关系地域系统资源环境与生产生活的相互作用机制,进而从开发建设支撑力、环境灾害损害力、资源生态恢复力和社会福祉发展力四个维度构建资源环境承载力评价模型,为国家国土空间规划体系的科学实施提供理论基础与方法支撑。

## 1 基于共轭角力理论的资源环境与生产生活相互作用机理

厘清区域资源环境系统与人类生产生活系统相互作用机理是识别人地地域系统资源环境承载力需求、评估资源环境负载冲突的基本前提。随着人类社会的不断进化,当前我国资源环境和生产生活的相互作用机制不断向广度和深度发展,呈现出资源要素供给的紧缺性日益提升、生态要素脆弱性趋向加剧,环境灾害要素胁迫性持续增强,经济社会系统不断发展导致对资源生态系统的需求愈加多样化等特征。由此,需要基于资源环境承载力重构生产生活新格局。

“轭”是马车行驶时套在马颈上用于拉车的人字形马具,要求左右两轮平衡,车马前后默契。“共轭”是指按照特定规律相互影响、相互制约形成协调发展的局面,从而使整个系统结构相对稳定、要素联系紧密、整体功能协调、对环境适应性强<sup>[40]</sup>,是一种以动态平衡为主要目的控制方法。有研究将其应用到城市土地管理中,协调城市建设用地增长和非建设用地保护、城市土地生态服务正向服务和逆向服务、城市与乡村之间的共轭关系<sup>[41]</sup>。还有研究以共轭理论指导北京市生态规划,以实现社会服务和生态服务、经济生产和自然生产平衡<sup>[42]</sup>。

人地地域关系系统中资源环境和生产生活相互制约、相互影响,其终极目标是追求人—地协调发展,共轭思想可为解决这一目标提供良好的借鉴。“共轭角力”理论,以人地关系地域系统中开发建设需求产生的“支撑力”、环境灾害发生产生的“损害力”、资源生态维持产生的“恢复力”以及社会福祉提升产生的“发展力”为基础,以“四个力”分别量化开发建设、环境灾害、资源生态和社会福祉的变化特征,依据“开发—压力—状态—响应”过程,构建“四力”的共轭角力过程。“临界点”衡量开发建设需求产生的“支撑力”的标准或拐点(土地开发强度、人口集聚度等);“敏感点”衡量环境灾害发生产生的“损害力”的标准或拐点(灾害发生密度、灾害强度等);“脆弱点”衡量资源生态维持产生的“恢复力”的标准或拐点(景观破碎度、生态脆弱性指数、环境容量等);“平衡点”衡量社会福祉提升产生的“发展力”的标准或拐点(人居环境指数、社会网络连通度等);集成“点—力”作用关系(图1),评估不同尺度下人地关系地域



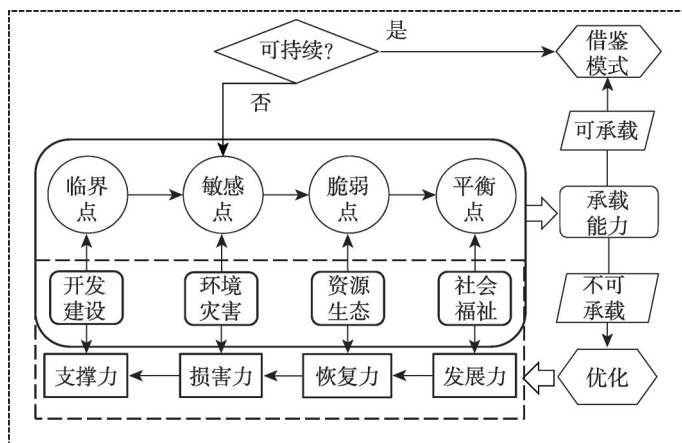


图1 资源环境与生产生活“共轭角力”理论机制

Fig. 1 The conjugation-wrestling theoretical mechanism of resource-environment and production-living factors

系统资源环境与生产生活的负载冲突特征，揭示其相互作用关系。针对“共轭角力”理论所提出的“四个点”，依次基于“四个承载”的核心内涵，结合不同人地地域建设和生产条件、经济社会功能的等主要特征，分析区域资源环境与生产生活的的作用机制。分析步骤如下：

### (1) 识别“共轭角力”机制中“力”

遵循“开发—压力—状态—响应”的资源环境效应分析框架，识别由于资源开发利用需求产生的支撑力，从环境压力（环境污染、自然灾害等）冲击中恢复的需求所形成的恢复力，对本底系统状态维持需求形成挑战的损害力及提升响应能力需求产生的发展力，剖析四种力量的概念内涵和表征因子。具体而言，支撑力由开发建设对土地、水、矿产等各类自然资源的需求而产生；恢复力由生态环境压力冲击中生态系统恢复的需求所形成，包括土地、水、大气等环境污染以及生态系统的破坏等方面的生态环境破坏；损害力来源于自然以及人为损害等引起的干旱、洪涝等气候灾害以及滑坡、地震、泥石流、地面沉降等地质灾害方面；发展力体现为资源环境要素对于经济社会发展以及居民福祉等方面的提升能力。

### (2) 归纳“共轭角力”模式

在“开发—压力—状态—响应”框架的基础上进一步结合“敏感点—脆弱点—临界点—平衡点”的系统关联，建立支撑力、恢复力、损害力和发展力的共轭关系，进而依据共轭关系的组合特征确定人地关系地域系统的“人—人”“人—地”“地—地”共轭角力模式。

### (3) 建立承载力需求、负载冲突与“共轭角力”模式的整体联系

承载力需求通过不同共轭角力模式的作用，表现为差异化的负载冲突。资源环境系统的支撑力与经济社会系统的发展力，还具有相辅相成、互为促进的作用，但在一定的技术水平下，资源环境系统的支撑力是有限的，从而也影响了特定区域的经济社会发展能力的提升；而资源环境系统的过度利用，尤其是超越了生态环境系统要素的恢复能力，则也将导致生态环境系统的退化，因此，资源环境系统支撑力也受制于相应的恢复

力;而对于资源环境系统的损害,不仅影响其支撑力、恢复力,还将对经济社会发展力产生制约。因此,在区域人地关系系统中,“支撑力”“恢复力”“损害力”“发展力”共同形成了相应的共轭关系(图2)。

人地关系系统中资源环境要素与生产生活相互作用的“共轭角力”过程,揭示了环境灾害要素的“敏感点”,暴露了资源生态系统的“脆弱点”,显露了资源环境系统承载的“临界点”,为寻求人与自然“平衡点”的人类应对提供了可能。基于“共轭角力”机制,可进一步梳理资源环境承载力的需求机理,通过要素层面的“支撑力—敏感点”关联、压力层面的“恢复力—脆弱点”关联、状态层面的“损害力—临界点”关联以及响应层面的“发展力—平衡点”关联,以评估资源环境承载力需求在不同共轭角力模式下的敏感点和脆弱点,从而识别不同共轭角力模式下的资源环境负载冲突特征。这对人地关系系统要素相互作用的认知,也为理解和评估资源环境承载力提供了理论基础。

## 2 基于共轭角力机制的资源环境承载力评价DENS模型

基于共轭角力机制,资源环境承载力评价应该包括支撑力、恢复力、损害力以及发展力四个方面,即分别为:受制于资源、环境、生态等要素的区域人口规模及其开发建设存在一定阈值的开发建设(Development)支撑力,受制于环境污染或自然、人为灾害损失的环境灾害(Environment and Disaster)损害力,受制于资源可持续利用和生态系统脆弱性影响的资源生态(Natural Resources and Ecology)修复力,以及侧重人类福祉提升的社会福祉(Social Welfare)发展力,形成开发建设、环境灾害、资源生态、社会福祉四个维度的综合评价体系(图2)。开发建设、环境灾害、资源生态以及社会福祉四个子系统间存在密切的交互作用与耦合机理:资源生态修复力反映区域自然资源本底条件与生态基础;通过自然资源要素的有效供给,以及实现生态系统稳定,有利于改善环境灾害损害力和开发建设支撑力;环境容量以及灾害后系统恢复能力,也影响资源生态

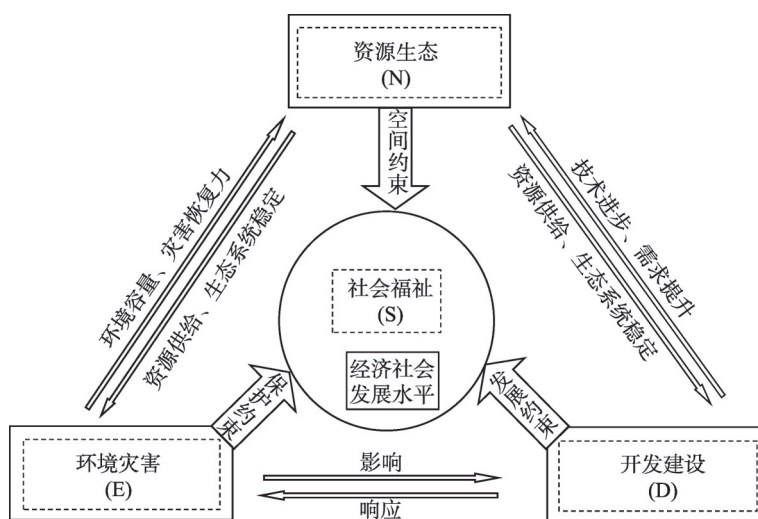


图2 DENS模型框架

Fig. 2 The framework of DENS model

修复力以及开发建设支撑力；而适度、有节制的开发建设，不仅有利于资源生态系统的可持续承载，也有利于应对环境以及灾害的影响，但若过度开发，则将加剧资源环境系统的影响乃至其对人类的损害；社会福祉提升是人地地域系统发展的终极目标。

立足人地地域系统协调发展目标，以判别关键资源环境要素响应的敏感点、诊断生态系统的脆弱点、甄别资源环境开发保护的临界点、探寻人和自然双赢发展的平衡点为导向，统筹考虑人地关系地域系统社会、经济、环境、污染、发展等子系统，构建多结果输出的资源环境承载力综合评价模型。模型构建思路如下：

## 2.1 不同人地地域系统资源环境承载力多途径内涵及定量表征

不同类型地域的结构和矛盾存在较大差异，因此必须按地域类型来协调不同的人地关系。考虑到我国各地的自然、社会、经济条件的地域差异性大，可以通过多途径表征方法，揭示不同人地地域系统承载力的多样性、关联性及嵌套性特征。基于压力—状态—响应理论，资源环境承载力主要包含四维内涵，分别为受制于资源、环境、生态等要素特定区域人口规模及其开发建设存在一定阈值的开发建设支撑力、强调环境合理有效保护和灾害事件对特定区域人地地域系统稳定性影响的环境灾害损害力、关注资源可持续利用和生态系统脆弱性的资源生态承载修复力、侧重人类福利水平的社会福祉发展力。

## 2.2 建立资源环境承载力评价指标体系

鉴别不同产业结构、区位条件人地系统主要资源环境、生态及社会经济问题；采取资料收集、实地调查等方法辨别依附于地域空间的土地资源、水资源、矿产资源、气候资源等对人类及其社会经济活动承载强度和范围限制的空间约束性指标；利用GIS空间分析识别区域基本农田、生态红线保护区、生态脆弱区等功能区保护和环境胁迫因子对生态环境保护造成严重威胁以及对自然和人为灾害抵抗能力的保护约束性指标；基于推拉模型甄别周边或发达城市发展的极化效应造成资源、人口等多要素显性或隐性流失限制区域经济进一步提升的发展约束性指标，集成空间—保护—发展三维约束性指标初步构建承载力评价的关键约束性指标。在此基础上针对四维承载力内涵构建资源环境承载力评价指标体系，结合空间—保护—发展三维关键约束性指标构建资源环境承载力评价备选指标库，以为承载力评价提供支撑。

## 2.3 构建资源环境承载力评价模型(DENS)

构建四维承载力指标体系相互作用的系统动力学模型，以分析要素之间的因果反馈机制，并基于区域资源可持续利用、人地协调发展为目标评价特定区域的资源环境承载力。基于系统动力学模型分析区域系统组成结构、系统内外要素间的因果反馈分析，集成形成资源环境承载力评价模型：

$$DENS = f(D \cup E \cup N \cup S) = \begin{cases} D = f(D_1, D_2, D_3, \dots, D_n) \\ E = f(E_1, E_2, E_3, \dots, E_n) \\ N = f(N_1, N_2, N_3, \dots, N_n) \\ S = f(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $D$ 为开发建设支撑力，涵盖工程地质条件、地块集中度、交通网络密度、服务设施水平等承载要素； $E$ 为环境灾害损害力，涵盖水环境、大气环境、地质灾害、气象灾害等承载要素； $N$ 为资源生态修复力，涵盖水资源、土地资源、生态系统服务等承载要

素;  $S$  为社会福祉发展力, 主要从经济发展规模、粮食生产能力等方面测度。

依据上述模型, 综合考虑区域资源环境本底、区域资源环境短板限制及经济社会发展水平等提炼和模拟区域特定时期(历史、现状以及未来)可承载的人口规模、经济规模以及开发空间规模。

### 3 结论

人地关系是资源环境及生产生活方式等各类要素“纠缠”或共轭作用的结果, 本文分析了受制于自然资源要素的“支撑力”、生态系统的“恢复力”、环境灾害的“损害力”、经济社会的“发展力”及其共轭过程, 据此阐述了以社会福祉发展力为核心, 开发建设支撑力、环境灾害损害力与资源生态修复力相互影响的资源环境综合承载力系统框架及其综合模型, 从而为更加科学地认知资源环境承载力这一影响人地关系的核心科学问题提供了理论思路和方法借鉴。

**致谢:** 感谢华东师范大学孙斌栋教授、中国科学院地球化学研究所白晓永研究员、贵州师范大学赵翠薇教授等在讨论中给予的启发; 感谢南京大学地理与海洋科学学院硕士研究生谭琦川在材料整理等方面给予的帮助。

### 参考文献(References):

- [1] GRAYMORE M L M, SIPE N G, RICKSON R E. Sustaining human carrying capacity: A tool for regional sustainability assessment. *Ecological Economics*, 2010, 69(3): 459-468.
- [2] 廖慧璇, 籍永丽, 彭少麟. 资源环境承载力与区域可持续发展. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1253-1258. [LIAO H X, JI Y L, PENG S L. Resource and environment carrying capacity and sustainable development. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(7): 1253-1258.]
- [3] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. *地理学报*, 2007, 62(4): 339-350. [FAN J. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 339-350.]
- [4] 黄贤金. 基于资源环境承载力的长江经济带战略空间构建. *环境保护*, 2017, (15): 25-26. [HUANG X J. Strategic space construction of the Yangtze River Rconomic Belt based on resources and environment carrying capacity. *Environmental Protection*, 2017, (15): 25-26.]
- [5] 郑德凤, 臧正, 张雨, 等. 基于新型城镇化视角的区域PRED系统综合评价: 以大连为例. *地理科学进展*, 2014, 33(3): 364-374. [ZHENG D F, ZANG Z, ZHANG Y, et al. Comprehensive assessment of regional PRED system based on new urbanization approach: A case study in Dalian. *Progress in Geography*, 2014, 33(3): 364-374.]
- [6] 方创琳. 中国快速城市化过程中的资源环境保障问题与对策建议. *中国科学院院刊*, 2009, 24(5): 468-474. [FANG C L. Resource and environment guarantee problems and countermeasures in China's rapid urbanization. *CAS Bulletin*, 2009, 24(5): 468-474.]
- [7] 高晓路, 陈田, 樊杰. 汶川地震灾后重建地区的人口容量分析. *地理学报*, 2010, 65(2): 164-176. [GAO X L, CHEN T, FAN J. Population capacity analysis of reconstruction area after Wenchuan earthquake. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(2): 164-176.]
- [8] 樊杰, 陶岸君, 陈田, 等. 资源环境承载能力评价在汶川地震灾后恢复重建规划中的基础性作用. *中国科学院院刊*, 2008, 23(5): 387-392. [FAN J, TAO A J, CHEN T, et al. The basic role of resource and environment bearing capacity evaluation in post-Wenchuan earthquake reconstruction planning. *CAS Bulletin*, 2008, 23(5): 387-392.]
- [9] 钟维琼, 代涛, 高湘昀. 产业发展与资源环境承载力研究综述. *资源与产业*, 2016, 18(6): 74-80. [ZHONG W Q, DAI T, GAO X Y. Review on industrial development and resource and environment carrying capacity. *Resources and Indus-*



- tries, 2016, 18(6): 74-80.]
- [10] 李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展. 地理学报, 2016, 71(12): 2067-2088. [LI X Y, YANG Y, LIU Y. The evolution of Chinese people's land relationship and the progress of basic research on resources and environment. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2067-2088.]
- [11] 毛汉英, 余丹林. 环渤海地区区域承载力研究. 地理学报, 2001, 56(3): 363-371. [MAO H Y, YU D L. Research on regional bearing capacity of Bohai rim region. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 363-371.]
- [12] 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. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395. [FENG Z M, YANG Y Z, YAN H M, et al. Research on resource and environment carrying capacity in the past hundred years: From theory to practice. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [13] 张林波, 李文华, 刘孝富, 等. 承载力理论的起源、发展与展望. 生态学报, 2009, 29(2): 878-888. [ZHANG L B, LI W H, LIU X F, et al. The origin, development and prospect of carrying capacity theory. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 878-888.]
- [14] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Science*, 1995, 268(5210): 520-521.
- [15] GRAYMORE M L M, SIPE N G, RICKSON R E. Regional sustainability: How useful are current tools of sustainability assessment at the regional scale?. *Ecological Economics*, 2008, 67(3): 362-372.
- [16] LANE M. The carrying capacity imperative: Assessing regional carrying capacity methodologies for sustainable land-use planning. *Land Use Policy*, 2010, 27(4): 1038-1045.
- [17] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263): 472.
- [18] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTROM J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [19] 王慧芳, 林子雁, 肖焱, 等. 基于生态系统服务潜在损失的滑坡灾害生态风险评价. 应用生态学报, 2019, (9): 1-12. [WANG H F, LIN Z Y, XIAO Y, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters based on potential loss of ecosystem services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, (9): 1-12.]
- [20] RUNNING S W. A measurable planetary boundary for the biosphere. *Science*, 2012, 337(6101): 1458-1459.
- [21] 喻忠磊, 张文新, 梁进社, 等. 国土空间开发建设适宜性评价研究进展. 地理科学进展, 2015, 34(9): 1107-1122. [YU Z L, ZHANG W X, LIANG J S, et al. Research progress on suitability evaluation of land space development and construction. *Progress in Geography*, 2015, 34(9): 1107-1122.]
- [22] 谭术魁, 刘琦, 李雅楠. 中国土地利用空间均衡度时空特征分析. 中国土地科学, 2017, 31(11): 40-46. [TAN S K, LIU Q, LI Y N. Spatial and temporal characteristics of land use equilibrium in China. *China Land Science*, 2017, 31(11): 40-46.]
- [23] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用. 地理学报, 2015, 70(7): 1068-1079. [XU Y, SUN X Y, TANG Q. Human activity intensity on land surfaces: Concepts, methods and applications. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1068-1079.]
- [24] 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. 地理研究, 2014, 33(8): 1395-1405. [FENG Z M, YANG Y Z, YOU Z. Research on land resource restriction and restriction system of population distribution in China. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1395-1405.]
- [25] 金雨泽, 黄贤金, 朱怡, 等. 基于粮食安全的长江经济带土地人口承载力评价. 土地经济研究, 2015, (2): 78-90. [JIN Y Z, HUANG X J, ZHU Y, et al. Evaluation of land population carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on food security. *Journal of Land Economics*, 2015, (2): 78-90.]
- [26] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90. [DUAN C, LIU C M, CHEN X N, et al. Discussion on the concept and research method of carrying capacity of regional water resources. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 82-90.]
- [27] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的水资源限制性与限制度研究. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1637-1648. [FENG Z M, YANG Y Z, YOU Z. Study on water resources restriction and restriction system of China's population dis-



- tribution. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1637-1648.]
- [28] 叶龙浩, 周丰, 郭怀成, 等. 基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控. *地理研究*, 2013, 32(6): 1007-1016. [YE L H, ZHOU F, GUO H C, et al. Optimal regulation of Qinhe river basin system based on water environment carrying capacity. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 1007-1016.]
- [29] 胡溪, 刘年磊, 蒋洪强. 基于环境质量标准的长江经济带水环境承载力评价. *环境保护*, 2018, 46(21): 38-42. [HU X, LIU N L, JIANG H Q. Evaluation of water environmental bearing capacity of Yangtze River Economic Belt based on environmental quality standard. *Environmental Protection*, 2018, 46(21): 38-42.]
- [30] 裴鹰, 杨俊, 李冰心, 等. 城市边缘区生态承载力时空分异研究: 以甘井子区为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1715-1724. [PEI Y, YANG J, LI B X, et al. Study on spatial and temporal variation of ecological carrying capacity in urban fringe areas: A case study of Ganjingzi district. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1715-1724.]
- [31] 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. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 614-624. [LIU D, FENG Z M, YANG Y Z. Supply and demand balance analysis of China's ecological carrying capacity based on ecological footprint. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4): 614-624.]
- [32] 吕弼顺, 程火生, 朱卫红. 图们江地区区域承载力动态变化研究. *地理科学*, 2010, 30(5): 717-722. [LYU B S, CHENG H S, ZHU W H. Study on the dynamic change of regional bearing capacity in Tumen River area. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(5): 717-722.]
- [33] 纪学朋, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于陆海统筹视角的国土空间开发建设适宜性评价: 以辽宁省为例. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 451-463. [JI X P, HUANG X J, CHEN Y, et al. Evaluation of suitability of land space development and construction from the perspective of land and sea coordination: Taking Liaoning province as an example. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 451-463.]
- [34] 张竞珂, 陈逸, 黄贤金. 长江经济带土地开发均衡度及限度评价研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(12): 1945-1953. [ZHANG J K, CHEN Y, HUANG X J. Evaluation of land development equilibrium degree and limit in the Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2017, 26(12): 1945-1953.]
- [35] 黄志启, 郭慧慧. 基于熵权 TOPSIS 模型的郑州市资源环境承载力综合评价. *生态经济*, 2019, 35(2): 122-126. [HUANG Z Q, GUO H H. Comprehensive evaluation of resource and environment carrying capacity of Zhengzhou based on entropy weight TOPSIS model. *Ecological Economy*, 2019, 35(2): 122-126.]
- [36] 肖义, 黄寰, 邓欣昊. 生态文明建设视角下的生态承载力评价: 以成渝城市群为例. *生态经济*, 2018, 34(10): 179-183, 208. [XIAO Y, HUANG H, DENG X H. Evaluation of ecological carrying capacity from the perspective of ecological civilization construction: Taking Chengdu-Chongqing city group as an example. *Ecological Economy*, 2018, 34(10): 179-183, 208.]
- [37] 许明军, 冯淑怡, 苏敏, 等. 基于要素供容视角的江苏省资源环境承载力评价. *资源科学*, 2018, 40(10): 93-103. [XU M J, FENG S Y, SU M, et al. Resource and environment carrying capacity evaluation of Jiangsu province from the perspective of factor supply and capacity. *Resources Science*, 2018, 40(10): 93-103.]
- [38] 卫思夷, 居祥, 荀文会. 区域国土开发强度与资源环境承载力时空耦合关系研究: 以沈阳经济区为例. *中国土地科学*, 2018, 32(7): 58-65. [WEI S Y, JU X, XUN W H. Study on spatio-temporal coupling relationship between regional land development intensity and resource and environment carrying capacity: Taking Shenyang Economic Zone as an example. *China Land Science*, 2018, 32(7): 58-65.]
- [39] 黄贤金, 周艳. 资源环境承载力研究方法综述. *中国环境管理*, 2018, 10(6): 36-42, 54. [HUANG X J, ZHOU Y. Summary on evaluating methods for carrying capacity of resources and environment. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2018, 10(6): 36-42, 54.]
- [40] 曾鹏, 向丽. 中国十大城市群高等教育投入和产业集聚水平对区域经济增长的共轭驱动研究. *云南师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2015, 47(4): 138-145. [ZENG P, XIANG L. Study on conjugated drive of higher education investment and industrial agglomeration level to regional economic growth in China's ten largest urban agglomerations. *Journal of Yunnan Normal University: Philosophy and Social Science Edition*, 2015, 47(4): 138-145.]
- [41] 尹科, 王如松, 姚亮, 等. 基于复合生态功能的城市土地共轭生态管理. *生态学报*, 2014, 34(1): 210-215. [YIN K,

WANG R S, YAO L, et al. Urban land conjugate ecological management based on complex ecological function. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 210-215.]

- [42] 王如松. 绿韵红脉的交响曲: 城市共轭生态规划方法探讨. *城市规划学刊*, 2008, 1(1): 8-17. [WANG R S. Symphony of green rhyme and red vein: Discussion on urban conjugate ecological planning method. *Urban Planning Forum*, 2008, 1(1): 8-17.]

## Evaluation model of regional resource and environment comprehensive carrying capacity based on the conjugation-wrestling mechanism

HUANG Xian-jin, SONG Ya-ya

(School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The resource and environment carrying capacity is the basis for strategy decision-making of regional development, especially the optimization of spatial development strategy. In recent years, it has played a pivotal role in guiding regional sustainable development, land planning, urbanization, post-disaster reconstruction planning, and industrial planning. At the same time, clarifying the interaction mechanism between regional resource-environment and production-living factors is the basis of the evaluation of resource and environment carrying capacity. Based on PSR model, this paper presents the conjugation-wrestling theoretical mechanism of resources-environment and production-living, which divides the carrying capacity into four pairs of interaction forces, i.e., support-sensitive point, recovery-fragile point, destruction-critical point and development-equilibrium point. Then it presents DENS model including four dimensions, namely development, environment and disaster, natural resource and ecology, and social welfare.

**Keywords:** resource and environment carrying capacity; human-land areal system; the conjugate angular force mechanism; DENS model