

供需动态平衡下资源环境承载力评价 理论模型与方法^{*}

闫卫坡^{1,2} 郭亚琳^{*,1} 王 青¹ 安以达¹ 韩云伟¹

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010;

2. 四川省环境政策研究与规划院, 成都 610041)

摘 要: 资源环境承载力是认知区域人地系统发展潜能、评估自然生态系统服务功能的重要判据。在系统梳理资源环境承载力相关研究的基础上, 重新认知资源环境承载力: 1) 资源环境承载力是某一时空尺度下资源环境供给侧与区域发展需求侧的数理关系的弹性阈值, 可表征为一个状态方程; 2) 资源利用上线、环境质量底线、生态保护红线等约束条件是资源环境承载力综合评价模型的关键主控要素; 3) 识别主控要素、建立供需清单、明确供需网络是资源环境承载力综合评价模型应用需要解决的关键环节; 4) 现代地学技术、系统结构模型化技术、地理探测器、系统动力学等技术方法的快速发展, 为模型的实践应用提供了重要的技术支撑。在此基础上, 构建基于供需动态平衡理念的资源环境承载力综合评价模型, 并应用该模型对岷江上游典型流域进行实证研究, 测算并动态评估了该流域土地资源承载力的弹性阈值及承载状态。基于供需动态平衡理念的资源环境承载力综合评价的理论和方法研究, 可为区域资源环境承载力提供新的测算工具。

关键词: 资源环境承载力; 供需动态平衡; 供需清单; 主控要素; 承载力弹性阈值; 理论模型

DOI: 10. 16507/j. issn. 1006 – 6055. 2023. 02. 101

Theoretical Model and Method for Evaluation of Resources and Environment Carrying Capacity Based on the Dynamic Balance of Supply and Demand^{*}

YAN Weipo^{1,2} GUO Yalin^{*,1} WANG Qing¹ AN Yida¹ HAN Yunwei¹

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Sichuan Academy of Environmental policy and planning, Chengdu 610041, China)

Abstract: The carrying capacity of resources and environment is an important criterion to study the development potential of regional human-land system and to evaluate the service function of natural ecosystem. Based on systematic combing of the related researches, the carrying capacity of resources and environment is re-recognized as follows: (1) The carrying capacity of resources and environment is the elastic threshold of the mathematical relationship between the supply side of resources and environment and the demand side of regional development in a certain space-time scale, which can be

^{*} 国家自然科学基金“岷江上游山区聚落生态位图谱与影响尺度”“岷江上游山地生态服务地域分异过程与补偿阈值”(41071115, 41601088), 四川省重点研发项目“岷江上游藏区耕地非农化过程与风险阈值”“岷江上游干旱河谷聚落区地质灾害监测预警与精细化预报研究与示范”(2017SZ0086, 2018SZ0345)

^{**} E-mail: guoyalin_linda@163.com; Tel: 0816-6089459

expressed as an equation of state. (2) Constraints such as resource utilization's upper limit, environmental quality's bottom line and ecological red line are the master controlling factors for building the comprehensive evaluation model of resources and environmental carrying capacity. (3) Identifying the main control factors, establishing the supply and demand list and defining the supply and demand network are the key links which need to be addressed in the application of the model. (4) The rapid development of modern geoscience technology, system structure modeling technology, geographic detector, system dynamics and other technical methods can provide key technical supports for the practical application of the model. Finally, according to the analysis, a comprehensive evaluation model of the carrying capacity of resources and environment based on the dynamic balance of supply and demand is constructed. Moreover, the model is applied to an empirical study of the typical area in the upper reaches of the Min River, and the elastic threshold of the land resources carrying capacity in the area is dynamically calculated and the carrying condition is evaluated. Based on the dynamic balance of supply and demand, research on the theory and method of comprehensive evaluation of resources and environment carrying capacity can provide a new measuring tool for carrying capacity of regional resources and environment.

Keywords: Resources and Environment Carrying Capacity; Dynamic Balance of Supply and Demand; Supply and Demand List; Main Control Elements; Elastic Threshold of Carrying Capacity; Theoretical Model

资源环境承载力是认知区域人地系统发展潜能、评估自然生态系统服务功能的重要判据^[1,2]。资源环境承载力^[3-10]现已成为生态学、地理学、资源科学、环境科学等学科研究的重要内容^[11]。不同承载力概念及相应评价理论与方法的提出,对进一步认识人口、资源、环境与区域可持续发展间的交互作用及其耦合机制具有重要意义^[12-14]。当前,资源环境承载力研究已由单要素、单学科的分类研究发展到资源、环境、生态乃至资源环境承载力的多要素、多学科以及多学科融合的全要素、多维度的综合集成研究;研究方法已由单要素评价模型向多要素耦合模型、全要素的综合测算系统平台转变。现有资源环境承载力的许多概念、内涵重叠^[15,16],主控要素、生态弹性阈值等建模的关键环节尚待进一步明确^[17-19]。理论上,资源环境承载力是表征某一时空尺度下资源环境供给侧与区域发展需求侧的数理关系的状态方程,是对供给侧与需求侧相互作用关系与相对平衡状态的综合性评估。为此,本文通过对国内外资源环境承载力相关研究的系统梳理,重新审视资源环境承载力研究的理论框架,提出基于供需动态平衡的区域资源环境承载力综合评价的理论和方法,为资源环境承载力的相关研究提供理论参考和借鉴。

1 资源环境承载力研究梳理与新认知

1.1 资源环境承载力实质上是状态方程

通过系统梳理现有资源环境承载力评价理论和方法^[20]可知,无论是着眼于单要素、分类研究的土地资源承载力^[21-23]、水资源承载力^[24-26]等,还是以多要素的综合集成研究为特征的生态承载力、资源环境承载力^[27,28]等,其共同之处在于均是针对某一时期区域资源环境系统状态与能力的评估。如在生态足迹^[29-34]、能值分析^[35-39]、综合评价指标^[40-43]、状态空间^[44,45]、系统动力学^[46-49]等承载力评估方法与模型中,通过测算区域能够承载的人口数量、所能提供的生物生产性土地面积或相关指数等,并与标准值、理想值、对照值或参考值比较,进而描述资源环境系统对区域发展的承载状态(盈余、平衡、超载)。因此,资源环境承载力是表征资源环境供给侧与区域发展需求侧的平衡状态的函数,实质上是一个状态方程。

1.2 资源环境承载力本质上是弹性阈值

资源环境承载力表征了资源环境系统承载能力的一个“极值”“极限”^[50],是决定人类社会是否可持续发展的资源环境门槛的阈值表达。资源环境承载力“阈值”受人类需求水平在不同社

会发展阶段的差异性、科技发展潜力的不可预测性、资源环境利用水平的不确定性等因素的影响,作为自然生态系统供给侧对区域发展需求侧的综合响应,呈现不确定性、动态性等突出特征^[51,52]。通过调整、优化社会-经济-自然三者之间的关系,可实现一个区域资源环境承载能力的最大化,表现为资源环境承载力在平衡状态附近的波动特征。因此,资源环境承载力本质上是一个弹性阈值。

1.3 资源环境承载力是供需间关系反映

基于 1.1、1.2 小节的认知,资源环境承载力反映了某一时空尺度下资源环境供给侧与区域发展需求侧的数理关系,受到资源利用上线、环境质量底线、生态保护红线等约束条件的综合影响(图 1)。供给侧与需求侧的相对平衡是保障人类生产生活系统健康有序运行的前提和基础,通过开展

供给侧与需求侧的定量化分析与对比研究,可为科学认知区域的可持续发展状态提供判据。

2 构建评价模型

2.1 建模理念

理论上,资源环境供给、区域发展需求在一定时期内具有相对稳定性;这种稳定性会随着时间变化表现为一种动态平衡(图 2):供给曲线与需求曲线相交,即供给侧与需求侧相对平衡;伴随供给曲线的扩张($S_{RE} \rightarrow S_{RE}'$)或需求曲线的收缩($D \rightarrow D'$),供需平衡点由 B_1 逐渐向 B_2 、 B_3 、 B_4 移动。

2.2 模型构建

2.2.1 模型表达式

基于供需动态平衡理念,资源环境承载力评估模型由供给模块、需求模块组成,反映了区域资

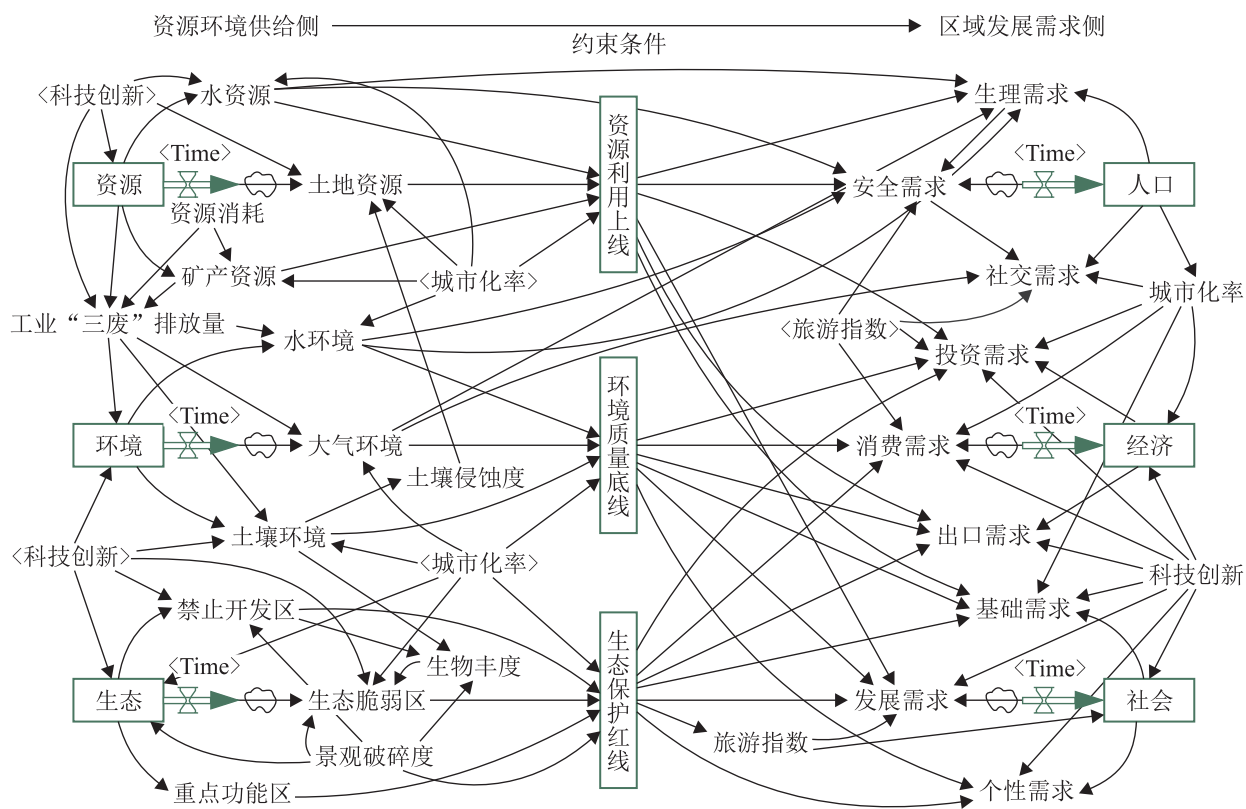


图 1 区域资源环境承载力的供需网络关系

Fig.1 Relationship between Supply and Demand of Regional Resources and Environment Carrying Capacity

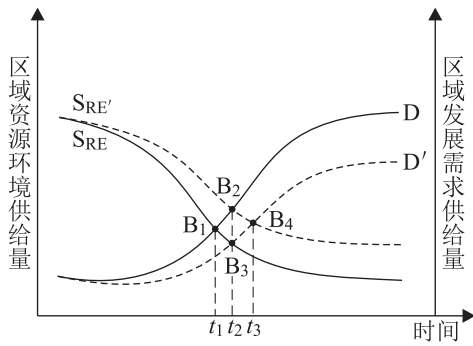


图2 资源环境承载力的供需动态平衡

Fig. 2 Spatiotemporal Dynamic Balance of the Supply and the Demand of Resources and Environment Carrying Capacity

源环境供给侧与区域社会经济发展需求侧间的量化关系,能够诊断和预判区域可持续发展状态。其模型表达式为

$$C_{RE} = \frac{S_{RE}}{D} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_{RE} = f(x, r, t) \\ D = g(y, r, t) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)、(2), C_{RE} 可表示为

$$C_{RE} = F(x, y, r, t) \quad (3)$$

式中: C_{RE} 表示区域资源环境承载力, S_{RE} 表示区域资源环境供给侧, D 表示区域发展需求侧, x 表示区域资源环境供给侧的要素或指标, y 表示区域发展需求侧的要素或指标, r 表示区域, t 表示时间; f 表示 x, r, t 匹配关系的函数, g 表示 y, r, t 匹配关系的函数, F 表示 x, y, r, t 匹配关系的函数。

D 表示区域发展总需求时, C_{RE} 表示区域资源环境系统与社会经济系统之间的关系状态,包括盈余、平衡、超载三种类型; D 表示区域发展的人均需求时, C_{RE} 表示区域资源环境承载人口的弹性阈值或合理规模。

2.2.2 供给模块

x 是综合自然条件的代名词,是生态资源、水

资源、土地资源、水环境、大气环境等资源环境要素的综合表达。在不同的区域, S_{RE} 因资源环境本底、人类开发利用程度等因素的差异而不同。则, S_{RE} 可表达为

$$\begin{aligned} S_{RE} &= f[h(x_1, x_2, \dots, x_m), p(r_1, r_2, \dots, r_n), t] \\ &= f_{11}(x_1, r_1, t) \cup f_{21}(x_2, r_1, t) \cup \dots \cup f_{m1}(x_m, r_1, t) \\ &\quad \cup f_{12}(x_1, r_2, t) \cup f_{22}(x_2, r_2, t) \cup \dots \cup f_{m2}(x_m, \\ &\quad r_2, t) \cup \dots \cup f_{1n}(x_1, r_n, t) \cup f_{2n}(x_2, r_n, t) \cup \dots \\ &\quad f_{mn}(x_m, r_n, t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $x_1 \sim x_m$ 分别代表生态资源、水资源、土地资源、水环境、大气环境等资源环境要素, h 表示不同资源环境要素的组合函数; $r_1 \sim r_n$ 分别代表区域内的不同类型区, p 表示不同类型区的组合函数; f_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 表示类型区 j 内资源环境要素 i 的供给函数, m, n 为自然数。

2.2.3 需求模块

y 是区域发展所涉及的各类需求的总称。在不同的区域, D 主要受到社会经济发展水平、人口规模、生产生活方式、消费结构等因素的影响而不同。则, D 可表达为

$$\begin{aligned} D &= g[u(y_1, y_2, \dots, y_k), p(r_1, r_2, \dots, r_n), t] \\ &= g_{11}(y_1, r_1, t) \cup g_{21}(y_2, r_1, t) \cup \dots \cup g_{k1}(y_k, r_1, t) \\ &\quad \cup g_{12}(y_1, r_2, t) \cup g_{22}(y_2, r_2, t) \cup \dots \cup g_{k2}(y_k, r_2, t) \\ &\quad \cup \dots \cup g_{1n}(y_1, r_n, t) \cup g_{2n}(y_2, r_n, t) \cup \dots \cup g_{kn}(y_k, \\ &\quad r_n, t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $y_1, \dots, y_k$ 表示区域发展的各类需求, u 表示不同发展需求的组合函数; g_{qj} ($q = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n$) 表示类型区 j 的 q 类发展需求的需求函数。

3 模型实证研究

供需动态平衡下资源环境承载力综合评价模型是一个通用的表达式。事实上,由于不同的地区资源环境条件及区域发展需求千差万别,供给

侧、需求侧的约束条件也不尽相同。本文基于岷江上游杂谷脑河流域(图3)土地资源承载力的前期研究^[53],就模型的应用开展示范研究。

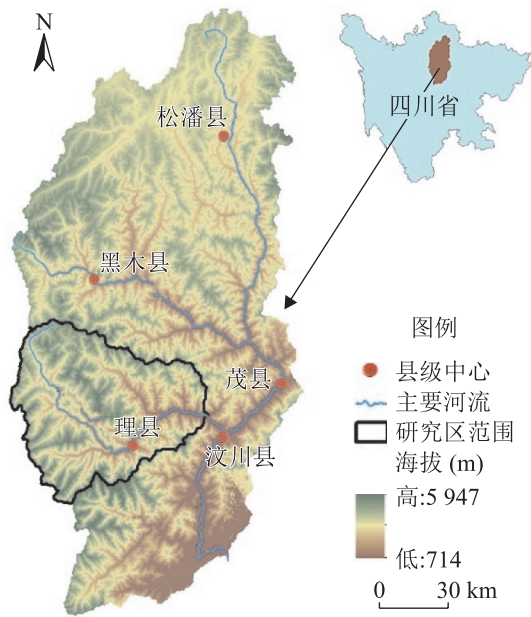


图3 岷江上游杂谷脑河流域地理区位图

Fig.3 Location of the Zagunao River Basin in the Upper Reaches of the Min River

3.1 土地资源供给侧(S_{RE})

土地资源是人类社会生产生活中最重要的自然资源和生产资料,粮食是土地资源最原始最重要的限制性因素,同时也是区域人口与土地资源平衡的重要判据之一^[54]。人口-粮食关系作为传统土地资源承载力的研究对象,在现代土地资源承载力研究中依然占据重要地位^[55]。杂谷脑河流域主要粮食作物为小麦和玉米,其土地资源供给侧的测算见表1,土地自然、综合生产潜力可看作是土地资源供给的初级、高级阶段(土地综合生产潜力是土地自然生产潜力与社会经生产潜力加成的结果)。

3.2 人口营养需求侧(D)

人均营养标准是根据人体营养需要,并结合人体基本生理需求而得出人们每日膳食中的营养

表1 杂谷脑河流域土地资源供给侧

Tab.1 Supply Side of the Land Resources in the Zagunao River Basin

类别	土地自然生产潜力(kJ)	社会经济生产潜力订正系数	土地综合生产潜力(kJ)
小麦	4.6331 × 10 ¹⁰	1.5083	6.9881 × 10 ¹⁰
玉米	9.6534 × 10 ¹⁰	1.5083	1.4560 × 10 ¹¹
合计	1.4287 × 10 ¹¹	1.5083	2.1548 × 10 ¹¹

供给量^[56]。不同年龄、不同性别、不同生理状况和不同劳动强度的人群营养日摄入量都各不相同。故不同区域不同阶段均有不同的营养标准,要结合具体区域的实际情况进行分析。

通过对理县生计现状调查,同时考虑到计算结果的区域可比性,本文分别以温饱T₁、小康T₂、发达T₃三个不同发展阶段的人均营养素(热量)摄入量作为人均营养需求标准(表2)进行类比研究。

表2 不同发展阶段人均营养需求标准

Tab.2 Per Capita Nutrition Requirements at Different Stages of Development

类别	不同发展阶段营养素需求水平		
	温饱阶段T ₁	小康阶段T ₂	发达阶段T ₃
人均营养素(热量)摄入量(kJ/d)	9740	10878	15062

3.3 数据统计分析

3.3.1 土地资源承载力阈值

以杂谷脑河流域土地自然生产潜力、土地综合生产潜力为土地资源供给侧(S_{RE}),选取T₁、T₂、T₃不同发展阶段的人均营养素(热量)摄入量作为人口营养需求侧(D),测算杂谷脑河流域土地资源承载力阈值(表3)。

由表3可知,在T₁、T₂、T₃发展阶段,杂谷脑河流域土地资源承载力阈值弹性区间分别为[40185,60613]、[35982,54272]、[25987,39196]。

表 3 杂谷脑河流域土地资源承载力阈值

Tab.3 Threshold of Land Resources Carrying Capacity in the Zagunao River Basin

类别	按土地自然生产潜力测算(人)	按土地综合生产潜力测算(人)	土地资源承载力弹性阈值(人)
温饱阶段 T ₁	40185	60613	[40185,60613]
小康阶段 T ₂	35982	54272	[35982,54272]
发达阶段 T ₃	25987	39196	[25987,39196]

3.3.2 土地资源承载力状态

参照理县 1996—2016 年人口数,与测算出的土地承载力阈值进行比对,从而对杂谷脑河流域土地资源承载力状态进行评估(表 4)。

表 4 表明,以土地自然生产潜力作为供给侧对杂谷脑河流域土地资源承载力状态进行评估,即使在 T₁ 发展阶段,区域土地资源承载力仍然处于赤字状态;当以土地综合生产潜力作为供给侧,只有在 T₃ 发展阶段,土地资源承载力才呈现赤字。

表 4 杂谷脑河流域土地资源承载力状态¹⁾

Tab.4 State of the Land Resources Carrying Capacity in the Zagunao River Basin¹⁾

类别	1996 年	2001 年	2006 年	2011 年	2016 年
人口数(万人)	4.3	4.4	4.5	4.6	4.85
温饱阶段 T ₁	A ₁	赤字	赤字	赤字	赤字
	B ₁	盈余	盈余	盈余	盈余
小康阶段 T ₂	A ₂	赤字	赤字	赤字	赤字
	B ₂	盈余	盈余	盈余	盈余
发达阶段 T ₃	A ₃	赤字	赤字	赤字	赤字
	B ₃	赤字	赤字	赤字	赤字

1) A_i、B_i 分别为 T_i 发展阶段按土地自然生产潜力、土地综合生产潜力测算的土地资源承载力阈值。

4 模型应用中需解决的关键问题

基于供需角度开展资源环境承载力研究,需要明确如下三个关键问题。

4.1 构建资源环境承载力供需清单

供需清单的构建为基于供给侧—需求侧视角开展资源环境承载力研究提供了基础数据支撑。资源环境供给侧与资源环境的本底、人类开发利用程度等因素有关,涵盖资源要素的供给、环境因子对人为干扰或污染排放的容纳等内容,包括诸如生态资源、水资源、土地资源、水环境、大气环境等资源环境要素的质、量。区域发展需求侧是区域社会经济发展状况和水平的综合反映,涉及人口规模、消费结构和水平、经济结构、生产生活方式等不同方面;生活资料、生产资料等物质需求以及大气安全、水安全、生物安全等安全需求是需求清单的重要组成。通过社会调查、野外调研,结合现代地学技术,明确区域居民生产—生活可利用资源环境的地理边界;应用系统结构模型化技术,构建资源环境供给清单与区域发展需求清单,阐释资源环境供给侧、区域发展需求侧的组成要素之间以及供给侧与需求侧间的结构关系。

4.2 识别资源环境承载力主控要素

资源环境承载力涵盖人口、经济、社会、生态、环境、资源等多元要素。在不同时空尺度条件下,各要素之间存在着极其复杂的交互影响与制约关系。资源利用上线、环境质量底线和生态保护红线是制约人类可持续发展的关键,特定地域资源环境供给侧的范围和水平或供给能力受到资源约束因子、环境胁迫因子、生态安全限值等主控要素的共同限制,社会发展阶段、科技发展水平等决定着人类对资源环境系统的开发和利用程度。基于资源环境供给清单与区域发展需求清单,运用地理探测器模型^[57](Geo Detector),明确资源、环境、生态、社会、经济等要素对资源环境供给侧、区域发展需求侧的影响及其交互作用方式,并予以定量化表达,进而识别资源环境承载力主控要素。

4.3 架构资源环境承载力供需系统

系统动力学 (System Dynamics) 极力从系统内部的微观结构入手,在把握系统内部结构、参数及总体功能的前提下,分析并把握系统的特性与行为,其主要特点是能方便地处理非线性和时变现象,能作长期的、动态的、战略性的仿真分析与研究^[58]。运用动态平衡理念和系统动力学模型,基于供给侧、需求侧的结构关系分析,以主控要素为主体架构,将系统与环境、系统内部各子系统之间相互作用的复杂关系通过一系列微分过程和函数关系加以表述,模拟不同策略下区域资源环境供需网络系统载体与承载对象的各种反馈关系,从整体上分析人口、资源、环境和发展之间的相互关系,从而实现供需网络系统结构、功能及发展趋势的模拟和预测,为社会经济活动的可持续发展规划提供科学参考及依据。

5 结论与思考

5.1 结论

资源环境承载力是地球系统科学研究的前沿领域和优先研究主题之一。开展供给侧与需求侧的量化分析与对比研究,科学认知供给侧、需求侧的相互作用关系,是资源环境承载力内涵的本质特征与基本要求。在系统梳理国内外资源环境承载力相关研究的基础上,提出基于供需动态平衡的区域资源环境承载力综合评价的研究框架和理论模型,为承载力的相关研究提供理论参考和借鉴。

1) 资源环境承载力描述了在一定时空范围内,在区域资源结构满足可持续发展需要、区域环境功能维持其稳态效应的条件下,区域资源环境系统所能承载的人口数量或社会经济规模的“最大负荷”或“有效载荷”能力。本质上,资源环境

承载力是关于某一时空尺度下资源环境供给侧与区域发展需求侧的数理关系的反映,强调以弹性阈值表征区域资源环境系统(供给侧)与社会经济系统(需求侧)之间的关系状态。

2) 基于动态平衡理念,以供给侧、需求侧为切入点,资源环境承载力评价理论模型由供给、需求两大模块组成,供需清单的建立、主控要素的识别、供需网络的架构是模型构建的关键环节。采用现代地学技术、系统结构模型化技术、地理探测器模型、系统动力学模型等技术方法,构建资源环境承载力供需清单,明确资源约束、环境胁迫、生态安全等主控要素与供需平衡的关系特征,系统分析人口、资源、环境和发展之间的相互作用机理,可为区域可持续发展规划提供科学参考及依据。

3) 将供需动态平衡下资源环境承载力综合评价模型应用于杂谷脑河流域,以土地资源生产潜力为供给侧、以人口营养摄入量为需求侧,测算出不同发展阶段杂谷脑河流域土地资源承载力的弹性阈值,并动态评估了杂谷脑河流域土地资源承载力状态,证明了模型的实用性和有效性。

5.2 思考

供需动态平衡理念为资源环境承载力评估提供了新的思路和模式,是对承载力研究的有益补充和完善。未来,以资源环境承载力科学内涵为出发点,诸如供需清单的合理性、指标测度的科学性与实际工作中的可操作性、关键步骤和集成方法的选择等许多科学问题尚待进一步研究。

1) 资源环境承载力是在资源利用上线、环境质量底线、生态保护红线等约束条件下,由载体(资源环境供给侧)和承载对象(区域发展需求侧)随着时空尺度变化而交互耦合的动态变量。受地域系统开放性、资源环境要素流动性、资源环境要素功能多样性等影响,资源环境承载力评价研究

中存在着广泛的不确定性。因此,科学识别资源环境承载力评价中不确定性的产生路径和敏感性因素,构建差异化供需清单,提高核算结果的可靠性和公信力,是模型应用过程中的重要内容。

2) 供需动态平衡下资源环境承载力评价理论模型涉及资源、环境与社会经济等领域,是集成生态学、资源学、地理学、经济学、数学等多学科的交叉研究。在实践应用中,应充分吸收各学科的最新研究成果,不断更新、筛选适用的研究手段,重视多元化方法、先进技术手段的综合集成应用,提高评价结果的准确性和可信度,以推动资源环境承载力研究的进一步深入和发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 毛汉英. 人地系统优化调控的理论方法研究[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 608-619.
- [3] 刘殿生. 资源与环境综合承载力分析[J]. 环境科学研究, 1995, 8(5): 7-12.
- [4] 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—以宁夏西海固地区和云南怒江州为例[J]. 地理研究, 2015, 34(1): 39-52.
- [5] 段佩利, 刘曙光, 尹鹏, 等. 中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系[J]. 经济地理, 2018, 38(5): 60-67.
- [6] 王振波, 张蕾, 张晓瑞, 等. 基于资源环境承载力的合肥市增长边界划定[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2302-2311.
- [7] 刘凯, 任建兰, 张理娟, 等. 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, 2016, 36(9): 77-84.
- [8] 樊杰, 周侃, 王亚飞. 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, 2017, 36(3): 266-276.
- [9] 封志明, 杨艳昭, 江东, 等. 自然资源资产负债表编制与资源环境承载力评价[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7140-7145.
- [10] 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.
- [11] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying Capacity Reconsidered: From Malthus' Population Theory to Cultural Carrying Capacity[J]. Eco-logical Economics, 1999, 31(3): 395-348.
- [12] 王传艺, 林征. 未来地球计划战略研究议程 2014—全球可持续发展研究战略优先领域[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [13] RUNNING S W. A Measurable Planetary Boundary for the Biosphere[J]. Science, 2012, 337(6101): 1458-1459.
- [14] 牛方曲, 孙东琪. 资源环境承载力与中国经济发展可持续性模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2604-2613.
- [15] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1475-1489.
- [16] 张林波, 李文华, 刘孝富, 等. 承载力理论的源起、发展与展望[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 878-888.
- [17] 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.
- [18] 吕一河, 傅微, 李婷, 等. 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, 2018, 37(1): 130-138.
- [19] 刘文政, 朱瑾. 资源环境承载力研究进展: 基于地理学综合研究的视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(6): 75-86.
- [20] 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.
- [21] 郭秀锐, 毛显强. 中国土地承载力计算方法研究综述[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 705-711.
- [22] 《中国土地资源生产能力及人口承载量研究》

- 课题组. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究[M]. 北京:中国人民大学出版社, 1991.
- [23] HIGGINS G M, KASSAM A H, NAIKEN L, et al. Potential Population Supporting Capacities of Lands in Developing World [R]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
- [24] 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[J]. 地理学报, 2010, 65(1):82-90.
- [25] 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.
- [26] VARIS O, VAKKILAINEN P. China's 8 Challenges to Water Resources Management in the First Quarter of the 21st Century[J]. Geomorphology, 2001, 41(2-3):93-108.
- [27] 威廉·福格特. 生存之路[M]. 张子美, 译. 北京:商务印书馆, 1981.
- [28] STRASSBURG B B N, LATAWIEC A E, BARIONI L G, et al. 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, 2014, 28:84-97.
- [29] REES W E. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity:What Urban Economics Leaves Out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):121-130.
- [30] WACKERNAGEL M, REES W. Our Ecological Footprint:Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island, BC:New Society Publishers, 1998.
- [31] REES W E. Eco-footprint Analysis:Merits and Brickbats[J]. Ecological Economics, 2000, 32(3): 371-374.
- [32] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616.
- [33] 焦雯君, 闵庆文, 李文华, 等. 基于ESEF的水生生态承载力:理论、模型与应用[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4):1041-1048.
- [34] DAVID G S, CARVALHO E D, LEMOS D, et al. Ecological Carrying Capacity for Intensive Tilapia (Oreochromis Niloticus) Cage Aquaculture in a Large Hydro Electrical Reservoir in Southeastern Brazil[J]. Aquacultural Engineering, 2015, 66:30-40.
- [35] ODUM H T, ODUM E C. Energy Basis for Man and Nature[M]. New York:McGraw-Hill, 1981.
- [36] 张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用—以江苏省为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4):653-660.
- [37] ODUM H T, DOHERTY S J, SCATENA F N, et al. Emery Evaluation of Reforestation Alternatives in Puerto Rico[J]. Forest Science, 2000, 46(4): 521-530.
- [38] TILLEY D R, SWANK W T. Emery-based Environmental Systems Assessment of a Multi-Purpose Temperate Mixed-forest Watershed of the Southern Appalachian Mountains, USA[J]. Journal of Environmental Management, 2003, 69(3):213-227.
- [39] PENG J, DU Y Y, LIU Y X, et al. 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, 2016, 60:1017-1030.
- [40] 黄秋森, 赵岩, 许新宜, 等. 基于弹簧模型的资源环境承载力评价及应用—以内蒙古自治区陈巴尔虎旗为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(1):173-184.
- [41] 叶文, 王会肖, 许新宜, 等. 资源环境承载力定量分析—以秦巴山水源涵养区为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8):1061-1072.
- [42] 靳亚亚, 靳相木, 李陈. 基于承压施压耦合曲线的城市土地承载力评价——以浙江省 32 个城市为例[J]. 地理研究, 2018, 37(6):1087-1099.

- [43] WANG S P, LI K Q, LIANG S K, et al. 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, 2017, 142:90-97.
- [44] 余丹林, 毛汉英, 高群. 状态空间衡量区域承载状况初探—以环渤海地区为例 [J]. 地理研究, 2003, 22(2):201-210.
- [45] 郭轲, 王立群. 京津冀地区资源环境承载力动态变化及其驱动因子 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(12):3818-3826.
- [46] 齐文虎. 资源承载力计算的系统动力学模型 [J]. 自然资源学报, 1987(1):38-48.
- [47] 何仁伟, 刘邵权, 刘运伟. 基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例 [J]. 地理科学, 2011, 31(11):1376-1382.
- [48] 王俭, 李雪亮, 李法云, 等. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2233-2240.
- [49] 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.
- [50] MEADOWS D H, MEADOWS D L, RANDERS J, et al. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind [M]. New York: Universe Books, 1972.
- [51] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment [J]. Science, 1995, 268(1):89-90.
- [52] COHEN J E. Population, Economics, Environmental and Culture: An Introduction to Human Carrying Capacity [J]. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(6):1325-1333.
- [53] 闫卫坡, 王青, 郭亚琳, 等. 岷江上游杂谷脑河流域土地承载力研究. 四川农业大学学报, 2012, 30(4):451-455.
- [54] SUN T, FENG Z M, YANG Y Z, et al. Research on Land Resource Carrying Capacity: Progress and Prospects [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(4):331-340.
- [55] 封志明, 杨艳昭, 张晶. 中国基于人粮关系的土地资源承载力研究: 从分县到全国 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(5):865-875.
- [56] 王青. 山区土地利用与覆被变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2012:41-72.
- [57] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.
- [58] 许光清, 邹骥. 系统动力学方法: 原理、特点与最新进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2006, 8(4):72-77.

作者贡献说明

闫卫坡: 收集、整理文献, 撰写文章, 设计文章框架、模型架构;
郭亚琳: 文字润色、模型架构;
王 青: 趋势研判、模型架构;
安以达: 文献分析;
韩云伟: 数据收集。

作者简介



郭亚琳: 博士, 讲师; 参与自然科学基金 2 项、科技部国家重点研发项目 2 项, 四川省科技支撑计划 6 项, 发表论著 30 多篇; 主要研究方向: 山区资源环境承载力、聚落生境与气候变化。