

资源跨区域流动视角下的承载力评价 ——一个动态评价框架及其应用

张书海, 阮端斌

(中国人民大学公共管理学院, 北京 100872)

摘要: 资源环境承载力是衡量区域资源基础条件、指导国土空间布局的重要依据。针对当前承载力评价中动态承载机制不够清晰、资源要素动态性评价不够充分等问题, 从开放系统角度反思承载力的时空动态性, 探索资源、环境、社会经济以及人口四个子系统间的关联耦合机制, 讨论资源流动对资源流入地和流出地承载规模及承载质量的影响, 构建了一个适用于县域资源环境承载力动态评价的理论框架, 并将其应用于天津市武清区。实证结果表明: 相较于静态评价, 该框架下的动态承载力评价结果更贴近于地方资源环境支撑的真实情况, 对于地方层面的国土空间规划决策和区域层面的资源空间优化具有一定支撑作用。

关键词: 资源环境承载力; 动态承载力; 资源跨区域流动; 物质流分析; 成本收益分析; 天津市武清区

资源环境承载力是表征人与自然关系、衡量生态环境本底与社会经济活动是否协调的重要依据^[1]。20世纪80年代以来, 伴随快速的工业化、城镇化进程, 中国不少地区出现了资源消耗过快、环境污染、生态退化等问题, 社会经济活动的高强度与资源环境承载能力的有限性之间的矛盾愈发突出^[2,3]。资源环境承载力评价逐渐成为政策研究和实践领域的重要命题, 在主体功能区建设、环境影响评估、海洋开发保护、国土空间规划等政策制定中发挥了重要作用。2019年5月, 中央印发《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》, 提出在“双评价”基础上开展规划编制工作, 进一步明确了资源环境承载力在优化功能空间布局、划定“三线”、强化用途管制等方面的基础性地位^[4]。

由于资源条件、环境本底和资源利用水平存在的地理空间差异和空间尺度问题, 资源环境承载力具有典型的动态特征, 即某地区资源环境承载力的评价结果会受到上述三方面要素在地区之间交互作用的影响, 这是当前承载力研究的重点和难点问题。随着资源利用技术水平和区域经济联系程度提升, 现实世界中普遍存在资源跨地区的流动与互补现象^[5], 相比之下, 与该现象相匹配的动态资源环境承载力的评价理论和方法仍需完善, 即在考虑部分资源环境要素流动的前提下, 如何相对客观、动态地评估承载力, 以使评价结果更好地支撑空间规划, 促进区域间的要素合理分配。基于上述问题, 本文从承载力研究的演变脉络出发, 探索承载力子系统之间的作用机制, 将被评估区域看作一个可与外界交换的开放系统, 构建了一个考虑资源跨区域流动的资源环境承载力动态评估的理论框架, 并以天津市武清区为例, 检验该框架的适用性。

收稿日期: 2020-03-30; 修订日期: 2020-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100801)

作者简介: 张书海 (1983-), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士, 讲师, 研究方向为空间规划、土地权属等。

E-mail: zhangshuhai@ruc.edu.cn

1 资源环境承载力研究的发展演进

从研究的发展演进来看，资源环境承载力是一个问题导向下的阈值概念。早期的承载力研究以马尔萨斯《人口原理》为代表，探讨一定物质资源供给条件下的人口阈值，奠定了承载力的研究基础^[6]。20世纪20年代，Park等^[7]强调环境对生物种群数量的限制作用，明确承载力的生物阈值内涵。20世纪中后期，随着资源供需矛盾、环境污染等问题的日益严峻，以及全球范围内对可持续发展理念的重视，承载力概念被引入经济学、环境学等学科，探讨不同领域的承载阈值。如罗马俱乐部构建的“世界模型”探究人口、粮食生产、资源消耗、环境污染、工业化等要素作用下的经济增长问题，延伸了承载力的“最大阈值”内涵^[8]；Arrow等^[9]提出环境承载力、生态系统弹性等概念，进一步探讨了经济增长与环境质量之间的关系；随后，承载力内涵在文化承载、空间规划等方面扩展创新^[10,11]，研究体系不断完善。

与国外相比，我国资源环境承载力研究起步较晚但发展迅速，研究脉络呈现出“资源生产潜力阈值—单项要素限制性阈值—综合阈值”的演进路径。较早的承载力研究聚焦于农业生产，关注土地生产潜力对人口的承载能力^[12,13]。到了20世纪80年代，为有效应对人口增长与资源消耗、环境污染之间的矛盾，以资源、环境等单项要素为承载主体的承载力评价体系逐渐形成，研究热点覆盖水资源承载力的评价及其对要素空间布局的指导作用、矿产资源承载力评价指标体系及其对承载人口的影响、环境承载力的阈值内涵、计算模型与规划思路^[14-16]等，单项要素对人口及其社会经济活动的约束研究显著强化。近年来，单要素承载力的局限性和生态环境的系统性特征显现，区域承载力、生态承载力等被纳入综合的资源环境承载力研究范畴^[17,18]，承载力内涵得到不断延伸与拓展。

承载力内涵的扩展也导致其科学含义模糊化，评价结果的不确定性以及评价结果与现实条件的巨大差异使评价本身受到一定质疑^[19,20]，资源环境承载力的动态复杂性成为亟待解决的研究问题。部分学者探讨资源在不同地理空间资源势影响下发生的空间位移（横向流动）及其在不同产业、消费链条中的迁移转化（纵向流动）规律^[21]，揭示了承载力系统内外部物质在不同时空尺度的流动过程。将动态承载力概念应用于实践时，已有研究侧重于不同区域承载力差异比较或同一区域不同时间的承载力演变过程^[22]，承载力阈值本身偏静态；考虑阈值动态的研究则偏重环境要素，关注“环境达标”条件下的物质交换平衡，强调要素自身流动、物质区域交换、气候条件影响等自然因素对于承载力动态的作用和影响^[23,24]，社会经济系统影响下的资源流动研究较为薄弱。由于资源利用中普遍存在跨地区流动与互补的事实，对于部分经济发达地区，基于静态评价结果的承载力可能已经严重超载，但现实中其通过资源动态流动较好支撑城市发展，超载情况没有严重到难以治理的程度；对于部分自然资源丰富的经济欠发达地区，静态评价承载潜力可能很大，但实际上资源已经在区域范围内流动和使用，其实际承载潜力大幅度减小，未来如果过度增加规模则存在超载风险。以开放系统的视角探讨动态承载力，有利于使评价结果更贴近实际情况，从而更好地支撑决策，避免上述决策偏差。

2 基于时空依赖属性的承载机制分析

资源环境承载力是一个具有时空依赖属性的动态概念（图1）。时间维度上，承载力

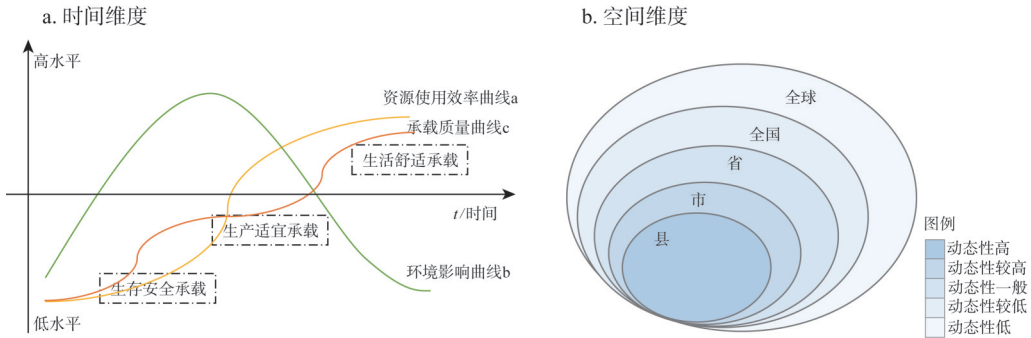


图1 资源环境承载力的时空依赖性

Fig. 1 Spatial and temporal dependency of resources and environment carrying capacity

阈值与不同时期人类利用资源的技术能力和效率相关，一般技术水平越高，资源使用效率也越高（资源使用效率曲线a）；资源使用的环境影响曲线b则呈现倒U形，在发展初期，环境污染随着资源使用量扩大由低趋高，随着经济发展水平和环境治理水平提升，资源使用的环境影响不断降低；承载力阈值还会随着不同时期人类对生活质量的要求不同而变化，承载力质量沿着“生存安全承载—生产适宜承载—生活舒适承载”的发展轨迹爬升（承载质量曲线c）。空间维度上，承载力在不同空间尺度上的内涵和属性存在差异，一般而言空间尺度越大，承载力的确定性越高，评价要素的稳定性越强。中小尺度空间单元往往因受到跨区域资源要素流动的影响，承载力阈值存在很大不确定性，一般而言空间尺度越小，要素区域流动性越强（图b）。

从承载力的时空依赖属性出发，资源跨区域流动情境下的承载机制可划分为承载主客体间交互作用及区域间效率差异驱动作用两个维度（图2）。图中下半部分揭示了承载主客体间的交互作用，主要体现为资源、环境、社会经济以及人口四个子系统的动态关

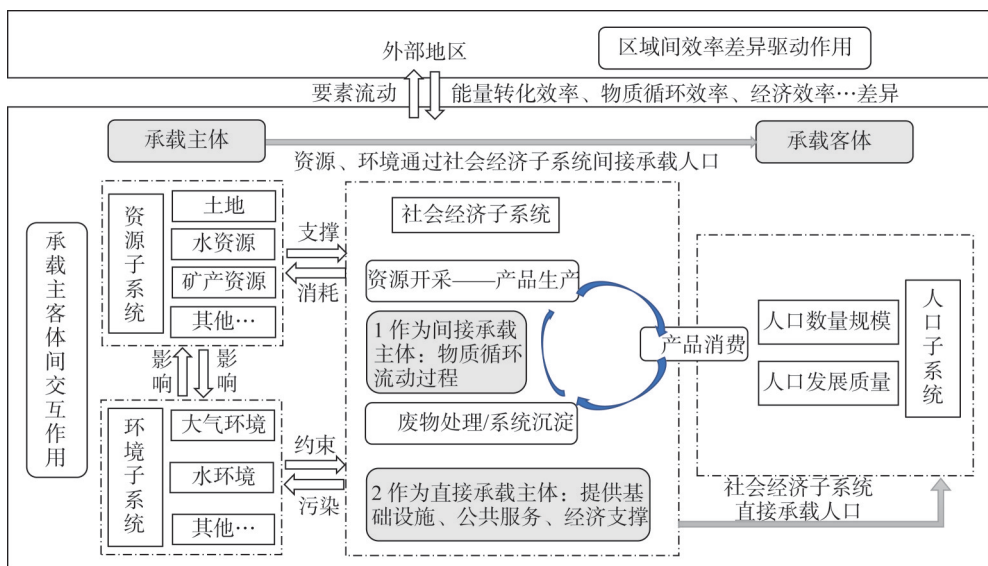


图2 资源环境承载力的承载机制

Fig. 2 The carrying mechanism of resources and environment carrying capacity

系，承载主体包括支撑性的资源子系统、约束性的环境子系统以及与人口高质量发展相关的社会经济子系统。其中，资源、环境要素是基础性的承载主体，二者通过开采利用能源资源、提供人类生存发展所必须的物质生活空间，分别对人类社会的发展进行正向支撑和负向约束；社会经济子系统则具有间接承载主体和直接承载主体的双重功能。一方面，其作为资源环境与人口子系统之间的桥梁，决定了资源利用效率，并通过生产、交换、消费、分配等活动进行物质能量传输，间接支撑人口子系统；另一方面通过提供基础设施和公共服务产品，决定承载阈值的质量，是实现资源环境承载力从“一般承载”到“高质量承载”的重要媒介^[25]。人是整个复合系统的最终承载对象，人口子系统作为承载力的客体，其表征结果主要包括最大可承载人口规模，同时也应考虑特定时期、特定区域的人口发展质量需求。图中上半部分进一步从区域视角审视各子系统间的相互作用，即由于不同空间单元在资源禀赋、经济发展阶段及技术水平上存在差异，具有较高资源利用效率水平的地区能为流动性要素提供更高的潜在收益，从而吸引资源在区域之间流动和在特定空间上集聚^[26]。资源流动后形成的新的资源配置格局将进一步影响区域资源禀赋、产业结构、基础设施及社会服务水平，进而改变研究区资源环境承载力的静态格局。综合上述分析，区域间资源利用效率的差异推动流动性资源要素在不同地理空间重新配置，并与环境、社会经济及人口子系统耦合，共同揭示区域范围内的动态承载机制。

3 资源跨区域流动视角下的动态承载力评价框架

基于前文作用机制的分析，本部分构建动态承载力评价框架。框架的构建基于不同县域单元在资源禀赋、社会经济发展水平上存在异质性，资源跨区域流动将对资源输入输出区产生相关经济、社会和环境影响。以A、B两个地区为例，探讨资源流动情境下不同地区承载力的变化机制（图3）。假设A地资源禀赋丰富，但经济水平落后，资源使用效率较低，绝对资源数量所决定的静态承载力阈值较高，但考虑高质量发展需求、包含社会经济指标的承载力阈值较低；与之相对，B地拥有更高的社会经济发展水平，较高的劳动生产率决定了较高的资源利用效率，但B地社会经济发展受到水、矿等资源短

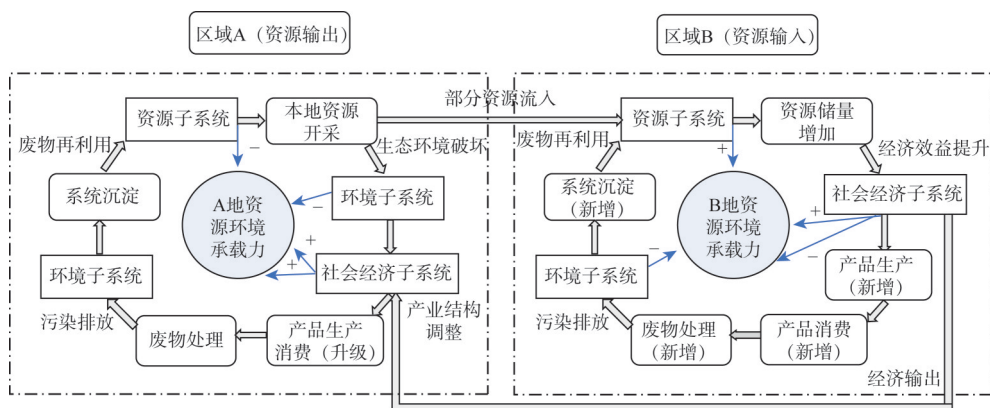


图3 资源跨区域流动视角下的承载力变化过程

Fig. 3 Changing process of carrying capacity from the perspective of cross-regional flow of resources

板束缚,难以在不降低现有生活水平条件下维持或扩大该区域的人口及其社会经济活动规模。如果两地通过市场进行可移动资源贸易活动,资源从A地流入B地,资源流动过程包括产品生产、制造、消费、循环利用以及最终丢弃、向环境系统排放废弃物的整个周期^[27],主要产生以下效应:

(1) 对于资源输入地B地而言,首先,资源输入使得B地资源储量增加,资源子系统短板得到弥补从而带来承载能力提高;其次,资源投入到产品生产中,由于B地具备更高的技术水平和资源利用效率,消耗相同数量的资源相较于A地可以产生更高的效用,实现更大规模和更高质量的承载;再次,B地需要负担获取资源的一系列成本,社会经济子系统受到外流压力影响,这部分效应与较高资源利用效率的优势会有一定程度的抵消;最后,资源生产消费过程中产生的废弃物等环境影响,导致B地环境子系统的承载力降低。综合上述分析,B地的资源环境承载力变化结果将由上述四个作用力共同决定。

(2) 对于资源输出地A地而言,资源输出使A地承担了自然资源开发利用的生态环境成本,资源流动进一步减少其资源储量,导致A地资源和环境承载能力弱化;另一方面,资源贸易为A地带来经济收入和技术经验,有利于其将资源优势转化成经济优势,提升现有资源利用水平,同时改善基础设施和公共服务状况,增强A地社会经济子系统的承载能力和承载质量。最终A地承载力评价结果将取决于“输出自然资源—弱化资源环境子系统的人口承载力”效应与“增加贸易收入—提升社会经济子系统的人口承载力”效应的综合比较。总体而言,由于资源流动使资源分配给了更有效率的利用主体,资源跨区域流动提升了A、B两地资源使用的总效用。

承载力表征结果与评价方法上,以往关于资源环境承载力评价表征结果有能力、压力、潜力之分^[28],能力用以表征当前条件下最大的承载规模;压力反映了区域人口及相应社会经济活动对复合系统的负向作用;潜力表示区域剩余可承载空间。本文所建立的承载力动态评价的理论框架,实际上融合了能力和部分可提升潜力,探究在利用区域本底和获取外来资源环境要素可能的条件下,被评估区域综合的资源环境承载力。为便于实践操作和结果比较,将承载主体界定为资源、环境以及社会经济三个独立子系统,采用区域最大可承载人口规模作为承载能力表征结果。按照“统计承载主体子系统的要素现状总量—确定要素人均使用标准—计算最大可承载人口规模”的基本思路评价区域单要素承载力;同时,考虑到资源、环境、社会经济子系统之间要素对承载力支撑作用存在相互排斥的可能性,根据木桶原理,采用单系统最小值作为区域资源环境承载力最终评估结果。评价指标借鉴以往研究^[25,29,30],选取土地资源(包含耕地资源、城镇生活空间、农村生活空间)、水资源等相关指标衡量区域的自然资源禀赋;从大气环境和水环境两个维度出发,采用化学需氧量、氨氮环境容量等水环境容量、二氧化硫大气环境容量指标计算区域环境系统对人口的供容能力;结合人均道路与交通设施用地面积、人均公园绿地面积、人均公共管理与公共服务用地面积等指标衡量区域的社会经济发展能力。

进一步引入物质流和成本收益分析法以实现动态评价框架的定量计算。物质流分析法用于分析要素在资源、环境以及社会经济子系统之间流动的全过程。该方法基于能量守恒定律(即一定时期内经济系统的物质输入量等于输出量与储存量之和),通过建立相应指标体系,量化分析物质从开采到进入人类经济系统,流经经济系统并最终反馈到生态环境的全过程,能够较为真实地反映资源投入、资源利用效率及其环境影响。其关键

指标直接物质输入量 (DMI) 衡量了所有具有经济价值的直接进入经济生产和消费活动的物质, 直接物质输出量 (DPO) 表示经济系统运行中所产生的各类排放至自然环境中的废弃物, 包括水体污染物、大气污染物和固体废弃物, 循环使用的物质不计入^[31]。基于物质流分析法, 本文构建了资源生产率与资源环境比两个指标, 衡量资源交换对区域社会经济以及环境子系统的影响程度。资源生产率表达式为国内生产总值/直接物质输入量^[32], 表示投入一单位资源所能带来的经济效益的增加量; 资源环境比为废弃物排放总量/直接物质输入量, 衡量单位资源投入产生的环境污染, 在文中将进一步转化为环境子系统的人口承载规模。

成本收益分析法用于分析资源跨区域流动过程中的财务费用与收益。对于资源输入区而言, 其成本主要包含购买资源成本、运输成本、工程建设与运行维护成本以及相应税费^[33]。其中, 购买资源成本结合资源输出区单位资源价格、通货膨胀预期以及价格调整趋势进行测算; 单位运输成本和税费参考资源类型及专业部门标准数据、实践经验数据; 工程建设与运行维护成本结合项目类型和投资回收期按年度分摊。对于资源输出区而言, 其净收益为资源输出量乘以资源交易价格再扣除相应比例税费和环境损失成本, 资源开发造成的生态环境损失可采用防护费用和排污费用间接估算。

4 实证研究

4.1 研究区概况与数据来源

4.1.1 研究区概况

武清区地处京津之间、天津市西北部, 是京津城际出京后第一个停靠站。全区常住人口 119 万人 (2018 年), 地区生产总值 1226.51 亿元, 在天津全市 16 个区中排名第 2, 全域面积 1574 km²。全区地处华北冲积平原下端, 海拔高差仅 10.2 m, 地势平缓; 属温带半湿润大陆性季风气候, 四季分明, 年平均气温 12.2 ℃, 平均降水量 557.3 mm; 境内河流年径流量 4.2 亿 m³, 平均年产水量 1.58 亿 m³, 总体水资源贫乏; 2018 年空气质量达标率为 57%, 大气环境、水环境等污染状况有待改善。作为北京非首都功能疏解的重要承载地以及天津京津冀协同发展的前沿阵地, 武清区近年来人口和经济增速较快, 支撑区域发展的资源、环境等要素约束凸显。开展资源跨区域流动的资源环境承载力评价, 对支撑武清区国土空间开发保护战略、国土空间布局优化具有重要意义。武清区水土资源及社会经济要素基本概况参见图 4。

4.1.2 数据来源

武清区资源环境承载力评价数据主要有两个来源, 一是开展武清区国土空间规划工作的部门调研数据, 二是公开发行的统计年鉴和报告。数据覆盖资源、环境、社会经济子系统的人口承载能力测算, 物质流分析以及成本收益分析三个部分。其中由于武清区物质输入输出统计指标缺失, 且其总体发展状况与天津市平均水平相当, 文章采用天津市数据代替, 推算武清区的资源生产率与资源环境比。数据时间以 2017 年为基准, 缺失数据采用最新年份数据代替, 各部分基础数据来源参见表 1。

4.2 天津市武清区资源环境承载力实证研究

4.2.1 封闭系统条件下的资源环境承载力评价

资源子系统中重点测算土地资源 (包括耕地资源、城镇生活空间以及农村生活空

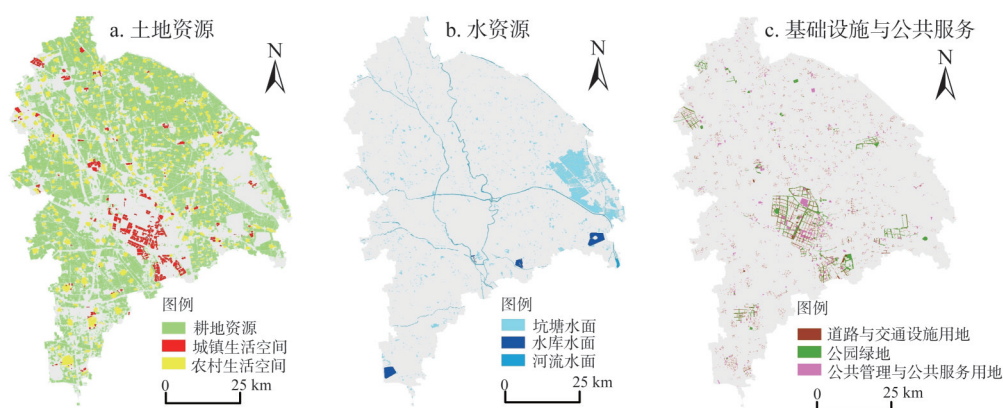


图4 武清区资源与社会经济要素基本概况

Fig. 4 Basic overview of resources and socio-economy in Wuqing district

表1 资源环境承载力计算数据来源

Table 1 Data sources for calculating resources and environment carrying capacity

类型	具体内容	数据来源
一、子系统人口承载力	资源子系统人口承载力	全国第三次土地调查成果、全国土地利用变更调查成果、《天津市水资源公报》等
环境子系统人口承载力	天津市水环境功能区划、《武清区环境质量报告书》以及天津市生态环境检测中心官方网站	
社会经济子系统人口承载力	《天津市统计年鉴》《武清区统计年鉴》、专业部门统计数据（包括医疗卫生设施基础资料、武清区教育现状情况等）	
二、物质流分析		《中国统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国林业年鉴》《中国钢铁工业年鉴》《中国有色金属工业年鉴》《中国矿业年鉴》《中国建筑业年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境年鉴》《天津市环境质量报告书》以及天津市生态环境检测中心官方网站
三、成本收益分析		水资源行业相关网站公布的价格实时数据

间)和水资源的承载力。2017年武清区耕地总面积为84794.73 hm²,生产粮食总产量52.72万t,按照人均粮食需求量440 kg/(人·年)计算,可承载人口规模约为119.88万人;城镇住宅用地面积为3582.99 hm²,农村宅基地面积为11342 hm²,参考《城市居住区规划设计标准》(GB50180-2018)以及天津市宅基地政策文件,武清区城镇生活空间和农村生活空间可承载人口规模分别为122.84万人和180.64万人;可利用水资源总量采用当地降水形成的地表和地下产水总量表示(不包括区域外调水资源),总计2.06亿m³,结合武清区用水结构及人均用水标准计算,可承载62.27万人;基于木桶原理,资源子系统可承载人口规模仅为62.27万人,水资源不足是武清区资源承载力评估的主要短板。

环境承载力包括水环境和大气环境两部分。化学需氧量COD和氨氮NH₃-N是武清区水环境的主要污染物质,通过水文学一维模型估算其环境容量分别为17791.93 t/a和889.60 t/a。根据《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》,一级城市人均COD排放系数77 g/(人·天),人均氨氮排放系数9.5 g/(人·天),结合生活源污水产生量统计结果,武清区水环境可承载人口规模为112.19万人;大气实时监测数据主要选取二氧化硫排放量,采用A值法估算其环境容量为43397.83 t,结合武清区人口生活和产业结构标准,推算其大气环境可承载103.36万人;采用最小短板原则判断武清区环境子系统

可承载人口规模为103.36万人，是制约武清区承载力提升的第二短板。

社会经济子系统方面，基础设施与公共服务采用道路与交通设施用地、公园绿地以及公共管理与公共服务用地（包括行政、文化、教育、体育、卫生等机构和设施用地）三个指标进行衡量。武清区上述三种用地类型面积分别为1817.87 hm²、1885.60 hm²和1508.63 hm²，综合《国家园林城市标准》和天津市社会经济发展水平判断，三种用地类型可承载人口相应为151.49万人、157.13万人和188.58万人。汇总测算武清区社会经济子系统可承载151.49万人，为三个子系统最高值。资源、环境、社会经济子系统内部各要素最大可承载人口规模参见图5。

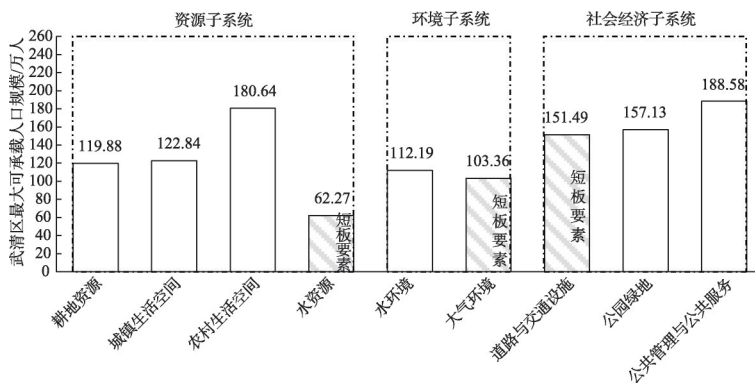


图5 武清区资源、环境、社会经济子系统可承载人口规模

Fig. 5 The population size that can be carried by the resources, environment and socio-economic subsystems of Wuqing district

综合上述评估结果，在封闭系统（不考虑跨区域调水）条件下武清区最大可承载人口规模取最小短板为62.27万人，而2017年武清区常住人口119.56万人，《武清2035年发展战略规划》预测其总人口规模将达180万人，是封闭系统条件下承载力规模的2~3倍。传统承载力评估突出了水资源作为武清区承载力的短板要素，却忽略了实际存在、未来可能发生的要素跨区域流动、以及较高的社会经济发展水平与资源利用效率，造成评估结果与客观发展现状及其目标定位不相符。考虑到水资源对提升武清区资源环境承载力的重要性，且水资源跨区域流动具有一定的现实需求和可能性，本文将水资源输入输出量纳入物质流分析中，结合水资源流动的成本收益分析，考察其跨区域流动对武清区承载力的影响。

4.2.2 基于短板资源跨区域流动的动态承载力评价

基于木桶原理，武清区资源承载力要提升至与第二短板（环境子系统人口承载规模）相当，至少要跨区域交易9895.58万t水资源。假设武清区资源生产率、资源环境比处于天津市平均水平。根据物质流分析结果（表2），2017年天津市直接物质输入总量DMI等于288792.57万t，包括275000万t水资源；直接物质输出量DPO为92633.11万t，其中废水排放总量90789.96万t，主要污染物COD和氨氮化物排放量分别为9.26和1.42万t。水资源输入输出量均占总物质输入输出量的95%以上，能够有效衡量水资源流动对区域社会经济系统的影响。结合天津市国民生产总值统计数据，2017年天津市平均资源生产率为642.30元/t，假设武清区将引入的9895.58万t水资源全部投入使用（包括生活用水、

表2 天津市物质流分析结果

Table 2 Results of material flow analysis in Tianjin

类型		分类组成	统计量/万t	合计/万t
直接物质 输入DMI	生物质	农业、林业、牧业、渔业等生物量	678.59	288792.57
	非生物质	化石燃料、矿物质（黑色金属、有色金属、非金属矿物等）	13113.98	
	水资源	供水总量	275000.00	
直接物质 输出DPO	水体污染物	废水排放总量	90789.96	92633.11
	大气污染物	二氧化硫、氨氮化物、烟尘排放量	26.31	
	固体废弃物	一般工业固体废物、城市生活垃圾、农村生活垃圾	1801.90	
	耗散流	化肥施用量、农药使用量、农膜使用量	14.94	
资源生产率			642.30元/t	
资源环境比			0.32	

农业用水、工业用水以及生态用水), 总计能获得 635.59 亿元的经济效益, 若将部分收入投入基础设施建设和公共服务供给中, 其社会经济子系统承载人口规模将进一步提高; 与此同时, 天津市平均资源环境比为 0.32, 表明在当前生活方式、产业结构、生产效率等条件不变情况下, 每输入一单位资源将多排放 0.32 单位污染物, 武清区环境子系统人口承载力相应减少 11.13 万人。

南水北调中线、东线等工程为天津市购买水资源成本收益核算提供了实践经验参考。2019 年国家发展改革委《关于南水北调中线一期主体工程供水价格有关问题的通知》等文件提出天津段工程定价应基本涵盖贷款本息、补偿工程基本运行维护费用、规定税金及其他成本。水资源成本取居民生活用水第一阶段终端水价 4.9 元/m³, 9895.58 万 t 水资源需 4.85 亿元的贸易支出, 即水资源支出与水资源交易后经济效益比为 1 : 131。对于水资源输出区而言, 采用防护费用和排污费用间接估算水资源开发的环境损失约为 0.35 亿元, 而富余的水资源强化了其与武清区的联系, 在带来资源贸易收入的同时有利于激发其产业结构转型升级, 推动基础设施与公共服务建设, 从而显著提升资源输出区人口的生活品质。

综合上述分析, 与封闭系统条件下的承载力评估结果相比, 在至少不损害资源输入输出区总体承载力水平的情况下, 水资源跨区域流动有效解决了武清区承载力的“最小短板”问题, 武清区凭借其高效的资源利用效率获得高额经济收益外, 其资源环境承载力也由原来的 62.27 万人提升至 92.23 万人, 环境子系统取代资源子系统成为武清区资源

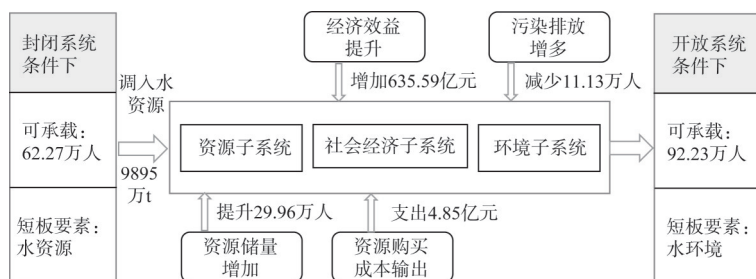


图6 水资源流动对武清区资源环境承载力影响

Fig. 6 Impact of water resources flow on resources and environment carrying capacity of Wuqing district

环境承载力的主要短板。水资源流动对武清区资源环境承载力综合影响结果见图6。从评价结果不难看出，即使考虑资源的跨区域流动，在现有环境污染处理技术水平下，如果要保持环境质量不下降，武清区人口规模仍然处于超载状态，这也是华北地区大部分市县所面临的共同问题。

5 结论与讨论

我国当前的社会经济发展现实中，资源要素在区域范围内的空间流动已经十分普遍，相比之下资源环境承载力研究对于这种“动态性”的理论和实践探索仍需完善，主要集中于两个方面：一是中小尺度空间单位的动态承载力问题。静态的承载力评价对于国家、省等较大空间尺度的评价结果较为准确，资源要素在这些大尺度空间单元范围内基本稳定，但对于县域等中小尺度空间单元，资源要素流动的影响较为突出，静态评价的结果难以反映中小尺度空间单位的实际承载状态；二是社会经济子系统对于资源环境承载力的影响研究。由于地区之间在资源禀赋、资源利用效率等方面存在广泛的异质性，资源流动不仅是资源要素的空间优化，更是整个社会经济体系的系统性优化，资源流动如何影响社会经济子系统和承载力的质量，也是本轮国土空间规划关于高质量发展的要求。

基于上述需求，本文认为承载力动态性的本质是时空依赖性，即资源、环境、社会经济等要素在空间维度上的差异性、流动性和时间维度上的利用水平差异、评价标准差异；在此基础上，以开放系统的视角分析资源的空间流动过程对资源、环境、社会经济子系统的影响，揭示资源流动对于承载规模和承载质量的影响机制，构建了一个动态的资源环境承载力评价框架，以更加客观、准确地评估市县级小尺度单元的资源环境承载力。天津市武清区实证研究结果表明：封闭系统条件下的承载力阈值严重受制于资源短板劣势，与其社会经济规模、资源跨区域调配利用的事实不相符；考虑水资源交易后的资源环境承载力显著提升，环境子系统取代资源子系统成为武清区资源环境承载力的主要制约因素。对比当年水资源统计数据发现，理论框架估算的水资源调取量与武清区实际用水缺口相当，较为准确地反映了武清区实际的承载短板。从实证研究来看，该框架有助于中小尺度空间单元（县域为主）评估和优化自身的资源利用状况，明确其可提升的潜力和需要付出的经济代价，为客观评价和应对自身资源短板要素提供决策方案，为国土空间规划编制、指导区域战略布局提供决策依据。

动态性是资源环境承载力评价的难点问题，未来仍有很大的探索空间，本文提出的动态评价框架可在以下方面进一步完善。首先，更多空间尺度的动态承载力作用机制和评价方法仍有待探索，本文重点探讨县域单元承载力评价如何在区域层面实现子系统之间的优化均衡，对于资源要素在空间上的非毗邻区之间的流动如何处理，尤其是非同一直行政区的区域均衡如何处理，这些问题仍需更多的讨论与实践探索，以实现与五级国土空间规划相匹配的资源环境承载力作用机制和评价体系；其次，承载力空间动态评价要以静态评价为前提，需要区域内所有地方开展相应的静态评价，厘清不同区域之间的承载能力、承载状态和关键短板要素，明确哪些区域属于资源环境要素（潜在）“输出”区域，哪些区域属于资源环境要素（潜在）“吸入”区域，哪些资源环境要素可以流动，在此基础上判断是否进行资源环境要素交换；最后，分析框架的量化是根据研究区特点选

定的要素,但资源环境承载力动态研究还涉及环境子系统的互馈作用、环境治理力度、技术水平提升等情况,对于要素流动的环境和社会经济效应估算,本文从可操作性和数据便于获取的考量出发进行了简化,实践中根据不同地区、流动要素的特征可能调整其他参数,以更加客观地反映县域承载力。

参考文献(References):

- [1] 黄贤金,宋娅娅.基于共轭角力机制的区域资源环境综合承载力评价模型.自然资源学报,2019,34(10):2103-2112. [HUANG X J, SONG Y Y. Evaluation model of regional resource and environment comprehensive carrying capacity based on the conjugation-wrestling mechanism. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2103-2112.]
- [2] 高爽,董雅文,张磊,等.基于资源环境承载力的国家级新区空间开发管控研究.生态学报,2019,39(24):9304-9313. [GAO S, DONG Y W, ZHANG L, et al. Research on urban space development and control of national new areas based on environmental carrying capacity. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9304-9313.]
- [3] 吴大放,胡悦,刘艳艳,等.城市开发强度与资源环境承载力协调分析:以珠三角为例.自然资源学报,2020,35(1):82-94. [WU D F, HU Y, LIU Y Y, et al. Empirical study on the coupling coordination between development intensity and resources-and-environment carrying capacity of core cities in Pearl River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 82-94.]
- [4] 张书海,阮端斌.新时期资源环境承载力评价的几点思考.小城镇建设,2019,37(11):39-45. [ZHANG S H, RUAN D B. Several reflections on the evaluation of resources and environment carrying capacity in the New Era. *Development of Small Cities & Towns*, 2019, 37(11): 39-45.]
- [5] 成升魁,甄霖.资源流动研究的理论框架与决策应用.资源科学,2007,29(3):37-44. [CHENG S K, ZHEN L. Resource flow: Theoretical framework and application for decision making. *Resources Science*, 2007, 29(3): 37-44.]
- [6] MALTHUS T R. *An Essay on the Principle of Population* (1st ed. of 1798). London: Pickering, 1986.
- [7] PARK R E, BURGESS E W. *Introduction to the Science of Sociology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1921.
- [8] 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*. New York: Universe Books, 1972.
- [9] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Economic growth, carrying capacity and the environment. *Science*, 1995, 268(1): 89-90.
- [10] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying capacity reconsidered: From Malthus' population theory to cultural carrying capacity. *Ecological Economics*, 1999, 31(3): 395-408.
- [11] CHENG J Y, ZHOU K, CHEN D, et al. Evaluation and analysis of provincial differences in resources and environment carrying capacity in China. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(4): 539-549.
- [12] 任美镔.四川省农作物生产力的地理分布.地理学报,1950,16(1):1-22. [REN M E. The geographical distribution of crop productivity in Szechuan province, China. *Acta Geographica Sinica*, 1950, 16(1): 1-22.]
- [13] 竺可桢.论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系.地理学报,1964,30(1):1-13. [ZHU K Z. Some characteristic features of Chinese climate and their effects on crop production. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(1): 1-13.]
- [14] 牟海省,刘昌明.我国城市设置与区域水资源承载力协调研究刍议.地理学报,1994,49(4):338-344. [MU H S, LIU C M. A preliminary study on the coordination between regional water resources and its new cities' setting up in China. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(4): 338-344.]
- [15] 王玉平.矿产资源人口承载力研究.中国人口·资源与环境,1998,8(3):19-22. [WANG Y P. Population carrying capacity of mineral resources. *China Population, Resources and Environment*, 1998, 8(3): 19-22.]
- [16] 洪阳,叶文虎.可持续环境承载力的度量及其应用.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. *China Population, Resources and Environment*, 1998, 8(3): 55-58.]
- [17] 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.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 environment based on entropy-weight TOPSIS model. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1): 314-323.]

- [18] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1-11. [CAO Z, MIN Q W, LIU M C, et al. Ecosystem-service-based ecological carrying capacity: Concept, content, assessment model and application. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 1-11.]
- [19] 郝庆, 邓玲, 封志明. 国土空间规划中的承载力反思: 概念、理论与实践. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2073-2086. [HAO Q, DENG L, FENG Z M. Carrying capacity reconsidered in spatial planning: Concepts, methods and applications. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2073-2086.]
- [20] 陈先鹏, 方恺, 彭建, 等. 资源环境承载力评估新视角: 行星边界框架的源起、发展与展望. 自然资源学报, 2020, 35(3): 513-531. [CHEN X P, FANG K, PENG J, et al. New insights into assessing the carrying capacity of resources and the environment: The origin, development and prospects of the planetary boundaries framework. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 513-531.]
- [21] 王宜强, 赵媛, 郝丽莎. 能源资源流动的研究视角、主要内容及其研究展望. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1613-1625. [WANG Y Q, ZHAO Y, HAO L S. Perspectives, main contents and future research of energy resources flow. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(9): 1613-1625.]
- [22] 董越, 徐琳瑜. 一种城市综合承载力双向复合动态评价方法及实证研究. 环境科学学报, 2019, 39(9): 3171-3179. [DONG Y, XU L Y. Theoretical and empirical study of a bidirectional composite dynamic evaluation method of urban comprehensive carrying capacity. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(9): 3171-3179.]
- [23] 高伟, 伊璇, 刘永, 等. 可持续性约束下开放流域系统氮磷环境承载力研究. 环境科学学报, 2016, 36(2): 690-699. [GAO W, YI X, LIU Y, et al. Environmental carrying capacity of nitrogen and phosphorus in an open watershed system under sustainability requirement. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 690-699.]
- [24] 陈章, 刘艳中, 孙荣泽, 等. 基于消费—产出账户分类的开放系统生态足迹研究及应用. 生态科学, 2019, 38(6): 156-164. [CHEN Z, LIU Y Z, SUN R Z, et al. Ecological footprint accounting and application to open eco-economic system based on consumption-output account classification. *Ecological Science*, 2019, 38(6): 156-164.]
- [25] 邱东. 我国资源、环境、人口与经济承载能力研究. 北京: 经济科学出版社, 2014: 27-48. [QIU D. *China's Capacity of Resource, Environment, Population and Economy*. Beijing: Economic Science Press, 2014: 27-48.]
- [26] 王宜强, 赵媛. 资源流动研究现状及其主要研究领域. 资源科学, 2013, 35(1): 89-101. [WANG Y Q, ZHAO Y. Resource flow and main research themes. *Resources Science*, 2013, 35(1): 89-101.]
- [27] 高昂, 张道宏. 基于时间维度的循环经济物质流特征研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 13-17. [GAO A, ZHANG D H. Analysis on characteristics of material flow within circular economy systems based on time dimension. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(9): 13-17.]
- [28] 岳文泽, 王田雨. 资源环境承载力评价与国土空间规划的逻辑问题. 中国土地科学, 2019, 33(3): 1-8. [YUE W Z, WANG T Y. Logical problems on the evaluation of resources and environment carrying capacity for territorial spatial planning. *China Land Science*, 2019, 33(3): 1-8.]
- [29] 欧叟, 张述清, 甘淑, 等. 基于GIS与均方差决策法的山区县域资源环境承载力评价. 湖北农业科学, 2017, 56(3): 454-458. [OU T, ZHANG S Q, GAN S, et al. Assessment of regional carrying capacity of resources and environment at mountain county area based on GIS and mean square difference method. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(3): 454-458.]
- [30] 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. 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. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(1): 1-6.]
- [31] 陈效速, 乔立佳. 中国经济—环境系统的物质流分析. 自然资源学报, 2000, 15(1): 17-23. [CHEN X Q, QIAO L J. Material flow analysis of Chinese economic-environmental system. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 17-23.]
- [32] 段宁, 柳楷玲, 孙启宏, 等. 基于MFA的1995—2005年中国物质投入与环境影响研究. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 105-109. [DUAN N, LIU K L, SUN Q H, et al. Research on material input and environmental impact for China in 1995-2005. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(6): 105-109.]
- [33] 公维龙, 姜宏. 西气东输改扩建工程的经济输量界限研究. 西南石油大学学报: 社会科学版, 2016, 18(4): 8-13. [GONG W L, JIANG H. A study on economic output limits of the reconstruction and expansion of west-east gas pipeline project. *Journal of Southwest Petroleum University: Social Sciences Edition*, 2016, 18(4): 8-13.]

Evaluation of resources and environment carrying capacity from the perspective of resource cross-regional mobility: A dynamic evaluation framework and practice

ZHANG Shu-hai, RUAN Duan-bin

(School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: The resources and environment carrying capacity is an important basis for measuring the resource conditions of a region and guiding the spatial distribution of land. In the current evaluation research of resources and environment carrying capacity, we are faced with problems such as the unclear dynamic mechanism of the carrying capacity and the insufficient dynamic evaluation of the resource elements. In order to objectively and accurately evaluate the resources and environment carrying capacity of small and medium-sized county units under the requirements of high-quality development, this article, from an open system perspective, reflects the spatial and temporal dynamic properties of carrying capacity and explores the coupling mechanism between the four subsystems of resources, environment, socio-economy, and population. Then it discusses the impact of resource flow on the carrying scale and carrying quality of resource inflow and outflow areas. Based on the exploration of the dynamic carrying mechanism of resources and environment carrying capacity, a theoretical framework for the dynamic evaluation of resources and environment carrying capacity at the county scale is constructed. Finally, the framework is applied to Wuqing district of Tianjin to test its applicability. Empirical research results show that, compared with static evaluation, the dynamic carrying capacity evaluation results are closer to the real situation of local resources, environment and socio-economic level, which, to a certain extent, can support the decision-making of territorial spatial planning at the local level and the optimization of resource space at the regional level.

Keywords: resources and environment carrying capacity; dynamic carrying capacity; cross-regional flow of resources; material flow analysis; cost-benefit analysis; Wuqing district of Tianjin