第74卷 第2期
2019年2月

地 理 学 报
ACTA GEOGRAPHICA SINICA

Vol.74, No.2
February, 2019

基于PS-DR-DP理论模型的区域资源环境承载力综合评价

王 亮[1,2,3], 刘 慧[1,2]

（1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室，北京 100101；
2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049；3. 北京师范大学地理科学学部，北京 100875）

摘要： 资源环境承载力状态评价研究成果众多，研究视角多侧重于“压力—状态—响应”模型的传统途径。本文构建了区域资源环境承载力综合评价框架体系，通过建立“PS-DR-DP”正六边形相互作用力理论模型，将资源环境承载力分解为“压力—支撑力”“破坏力—恢复力”“退化力—提升力”三对相互作用力，分别对应资源支撑能力、环境容量和风险灾害抵御能力，根据不同作用力大小变化所引起的六边形的形状和面积的变化综合测度区域资源环境承载力状态的变化。基于上述理论模型，采用分类排列多边形图示法，研究了北京市2010-2015年资源环境承载力状态的变化。结果表明，2010-2015年北京市资源环境承载力趋于理想承载状态。2010年正向因子综合承载作用力与负向因子综合承载作用力的比值为1.0143，比值大于1，区域承载状态较好；而2015年该比值为1.1411。与2010年相比，2015年北京市资源环境承载状态相对更佳。2015年相比较于2010年，负向因子作用力均减弱，正向因子综合作用力增强。2015年人口规模为2171万，承载贡献均值为0.7025，进入最佳承载门槛，且仍具有进一步承载的空间。研究结论对北京市2020年人口规模控制在2300万以内提供了理论支撑。

关键词： 综合承载力；PS-DR-DP模型；人口规模；北京市
DOI: 10.11821/dlxb201902010

1 引言

人类很早就认识到了地球空间与资源的有限性与人地关系和谐统一的重要性，并致力于了解周围的资源环境。承载力概念1920年首次在生态学领域被明确界定为“特定的环境条件下，生物种群、个体数目存在着极限值”[1]。1972年“罗马俱乐部”发表《增长的极限》，首次定义资源环境承载力概念：快速工业化、人口剧增、粮食私有制、不可再生资源枯竭与生态环境恶化，全球的增长将会因为粮食短缺和生态环境破坏在某个时段内达到极限[2]。国内外研究机构随后提出了一系列定义、计量方法与评价指标体系。

国外早期以建树理论、方法研究为主。农业生态区域法（Agro-Ecological Zone Project, AEZ）[3]以自然因素为评价，应用广泛可操作性强，但指标选取限制于农业自然条件，导致评价结论不够全面。系统动力学法（System Dynamics, SD）[4]在深入研究资源环境承载力未来预警状态的当下应用最广泛，通过建立动态模型从系统内部结构来解释因果关系，侧重于环境问题的研究。生态足迹法（Ecological footprint, EF）是计算地

收稿日期： 2017-11-07； **修订日期：** 2018-12-18
基金项目： 国家重点研发计划专项(2016YFC0503506) [**Foundation:** The Specific Project of National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0503506]
作者简介： 王亮(1989-), 女, 湖南娄底, 博士生, 主要研究方向为区域发展。E-mail: wangl.17b@igsnrr.ac.cn
通讯作者： 刘慧(1964-), 女, 陕西兴平, 研究员, 主要研究方向为区域可持续发展。E-mail: liuh@igsnrr.ac.cn
340-352页

球承载力与人类经济活动供需均衡关系与评价系统可持续发展程度的生态承载力计量方法[5-6]，可用于不同区域对照评估，但无法全面反映社会经济活动因素对生态承载力的影响。能值分析法（Energy Analysis, EA）旨在于将系统中不同种类、不可类比的能量转换并建立统一标准的综合能值指标体系，通过能值定量计算评价地球生态承载力[7]，为承载力评估确立了统一的衡量标准，具有划时代的意义[8]，但囿于参数选取准确度高，实际应用存在发展滞后的问题。进入新世纪后，欧美等发达国家的研究者主要对沿海环境保护、水产养殖业、湖泊水质和旅游业承载进行微观区域研究[9-12]，印度、伊朗、坦桑尼亚等发展中国家的学者则集中关注于城市可持续发展评估[13-15]。国外研究相对更关注资源环境微观承载能力，较少研究综合资源环境承载力。

中国对资源环境承载力的研究始于1964年竺可桢先生对气候与粮食生产潜力的定量化研究[16]，1991年北京师范大学环境研究所提出规范“环境承载力”概念[17]，1992年中国科学院牵头的水资源新疆课题组提出“水资源承载力”概念[18]。同时，提出了资源与需求的差量法[19]（简单易行，但不能表达研究区域的社会经济状况及人民生活水平）、综合评价法[20]（考虑因素全面灵活，然所需资料数量巨大）和状态空间法[21]（定量计算较为困难）等评价方法。中国承载力研究早期主要集中于土地资源[22-27]，以此来反映不同国家或地区的人口承载。同时也涌现出了一系列以水环境、水资源、大气环境与土壤环境等单一要素为主的承载力研究[28-31]，然而大多数结论被实际证明低估了资源环境承载力水平。2000年以来，国内开始转向以中国主体功能区划为契机的区域综合性承载力研究[32-33]，从汶川地震灾后恢复重建工程中首次将资源环境承载能力的综合评价应用于重大规划决策[34]，到密切关注实际预警应用[35-37]，都体现了中国资源环境承载力研究发展的进步。但上述研究相对忽略了资源环境系统的开放性与动态性，基本缺乏对极限承载力前提条件——人地关系地域系统稳定结构的研究，从而导致研究结论大多小于区域人口实际可承载能力。以中国科学院地理科学与资源研究所为代表的团队基于“短板原理”与“增长极限原则”首次全面构建了国家层面的资源环境承载能力监测预警综合评价理论体系与框架，给资源环境承载力划定了不超载、临界超载和超载3种评价类型，在此基础上制定了预警技术流程、评价体系与集成方法，由国家发展改革委发布，在全国全面试行[38-39]，具有重大意义。但该预警体系并未提出全面适用的具体的临界超载与超载的关键阈值与预警指数标准，模糊的参照使实际操作存在较大难度。

本文在借鉴前人研究成果的基础上，综合考虑增长极限问题和人地关系稳定系统，构建PS-DR-DP正六边形相互作用力理论模型，优化现有评价指标体系，构建综合评价指标与评价方法，划分了资源环境承载力承载等级标准与对应状态，尝试提出区域资源环境承载力综合评价的新思路。

2 模型方法

2.1 概念模型

无论是运用“增长极限”原则还是“短板效应”原理，都应以维持人地关系地域系统稳定为前提，本文遵循力学中承载力原理及生态学中“增长极限”原则，定义资源环境承载力为：在一定时期内的特定条件下，资源利用达到“完全充填”与“最具效率”双重优势且维持人地关系地域系统稳定态势的最大人口规模。资源环境承载力具有系统性，由资源支撑能力、环境容量与灾害风险抵御能力三部分综合而成。资源支撑力是指区域在现行技术条件与经济水平条件下可获得的资源总量所能支撑的最大人口规模，环

境容量是水、土、大气环境对人类生产生活废弃物的纳污能力，主要指示不同用途的淡水达到最低质量标准，土壤环境达到农业生产的最低标准，大气污染物含量不超过人类健康生存的最低标准，环境所能容纳的最大人口规模；灾害风险抵御能力是指人类预报、预防重大灾害及防治其对人类负面影响的能力，主要指示在重大灾害冲击下所能保障的最大人口规模。资源环境承载力具有开放性与层次性。不同区域之间资源环境承载力因子紧密联系，低一级区域资源环境承载力因子包含在高一级区域之内，承载能力有大有小，等级各异的区域具有不同的承载极限。资源环境承载力具有动态性，随着人类经济活动强度增大，资源环境承载力也增大，直至人类经济活动达到资源环境承载力不可逆的有害点，即为资源环境承载力阈值。

目前广泛应用PSR（Pressure-State-Response）与DPSIR（Driving Force-Pressur-State-Impact-Response）两个模型对资源环境承载力进行模拟研究。PSR模型能明确表征系统中的因果关系，但它的指数选取有赖于研究人员的主观判断与经验水平，不能把握系统的结构和决策过程，对于复杂的反馈系统处理效果不佳[40]。DPSIR模型从人地系统综合性角度出发，能够对问题进行全面分析，是PSR模型的延续与完善。但专注于“增长极限”问题研究，仅表达了传统的“响应式”环境保护观念[41]，缺乏目前资源环境保护亟需的预警导向评价过程。因此本文提出资源环境承载PS-DR-DP（Pressure-Support; Destructiveness-Resilience; Degradation-Promotion）正六边形相互作用力模型。回归承载力原始概念，将承载力分解为多个力的合力之和，对不同的评价方法得到的信息加以归纳综合，同时考虑“增长极限”及“结构稳定”两个问题，以六边形模型的填充程度模拟资源环境承载力动态变化，形成“预警导向式”的资源环境承载评价机制（图1）。

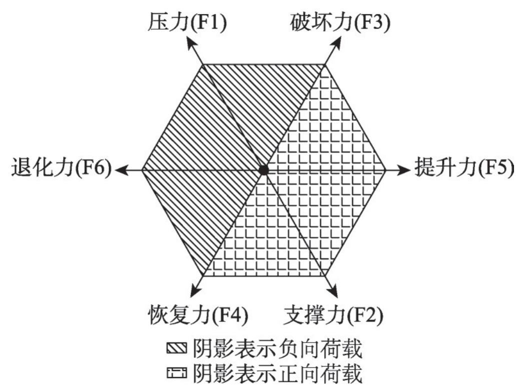

图1 资源环境完全承载状态预警模型

Fig. 1 The warning model of full loaded state of resources and environmental carrying capacity

PS-DR-DP模型中，压力是指人类社会经济活动对资源的消耗总量，支撑力是在现行技术条件下可供利用的资源潜量，压力与支撑力的合力表征资源利用情况；破坏力是指由于人类经济活动造成的环境污染、流行病及重大自然灾害等对人类造成的生命伤害，恢复力是指人类处理环境污染的能力与预报、抵抗、修复重大自然灾害伤害的能力，破坏力与恢复力的合力表征风险灾害抵御能力；退化力是指资源退化与生态环境退化的状态，提升力是指人类利用技术水平与提高资源利用率的方式延缓或修复资源环境退化的能力，退化力与提升力的合力综合表征资源环境退化程度。压力、破坏力与退化力三者表示资源环境的负向荷载，支撑力、恢复力与提升力三者表示资源环境的正向荷载。承载力的理想状态是既不达到阈值，又保持稳定状态（图2）。六个作用力之间相互联

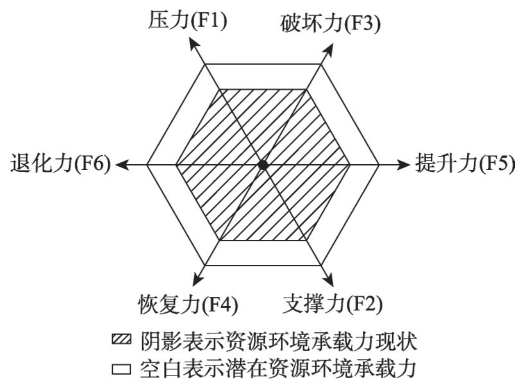

图2 资源环境理想承载状态模型

Fig. 2 The perfect state model of resources and environmental carrying capacity

系，相互制约，相互渗透。

2.2 研究方法

2.2.1 指标信度分析　为避免或尽量降低个人主观判断对指标选择的影响，对选取的指标体系进行信度分析。信度（Reliability）即可靠性，它是指运用指标体系作为测量工具时所得结果的一致性程度，信度系数越高，表明指标体系的可靠性越高。Cronbach α系数对照表显示，$\alpha \geqslant 0.9$表明量表十分可信；$0.7 \leqslant \alpha < 0.9$表明信度可以接受；$0.5 \leqslant \alpha < 0.7$有些项目需要修订；低于0.5表示量表中有些项目需要抛弃。

本文采用目前最常用的Cronbach α信度系数对基于标准化项的指标体系内在一致性进行评价[42]：

$$\alpha = (n/n-1)\left(1-\sum s_i^{\,2}/s_t^{\,2}\right) \tag{1}$$

$$\sum s_i^{\,2} = \sum\left(k_i^m - k_m\right)^2 \tag{2}$$

式中：α为信度系数；n为指标变量数；$\sum s_i^{\,2}$为各个变量组内方差之和；$s_t^{\,2}$为指标变量总体方差；k_i^m为第m个指标体系中的变量值；k_m为第m个指标体系的变量均值。

2.2.2 承载力贡献值计算　基于城市生态评价的全排列多边形图示指标评价方法[43]，本文对其计算方法进行了改良，使之数学表达更准确。设共有N个标准化指标，以原点0为中心，以标准化的上限值1为半径形成中心N多边形，各指标值在原点与中心N多边形顶点间取值，指标值连线组成不规则N多边形，按分类排列乘法原理，N个指标可形成(N-1)!/2个不同的不规则N多边形。定义各不规则N多边形面积的均值与中心N多边形面积之比为各分项承载力贡献值，表示各分项对资源环境承载力的影响。其计算公式为：

$$C = \frac{\sum_{i<j}^{i,j}(k_i^m+1)\left(k_j^m+1\right)}{N(N-1)} \tag{3}$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i} C_i^p}{\sum_{j=1}^{j} C_j^n} \tag{4}$$

式中：C表示分项承载力贡献值；N表示各分项指标数量；k_i^m、k_j^m为第m个指标体系中第i、j项指标值；S表示承载状态；C_i^p表示第i个正向贡献值；C_j^n表示第j个负向贡献值。

区域资源环境承载力影响因素之间相互作用复杂，不能简单以“短板原理”为评判标准，定义正向承载力贡献值之和与负向贡献值之和的比值为承载状态。比值大于1，表明区域承载状态良好，且比值越大，区域承载状态愈好。反之，则表明区域承载状态出现超载，应该予以预警。

2.2.3 承载等级标准划分　资源环境承载力不仅受限于自然本底因素，经济技术进步对其的影响也逐渐增强，甚至占据主导地位。城市化进程是资源环境承载力不断变化的根本推动力，在一定范围内，城市化水平越高，区域承载能力越强，当城市化水平过高，对区域承载能力造成伤害时，承载能力的变化又反过来影响城市化的发展进程，二者相辅相成。本文借鉴中国科学院中国现代化研究中心发布的《中国现代化报告2013——城市现代化研究》对城市化过程三个阶段标准为基本依据，参考发达国家城市化转变为逆城市化的普遍转折点，划定资源环境承载力等级（表1）。

3 指标体系构建

表1 资源环境承载力等级标准

Tab. 1 The classification of resources and environmental carrying capacity

等级	贡献值均值	承载力状态
Ⅰ	C ≤ 0.30	低水平平衡，近似稳定态
Ⅱ	0.30 < C < 0.70	高速增长，非稳定态
Ⅲ	0.70 ≤ C < 0.85	理想承载，近似稳定态
Ⅳ	C ≥ 0.85	完全承载，趋于非稳定态

注：贡献值均值为分项承载力贡献值的平均值。

资源环境承载力是资源承载力和环境承载力的综合表现，由于两者的不确定性、开放性与动态性，相关指标数量众多复杂，且资源环境本身具有区域差异性，导致无法设立统一的量化指标体系，否则容易出现指标体系过于庞大难以计算、指标体系过于宏观笼统及指标体系不能全面反映系统内涵属性特征等问题，导致结论不准确或科学性不强。指标体系的建立是资源环境承载力评价的核心部分，是关系到评价结果是否可信的关键因素。本文遵循科学性、系统性、区域性、层次性、开放性和动态性等基本原则，在借鉴现有文献研究指标体系的基础上，主要参考《全国资源环境承载能力预警（2016版）的基点和技术方法进展》与2017年9月20日中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》中基础评价一栏中包含的土地资源（压力指数）、水资源（开发利用量）、环境（污染物超标程度）、生态（健康状态）四项综合指标，结合数据可量化性与可获得性，尝试构建科学可行的资源环境承载力三对合力评价指标体系，对资源环境承载力进行综合评估。因此，根据本文对资源环境承载力的概念界定，以区域水、土、能源资源的使用量与拥有量表征资源“完全充填”的状态，以单位GDP能耗与全社会劳动生产率表征目前条件下的资源“最具效率”的程度（表2），以及综合指标表征区域人地关系地域系统中环境与生态的稳定态势（表3、表4）。

4 北京市资源环境承载力综合评价

4.1 数据来源

本文数据主要来源于2008-2016年间的《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国国土资源统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国林业统计年鉴》《中国水土保持公报》，部分数据来源于《北京市统计年鉴》（2008-2016年）、北京市政府各部门的公开信息及年度报告。

4.2 指标可信度分析

基于原始数据的完整性与可获得性对比，本文选择北京市2008-2010年间3个年份的资源环境承载力各分力指标体系的原始数据，利用min-max方法进行标准化，结果如表5所示。对标准化后的指标项进行SPSS可信度分析结果如表6所示。结果表明可信度系数均高于0.90，综合可知所选指标体系的可信度较高，能较为客观地评价北京市资源环境承载力。

4.3 实证分析

进入21世纪以来，社会各界、学科背景各异的研究者极为关注北京市人口规模上限的预测。对于北京市人口规模是否超载的问题，研究者大多认为无可争辩，早期研究甚至认为北京市人口规模不能超过1800万。国务院2017年9月28日同意批复的《北京市城市总体规划（2016-2035年）》中规定，北京市将以资源环境为硬约束，确定人口总量上限控制在2300万以内。因此，通过确定承载状态从而判断可承载人口规模变得十分重

表2　压力与支撑力评价指标体系

Tab. 2　The evaluation index system of pressure and support

目标层	影响因子	指标	序号
压力	水资源	人均用水量(m^3)	K^1_1
		用水总量(亿 m^3)	K^1_2
	土地资源	耕地征收面积(km^2)	K^1_3
		工矿占用土地(km^2)	K^1_4
	能源	煤炭消费量(亿 t)	K^1_5
		原油消费量(万 t)	K^1_6
		天然气消费量(亿 m^3)	K^1_7
		电力消费量(亿 kw·h)	K^1_8
		单位GDP能耗(t标准煤/万元)	K^1_9
	人口	人口密度(人/km^2)	K^1_{10}
		年末常住人口(万人)	K^1_{11}
		人口自然增长率(‰)	K^1_{12}
		城镇失业率(%)	K^1_{13}
		地区生产总值(万元)	K^1_{14}
支撑力	资源支撑	人均水资源量(m^3/人)	K^1_{15}
		水资源总量(亿 m^3)	K^1_{16}
		土地面积(km^2)	K^1_{17}
		年内增加耕地面积(km^2)	K^1_{18}
		耕地面积(km^2)	K^1_{19}
		人均粮食产量(kg)	K^1_{20}
		水力发电量(亿 kw·　h)	K^1_{21}
		煤炭储量(亿 t)	K^1_{22}
		原油生产量(万 t)	K^1_{23}
		天然气产量(亿 m^3)	K^1_{24}
		发电量(亿 kw·h)	K^1_{25}
	经济社会支撑	全社会劳动生产率(万元/人)	K^1_{26}
		城市居民人均可支配收入(万元)	K^1_{27}
		农村居民人均纯收入(万元)	K^1_{28}

注：K^1_i代表压力与支撑力评价指标体系中的变量。

表3　破坏力与恢复力评价指标体系

Tab. 3　The evaluation index system of destructiveness and resilience

目标层	影响因子	指标	序号
破坏力	大气环境	二氧化硫排放量(万 t)	K^2_1
		烟(粉)尘排放量(t)	K^2_2
	水环境	废水排放总量(万 t)	K^2_3
		化学需氧量(万 t)	K^2_4
	土壤环境	工业危险固体废弃物产生量(万 t)	K^2_5
		工业一般固体废弃物产生量(万 t)	K^2_6
	重大灾害	甲乙类法定报告传染病病死率(1/10万)	K^2_7
		地质崩塌等地质灾害事故(次)	K^2_8
		突发环境事故次数(次)	K^2_9
恢复力	污染处理能力	环境污染治理投资占GDP比重(%)	K^2_{10}
		工业二氧化硫去除量(万 t)	K^2_{11}
		工业一般固体废物处置量(万 t)	K^2_{12}
		工业危险固体废物处置量(万 t)	K^2_{13}
		城市污水处理率(%)	K^2_{14}
	防治灾害能力	疾病预防控制中心(个)	K^2_{15}
		自动气象站点个数(个)	K^2_{16}
		地震台数总数(个)	K^2_{17}
		应急避难场所(个)	K^2_{18}

注：K^2_i代表破坏力与恢复力评价指标体系中的变量。

表4 退化力与提升力评价指标体系

Tab. 4 The evaluation index system of degradation and promotion

目标层	影响因子	指标	序号
退化力	土地荒漠化	土地沙漠化面积(hm²)	K^3_{1}
	森林退化	人工林面积(hm²)	K^3_{2}
		森林病虫鼠害发生面积(hm²)	K^3_{3}
	水土流失	水土流失面积新增(hm²)	K^3_{4}
		水土流失防治责任范围(hm²)	K^3_{5}
提升力	保护与治理	森林面积(hm²)	K^3_{6}
		湿地面积(hm²)	K^3_{7}
		造林面积(hm²)	K^3_{8}
		京津风沙源治理工程小流域治理面积(hm²)	K^3_{9}
		森林病虫鼠害防治率(%)	K^3_{10}
		水土流失治理面积(hm²)	K^3_{11}
		自然保护区面积(hm²)	K^3_{12}

注：K^3_i代表退化力与提升力评价指标体系中的变量。

表5 2008-2010年北京市资源环境承载力综合指标体系标准化数值

Tab. 5 Evaluation index standardization values of resources and environmental carrying capacity of Beijing from 2008 to 2010

指标	2008年	2009年	2010年	指标	2008年	2009年	2010年	指标	2008年	2009年	2010年
K^1_{1}	1.0000	1.0000	0.8629	K^1_{20}	0.3577	0.3513	0.2838	K^2_{11}	0.0605	0.0511	0.0613
K^1_{2}	0.1665	0.1725	0.1604	K^1_{21}	0.0002	0.0002	0.0020	K^2_{12}	0.0402	0.0341	0.0368
K^1_{3}	0.0527	0.1440	0.0679	K^1_{22}	0.3173	0.3401	0.1727	K^2_{13}	0.0366	0.0258	0.0307
K^1_{4}	0.2323	0.4116	1.0000	K^1_{23}	0.0000	0.0000	0.0000	K^2_{14}	0.4243	0.3633	0.3873
K^1_{5}	0.0130	0.0129	0.0120	K^1_{24}	0.0000	0.0000	0.0000	K^2_{15}	0.1667	0.1403	0.1462
K^1_{6}	0.0530	0.0565	0.0509	K^1_{25}	0.1172	0.1200	0.1230	K^2_{16}	1.0000	1.0000	1.0000
K^1_{7}	0.2877	0.3372	0.3407	K^1_{26}	0.0548	0.0597	0.0634	K^2_{17}	0.5591	0.4570	0.4387
K^1_{8}	0.3272	0.3592	0.3690	K^1_{27}	0.0124	0.0137	0.0140	K^2_{18}	0.1774	0.1493	0.1557
K^1_{9}	0.0031	0.0029	0.0026	K^1_{28}	0.0051	0.0057	0.0060	K^3_{1}	0.1202	0.1049	0.0965
K^1_{10}	0.0376	0.0369	0.0544	K^2_{1}	0.0661	0.0538	0.0542	K^3_{2}	0.5959	0.6849	0.6568
K^1_{11}	0.0840	0.0904	0.0894	K^2_{2}	0.0190	0.0165	0.0181	K^3_{3}	0.0858	0.0754	0.0730
K^1_{12}	0.0162	0.0170	0.0140	K^2_{3}	0.6089	0.6372	0.5308	K^3_{4}	0.0706	0.1105	0.0571
K^1_{13}	0.0863	0.0680	0.0638	K^2_{4}	0.0543	0.0448	0.0434	K^3_{5}	0.0098	0.0142	0.0276
K^1_{14}	0.0527	0.0591	0.0643	K^2_{5}	0.0645	0.0507	0.0538	K^3_{6}	0.0198	0.0346	0.0258
K^1_{15}	0.9749	0.6152	0.5658	K^2_{6}	0.0622	0.0562	0.0599	K^3_{7}	0.8336	1.0000	0.9589
K^1_{16}	0.1622	0.1059	0.1052	K^2_{7}	0.1115	0.0500	0.0725	K^3_{8}	0.0757	0.0661	0.0634
K^1_{17}	0.0778	0.0797	0.0748	K^2_{8}	0.0860	0.0543	0.0519	K^3_{9}	0.0610	0.0164	0.0146
K^1_{18}	0.0094	0.0096	0.0090	K^2_{9}	0.1989	0.1403	0.1415	K^3_{10}	0.0219	0.0191	0.0183
K^1_{19}	0.0110	0.0113	0.0106	K^2_{10}	0.0785	0.0778	0.0774	K^3_{11}	1.0000	0.9833	1.0000
								K^3_{12}	0.2991	0.2611	0.2504

要，基于时效可用性与中国各级政府五年规划特点，选择北京市2010年与2015年进行承载状态对比分析，尝试对北京市承载状态进行探讨，结果如表7、图3和图4所示。

表6 指标可信度分析结果

Tab. 6 Reliability index analysis results

项目	Cronbachs α	样本容量(项)	排除项
压力与支撑力评价指标体系	0.949	28	0
破坏力与恢复力评价指标体系	0.998	18	0
退化力与提升力评价指标体系	0.999	12	0

参照资源环境承载力等级划分标准（表1）及上述分析可知，北京在2010年与2015年均处于未超载的非稳定态。2010年承载状态值为1.0143，比值大于1，

表7　2010年与2015年北京市承载状态对比

Tab. 7　Comparation of carrying capacity state in Beijing between 2010 and 2015

承载贡献值	压力	支撑力	破坏力	恢复力	退化力	提升力	承载状态值	贡献值均值
2010年	0.7468	0.6065	0.6191	0.7874	0.6917	0.6931	1.0143	0.6908
2015年	0.7428	0.6627	0.5827	0.7443	0.6432	0.8394	1.1411	0.7025

注：表内数据为原始数据保留至小数点后4位。

承载状态良好，且承载贡献均值为0.6908，趋向于理想模式发展；2015年承载状态值为1.1411，承载贡献均值为0.7025，均大于2010年的值，表明2015年北京市承载能力好于2010年。整体上，2015年相比较于2010年，负向因子作用力均减弱，正向因子综合作用力增强。除压力与支撑力外，存在负向因子作用力大（小），则正向因子作用力也大（小）的规律，正向因子具有被动变化的特点。破坏力与退化力均有较大幅度减弱，说明北京市环境治理与生态保护控制得当，抵御风险能力较强。但也有微妙变化之处，2015年贡献值中指示生态保护方面的退化力与提升力，前者减弱，后者不降反升，一定程度上反映了人们开始跳出传统的“驱动力—压力—状态—影响—响应”的被动模式，拥有积极提前预防预警，掌控生态环境发展的主动思维。最值得注意的是，与普遍认为北京处于压力不断加大的印象不同，在人口净增209余万人，GDP增加8901亿元的情况下，相较于2010年，2015年北京市资源压力不增反而出现微小负增长，而资源支撑力保持了较快的增长率。当然，我们也应该考虑到北京市自身资源较为匮乏，对外依赖度较高的事实（表8）。仅以北京市本地资源作为分析基础，北京市能承载的人口应该远小于现在的数量。然而区域的资源环境承载力应该是在其能力范围内所能获得的资源或条件下所能承载的人口规模。北京市与周围城市

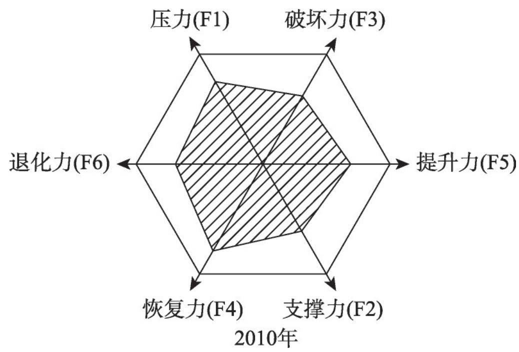

图3　2010年北京市资源环境承载力状态

Fig. 3　Resources and environmental carrying capacity state of Beijing in 2010

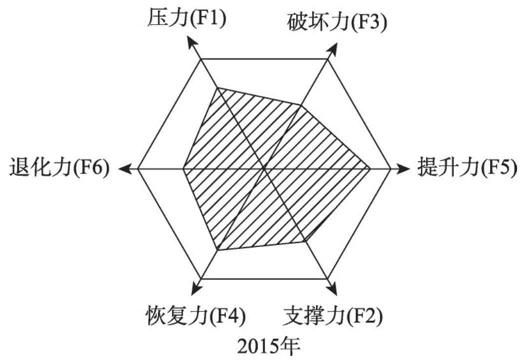

图4　2015年北京市资源环境承载力状态

Fig. 4　Resources and environmental carrying capacity state of Beijing in 2015

表8　2010年与2015年北京市能源资源对外依存度

Tab. 8　The external dependence degree of energy and resources of Beijing between 2010 and 2015

净调入量	原油(万t)	天然气(亿m³)	水资源(亿m³)
2010年	1116.29	74.79	12.1
2015年	1165.18	130	11.4
2010对外依存度(%)	100	100	34.375
2015年对外依存度(%)	100	88.51	29.84

注：对外依存度=当年净调入量/当年消费总量

存在近程耦合关系，与国内其他地区以及国际区域存在远程耦合关系，各种关系错综复杂，这种获取的能力无论是通过行政手段还是物资交换，都是资源环境承载力开放性的体现。因此，尽管目前北京市资源压力仍大于资源支撑力，但随着新技术的出现与进步，仍可以期待其较为良好的发展潜力。

2016年有研究以可能满意度模型对北京市综合环境承载力进行预测，认为北京市可接受的人口规模为2250万~2500万人，最佳承载为2350万人，且达到2500万的难度较大[44]。从本文的研究看，2015年北京市承载人口规模为2171万，压力贡献值为0.7428，承载贡献均值为0.7025，整体趋于理想承载状态，与理想阶段上限值0.85相比较，仍有进一步承载的空间。按照本文研究结果显示，在人口规模扩大同时，北京市资源承载压力不增反减，因此认为北京市最大人口规模在近2200万的基础上仍有较大余地。考虑到人居满意度，本文研究结果与上述研究结果较为吻合。对北京市资源承载力研究被引量最多的研究[45]以北京市最受约束力的水资源作为限制条件，以北京市通州区为例分析该区域水资源可承载人口，认为通州区至2020年最多可承载人口为119万人，而2010年该区域人口已达118.4万人，2015年为137.8万人。2008年的一项对北京市海淀区水土资源承载力的研究预测该区2020年的当量人口规模为307.33万人[46]。2010年第六次全国人口普查海淀区常住人口为328.1万人，也超过了该研究对海淀区2020年的预测值。因此，本文认为水土资源对区域约束作用固然重要，但在未来的发展中并不会成为绝对因素，单向关注本地资源，忽略区域可获得资源的能力的分析方式的预测结果相对紧缩，指导应用效果不佳。评价北京市相对资源承载力的研究认为，1995年以后，北京市实际人口数量始终高于综合承载力，人口处于超载状态，发展前景堪忧[47]。本文认为综合承载力随时代变化，北京市人口将继续趋于理想承载状态，适当控制人口规模，北京市将既保持良好的理想承载状态又推动经济社会继续进步。

5 结论与讨论

本文在回顾与总结承载力概念与方法研究发展与延伸的基础上，定义了综合考虑“增长极限”与人地关系地域系统稳定结构的资源环境承载力概念，认为资源环境承载力由资源支撑能力、环境容量与风险灾害抵御能力三部分综合而成。创建了PS-DR-DP（压力—支撑力；破坏力—恢复力；退化力—提升力）正六边形相互作用力理论模型，利用三对相互作用力表达资源环境承载力影响因素之间相互联系、相互制约与相互渗透的关系。以各力在正六边形原点至顶点间的取值长度表示资源环境承载力状态，以实际六边形的形态变化模拟区域资源环境承载力的动态变化。同时借鉴具有指导意义的研究文献的评价指标，建立了通过Cronbachs α可信度分析的评价指标体系。为避免主观权重赋值对评价结果的影响，在前人的全排列多边形图示法的基础上改为更直观易行的分类排列多边形图示法，利用多维乘法以面积指数及面积比值的形式表达资源环境承载力贡献值与承载状态，既省去繁复计算的操作障碍，又避免了不严谨的权重赋值传统加法的影响。最后利用构建的评价框架体系，对北京市2010年与2015年资源环境承载力状态进行了对比实证研究。与以往研究北京市早已超载的结论不同，本文认为，北京市2015年资源环境承载状态甚至优于2010年的承载状态，且有进一步承载的空间。当然，北京市短期内生态保护与城市建设对土地空间的争夺矛盾不可忽视，不可过于乐观。

本文实证研究时并未给出具体的北京市人口规模数值，仅是通过佐证的方式验证本文评价理论的可行性。而找出承载贡献值的变化机制与规律，推断出具备有效指导作用

的可承载人口规模更具意义。后续的工作将从本文研究基础出发，继续寻求资源环境承载力反映在人口最大或最佳规模近似最优解的研究方法。

同时，按照资源环境承载力的一般研究假设，人口增加，地区资源压力必然也增加，但本研究对于北京市的实证研究发现人口规模增大，资源压力出现了微小幅度的减小，那么可否假设是经济技术条件的进步的作用？经济技术发展对资源环境承载力的负向因子的抵消效应过程如何表达？在技术进步的前提下，资源压力是否能够持续下降？波动范围有多大？资源压力的下降是否意味着人口承载规模可进一步扩大？这些问题都值得进一步探讨。

参考文献(References)

[1] Park R E, Burgess E W. Introduction to the Science of Sociology. Chicago: University of Chicago Press, 1970: 1-12.

[2] 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. Technological Forecasting & Social Change, 1972, 4(3): 323-332.

[3] FAO. Agro-ecological Zoning: Guidelines. Fao Soil Bulletins, 1996.

[4] Karnopp D, Rosenberg R, Perelson A S. System Dynamics: A Unified Approach. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

[5] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. Focus, 1992, 6 (2): 121-130.

[6] Ress W E, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy. Focus, 1994, 6(2): 121-130.

[7] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making. Child Development, 1996, 42(4): 1187-1201.

[8] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice. Resources Science, 2017, 39(3): 379-395. [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.]

[9] Céline C, Agnès P, Patrick P Assessing carrying capacities of coastal areas in France. Journal of Coastal Conservation, 2008, 12(1): 27-34.

[10] Guyondet T, Comeau L A, Bacher C, et al. Climate change influences carrying capacity in a coastal embayment dedicated to shellfish aquaculture. Estuaries & Coasts, 2015, 38(5): 1593-1618.

[11] Reghunathan V M, Joseph S, Warrier C U, et al. Factors affecting the environmental carrying capacity of a freshwater tropical lake system. Environmental Monitoring & Assessment, 2016, 188(11): 615.

[12] Brown K, Turner R K, Hameed H, et al. Environmental carrying capacity and tourism development in the Maldives and Nepal. Environmental Conservation, 1997, 24(4): 316-325.

[13] Sarma A K, Sarma B, Das S. Estimating Sustainable Carrying Capacity of Flood Prone Hilly Urban Areas. Urban Hydrology, Watershed Management and Socio-Economic Aspects. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[14] Irankhahi M, Jozi S A, Farshchi P, et al. Combination of GISFM and TOPSIS to evaluation of urban environment carrying capacity (Case study: Shemiran City, Iran). International Journal of Environmental Science & Technology, 2017, 14(6): 1-16.

[15] Mwalyosi R B B. Population growth, carrying capacity and sustainable development in south-west Masailand. Journal of Environmental Management, 1991, 33(2): 175-187.

[16] Zhu Kezhen. Some characteristic features of Chinese climate and their effects on crop production. Acta Geographica Sinica, 1964, 30(1): 1-13. [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.]

[17] Zeng Weihua, Wang Huadong, Xue Jiyu, et al. Environmental carrying capacity: A key to the coordination of the development of population, resources and environment. China Population, Resources and Environment, 1991, 1(2): 33-37. [曾维华, 王华东, 薛纪渝, 等. 人口、资源与环境协调发展关键问题之一: 环境承载力研究. 中国人口·资源与环境, 1991, 1(2): 33-37.]

[18] Shi Yafeng, Qu Yaoguang. The Carrying Capacity and Rational Utilization of Water Resources in Urumqi River Basin.

Beijing: Science Press, 1992: 94-112. [施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源环境承载力及其合理利用. 北京: 科学出版社, 1992: 94-112.]

[19] Wang Zhonggen, Xia Jun. Quantitative analysis on bearing capacity of ecological environment. Journal of Changjiang Vocational University, 1999,16(4): 9-12. [王中根, 夏军. 区域生态环境承载力的量化方法研究. 长江工程职业技术学院学报, 1999,16(4): 9-12.]

[20] Gao Jixi. A Study on the Ecological Bearing Capacity of Regional Sustainable Development [D]. Beijing: Institute of Geography, CAS, 1999. [高吉喜. 区域可持续发展的生态承载力研究[D]. 北京: 中国科学院地理研究所, 1999.]

[21] Mao Hanying, Yu Danlin. A study on the quantitative research of regional carrying capactity. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(4): 549-555. [毛汉英, 余丹林. 区域承载力定量研究方法探讨. 地球科学进展, 2001, 16(4): 549-555.]

[22] Shi Yulin. Research of Population Carrying Capacity of Chinese Land Resource. Beijing: Science and Technology of China Press, 1992. [石玉林. 中国土地资源的人口承载能力研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.]

[23] Liao Jinfeng. The land carrying capacity of the population in Guangdong Province. Economic Geography, 1998, 18(1): 75-79. [廖金风. 广东省土地人口承载能力. 经济地理, 1998, 18(1): 75-79.]

[24] Chen Xingpeng, Dai Qin. A study on water-soil capacity in Northwest arid area with systemic dynamics: A case of Hexi Corridor, Gansu Province. Arid Land Geography, 2002, 25(4): 377-382. [陈兴鹏, 戴芹. 系统动力学在甘肃省河西地区水土资源承载力中的应用. 干旱区地理, 2002, 25(4): 377-382.]

[25] Yu Guanghua, Sun Caizhi. Land carrying capacity spatiotemporal differentiation in the Bohai Sea coastal areas. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4860-4870. [于广华, 孙才志. 环渤海沿海地区土地承载力时空分异特征. 生态学报, 2015, 35(14): 4860-4870.]

[26] Feng Zhiming. Research history, presentsituation and future prospects of land carrying capacity. China Land Science, 1994, 8(3): 1-9. [封志明. 土地承载力研究的过去、现在与未来. 中国土地科学, 1994, 8(3): 1-9.]

[27] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Zhang Jing. The land carrying capacity of China based on mangrain relationship. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 865-875. [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. 自然资源学报, 2008, 23(5): 865-875.]

[28] Cui Fengjun. The carrying capacity of municipal water environment and its case study. Journal of Natural Resources, 1998, 13(1): 58-62. [崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58-62.]

[29] Feng Yaolong, Han Wenxiu, Wang Hongjiang, et al. Study on the region water resources carrying capacity. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 109-113. [冯耀龙, 韩文秀, 王宏江, 等. 区域水资源承载力研究. 水科学进展, 2003, 14(1): 109-113.]

[30] Luo Yongzhong, Cheng Ziyong, Guo Xiaoqin. The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 221-229. [罗永忠, 成自勇, 郭小芹. 近40a甘肃省气候生产潜力时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(1): 221-229.]

[31] Pan Dan. Environment carrying capacity and pollution risk of livestock breeding in ecological economic zone of Poyang Lake. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 254-259. [潘丹. 鄱阳湖生态经济区畜禽养殖土壤环境承载力及污染风险研究. 水土保持通报, 2016, 36(2): 254-259.]

[32] Mao Hanying, Yu Danlin. Regional carrying capacity in Bohai Rim. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(3): 363-371. [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.]

[33] Fan Jie. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(4): 339-350. [樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. 地理学报, 2007, 62(4): 339-350.]

[34] Fan Jie. Resource Environment Carrying Capacity Evaluation for Post- Wenchuan Earthquake Restoration and Reconstruction in the State Planning. Beijing: Science Press, 2009. [樊杰. 国家汶川地震灾后重建规划: 资源环境承载能力评价. 科学出版社, 2009.]

[35] Gao Xiaolu, Chen Tian, Fan Jie. Population capacity in the Wenchuan Earthquake reconstruction areas. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(2): 164-176. [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.]

[36] Fang C, Wu F Li M. Suitability evaluation of population and settlements spatial layout after Wenchuan Earthquake. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(3): 539-548.

[38] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Jiang Dong, et al. The compilation of natural resources balance sheets (NRBS) and the evaluation of resources and environment carrying capacity (RECC). Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7140-7145.

[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. 生态学报, 2016, 36(22): 7140-7145.]

[37] Fan Jie, Wang Yafei, Tang Qing, et al. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V2014) , Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 1-10. [樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程. 地理科学, 2015, 35(1): 1-10.]

[39] Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V2016). Progress in Geography, 2017, 36(3): 266-276. [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. 地理科学进展, 2017, 36(3): 266-276.]

[40] Li Tianxiao, Fu Qiang, Peng Shengmin. Evaluation of water and soil resources carrying capacity based on DPSIR frame work. Journal of Northeast Agricultural University , 2012, 43(8): 128-134. [李天霄, 付强, 彭胜民. 基于DPSIR模型的水土资源承载力评价. 东北农业大学学报, 2012, 43(8): 128-134.]

[41] Cao Hongjun. An initial study on DPSIR Model. Environmental Science and Technology, 2005, 28(b06): 110-111. [曹红军. 浅评DPSIR模型. 环境科学与技术, 2005, 28(b06): 110-111.]

[42] Mangi S C, Roberts C M, Rodwell L D. Reef fisheries management in Kenya: Preliminary approach using the driver-pressure-state-impacts-response (DPSIR) scheme of indicators. Ocean & Coastal Management, 2007, 50(5): 463-480.

[43] Wu Qiong, Wang Rusong, Li Hongqing, et al. The indices and the evaluation method of eco-city. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2090-2095. [吴琼, 王如松, 李宏卿, 等. 生态城市指标体系与评价方法. 生态学报, 2005, 25(8): 2090-2095.]

[44] Wang Zishu, Yuan Kuikui, Lv Chunying, et al. Research of population carrying capacity of Beijing based on the resources & environment constraints. China Population, Resources and Environment, 2016(Suppl.1): 351-354. [汪自书, 苑魁魁, 吕春英, 等. 资源环境约束下的北京市人口承载力研究. 中国人口·资源与环境, 2016(增刊1): 351-354.]

[45] Xia Jun, Zhang Yongyong, Wang Zhonggen, et al. Water carrying capacity of urbanized area. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1482-1488. [夏军, 张永勇, 王中根, 等. 城市化地区水资源承载力研究. 水利学报, 2006, 37(12): 1482-1488.]

[46] Zhang Lihua, Chen Gang, Xu Xiaoxin, et al. A theoretical and empirical study of urban population carrying capacity: Take Haidian of Beijing as an example. Management Review, 2008, 20(5): 28-32. [张利华, 陈钢, 徐晓新, 等. 城市人口承载力的理论与实证研究: 以北京市海淀区为例. 管理评论, 2008, 20(5): 28-32.]

[47] Wang Shutong, Guo Huaicheng, Wang Lijing. An analysis of relative loading capacity of resources in Beijing City. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(5): 90-94. [王树通, 郭怀成, 王丽婧. 北京市相对资源承载力分析. 安全与环境学报, 2005, 5(5): 90-94.]

The comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model

WANG Liang[1,2,3], LIU Hui[1,2]

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: There are many achievements on the state evaluation of resources and environmental carrying capacity. Most of the studies use the traditional analysis method together with the "Pressure- State- Response" model. This article first constructs a comprehensive evaluation framework system of regional resources and environmental carrying capacity. Then it builds the "PS- DS- DP" hexagon interactional theory model and divides the carrying capacity into three pairs of interaction forces, namely "Pressure-Support", "Destructiveness-Resilience" and "Degradation- Promotion", which correspond to resources supporting ability, environmental capacity and risk disaster resisting ability, respectively. The negative load of carrying capacity includes pressure, destructiveness and degradation, while support, resilience and promotion represent the positive ones. With the changes of the shape and area of the hexagon caused by the interaction forces, the state of regional resources environmental carrying capacity could be measured. This study figures out that the state value of carrying capacity is equal to the ratio of the positive contribution value to the negative contribution value. The regional load condition shows good if the ratio is over 1, and the bigger the better. Once the ratio is less than 1, it has to be warned. Regional carrying capacity rating standards in this paper are delimited by 4 levels: Ⅰ (≤0.30), Ⅱ (0.30- 0.70), Ⅲ (0.70- 0.85) and Ⅳ (≥0.85) corresponding to a lower level balance load for a region with an approximate stable state, an unstable state caused by the high speed increasing, an ideal carrying capacity of an approximate stable state, and a full load with the system collapse. A perfect state is not to reach the limit while remaining the system stable. Based on the above theoretical models and the earlier achievements, this research applies the classified- array polygon method to explore the state change of resources environmental carrying capacity of Beijing from 2010 to 2015. According to the general research hypothesis, the increasing population will add to the regional resources pressure. But Beijing's resource pressure has a slight decrease as the city's population grows, which differs from the conclusions that the city was overloaded. The result shows that Beijing is getting close to a perfect state. The state value of carrying capacity was 1.0143 in 2010 and increased to 1.1411 in 2015, suggesting that Beijing's carrying capacity turned better in 2010-2015. Compared to 2010, the negative factor forces became weakened and the positive ones continued to enhance in 2015. With the average rank value achieving 0.7025 in 2015, Beijing reached the optimal load threshold and still had space for further carrying. Finally, these results give a theoretical support for Beijing to control the population within 23 million by 2020.

Keywords: comprehensive carrying capacity; PS-DR-DP model; population size; Beijing