

牛方曲, 杨欣雨, 孙东琪. 2020. 不同发展模式下资源环境承载力评价——以海南省为例. 热带地理, 40 (6): 1109-1116.

Niu Fangqu, Yang Xinyu and Sun Dongqi. 2020. Water and Soil Carrying Capacity and Adjustment of Industrial Structure in Hainan Province. *Tropical Geography*, 40 (6): 1109-1116.

不同发展模式下资源环境承载力评价 ——以海南省为例

牛方曲^{1,2,3}, 杨欣雨^{1,3}, 孙东琪^{1,3}

(1. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国西南地缘环境与边疆发展协同创新中心, 昆明 650500; 3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 文章关注于产业、人口与资源环境要素的作用关系, 建构了资源环境承载力综合评价框架, 并以海南省为案例区开展应用研究。该框架首先对区域产业重要性进行评价并分级, 为产业结构调整提供依据; 其次解析了区域产业、人口资源消耗与污染排放强度, 最后, 基于产业评价结果设定不同的产业结构调整情景, 结合产业和人口的资源消耗与污染排放强度评价不同产业结构下的资源环境承载力, 即产业和人口的规模上限。结果表明: 2016年海南省的经济规模并未超载, 产业有进一步发展空间。其中土地资源成为海南省发展的首要限制因素, 其次是水环境; 海南经济效益较高的支柱产业和基础性产业多为高耗水、高污染的产业, 亟需加强水资源的集约利用, 并降低污染排放强度。为提升经济发展规模上限, 需要培育低能耗、低排放的产业。文章建构的资源环境承载力评价方法将产业、人口与资源环境相联系, 其评价结果政策意义更为明确, 可为优化产业结构调整、控制产业及人口发展规模提供决策参考。

关键词: 资源环境承载力; 可持续发展; 产业结构; 资源消耗; 污染排放; 海南

中图分类号: X24

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2020)06-1109-08

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003281

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



20世纪70年代以来, 许多发展中国家人口的急剧增长和经济的快速扩张导致资源大量消耗、环境质量不断恶化, 已经制约了其社会经济发展(Zhu et al., 2010; Zhou et al., 2017)。作为发展中国家, 中国经历了近40年的高速发展, 经济上取得巨大成就的同时也付出了沉重的资源消耗、环境污染等代价, 经济社会发展与资源、生态、环境之间的矛盾日益严重, 因此资源环境承载力被广泛关注(Peng et al., 2016; 牛方曲等, 2018)。

资源环境承载力指特定的区域(社会经济系统)内, 在生态环境不受破坏前提下, 资源环境所能承载的经济和人口的最大规模(封志明等, 2017; 牛方曲等, 2018)。开展资源环境承载力评

价研究是实现人地关系协调发展的重要依据。Errington (1934) 最先从生态学的角度提出承载力的概念, 之后学者对之开展了大量的方法探讨, 根据侧重点不同, 可大体归为两大类。一类是资源供需平衡法, 该方法关注于生态系统功能, 通过比较承载体的供给能力和承载对象需求状况, 确定资源环境承载力的绝对值, 适用于评价封闭系统。人口论(Malthus, 1798)、生态足迹(Wackernagel, 1991, Rees et al., 1996; Rees, 1992)、能值分析(Odum, 1988; Lou et al., 2015)、初级生产力(Thebault et al., 2008; Sutton et al., 2012)等方法均属此类。另一类是综合指数法, 通过选取多个指标进行数学处理得出一个综合指数(毛汉英等, 2001; 张林波

收稿日期: 2020-02-26; **修回日期:** 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071153); 国家重点研发计划项目(2016YFC0503506); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040401)

作者简介: 牛方曲(1979—), 男, 安徽淮南人, 副研究员, 博士, 主要从事区域与城市发展模拟分析研究, (E-mail) niufq@lreis.ac.cn;

通信作者: 孙东琪(1985—), 男, 山东单县人, 副研究员, 博士, 主要从事区域与城市发展研究, (E-mail) sundq@igsrr.ac.cn。

等, 2009; 樊杰等, 2015, 2017), 其所依据的理论框架有“压力-状态-响应”“压力-状态-影响-响应”(De Jonge et al., 2012; 李天霄, 2012; Wei et al., 2014; Zheng et al., 2015)等。综合指数法评价结果通常是无量纲的表征值, 物理意义不明确, 难以给出明确的政策启示, 而且在很多研究中, 评价结果实质为承载状态, 而非承载力。

各类方法的构建旨在客观地评价资源环境承载力, 为人与自然的和谐相处提供依据, 但目前尚未形成统一的范式, 缺乏产业、人口与资源环境相互作用的机理性研究, 未能将区域产业发展、人口增长与区域资源环境很好地结合, 研究结论在辅助区域发展决策方面可操作性较为欠缺。因此, 本文以海南省为例, 将产业与人口与资源环境要素相联系, 着眼于水土资源, 建构资源环境承载力综合评价框架, 试图开展3个方面工作: 1) 区域产业评价, 确定各产业对于当地经济的重要性, 为产业结构调整提供依据; 2) 厘清各产业及居住人口的资源消耗和污染排放强度; 3) 尝试将资源环境与当地产业人口相联系, 评价资源环境约束下不同发展模式的规模上限。以期有助于推进资源环境承载力理论研究与实践应用相结合, 为资源环境承载力评价提供参考。

1 研究区概况与数据来源

海南省位于中国大陆最南端(图1), 全省国土面积35 354 km², 常住人口917.13万人、GDP为4 044.51亿元(2016年末)。海南省与大陆隔海相望, 交通不便, 相对封闭, 资源环境承载力有限; 同时海南省作为经济特区、自由贸易试验区, 正着力打造对外开放的新高地。开展海南省资源环境承载力评价研究, 对于辅助其社会经济发展决策具有重要意义。

研究数据来自于各类统计资料, 综合考虑数据的时效性和可获得性(各类数据出版年份不一), 统一采用2016年数据。数量来源包括《中国统计年鉴(2017)》(国家统计局, 2018a)《海南统计年鉴(2017)》(海南省统计局, 2018)《中国环境统计年鉴(2017)》(国家统计局等, 2018b)《中国能源统计年鉴(2017)》(国家统计局能源统计司, 2018)等各类统计年鉴。产业分类依据国民经济行业分类(GB/T4754-2017)(国家标准化管理委员会, 2017)。其中产业和人口的资源消耗强度与污染排放强度数据根据统计资料计算间接获得。

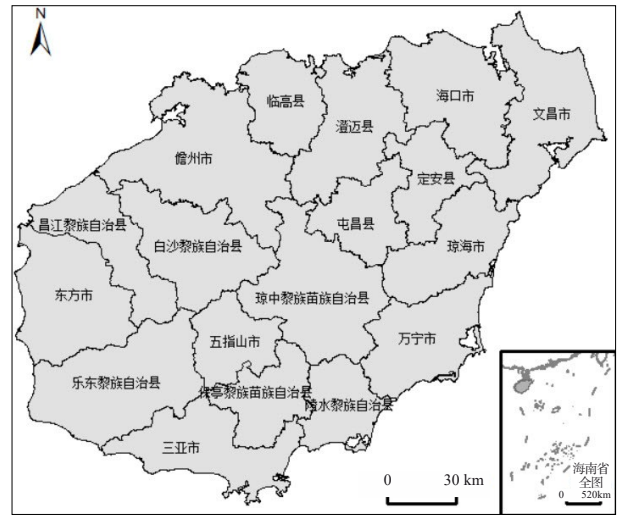


图1 研究区: 中国海南省

Fig.1 Study area: Hainan, China

2 研究方法

具体研究方法为: 首先, 评价各产业的重要性, 并排序分级, 为产业结构调整提供依据; 其次, 解析区域产业、人口的资源消耗与污染排放强度; 最后, 根据产业评价结果设定不同的产业结构调整情景, 基于产业和人口的资源消耗与污染排放强度计算不同发展情景下的资源环境承载力, 即产业和人口规模上限(图2)。

在一个开放的系统内, 要素的流动导致跨区占用和压力转移, 但对于无法搬运的要素(例如土地资源), 压力存在于本地。依据案例区情况(海岛), 以无法搬运的水土资源为例开展研究, 其中水承载力包括2个方面——水资源承载力和水环境承载力, 前者关注当地可用水资源总量, 后者考量的是水环境容量。

2.1 产业重要性评价

2.1.1 评价指标 产业评价旨在确定产业对当地社会经济的重要性, 为产业结构调整提供依据。为全面地评价各产业, 确保评价结果的合理性, 采用产业GDP、产业影响力指数、产业感应度指数、产业市场潜力4个指标评价产业权重。其中, 产业影响力指数、产业感应度指数由Leontief(1941)提出, 用于评价产业与其他产业的关系, 表征产业对当地经济系统的重要性。

1) 产业影响力指数

产业影响力指数指某产业增长一个单位对其他产业的影响程度, 反映该产业对其他产业的带动能

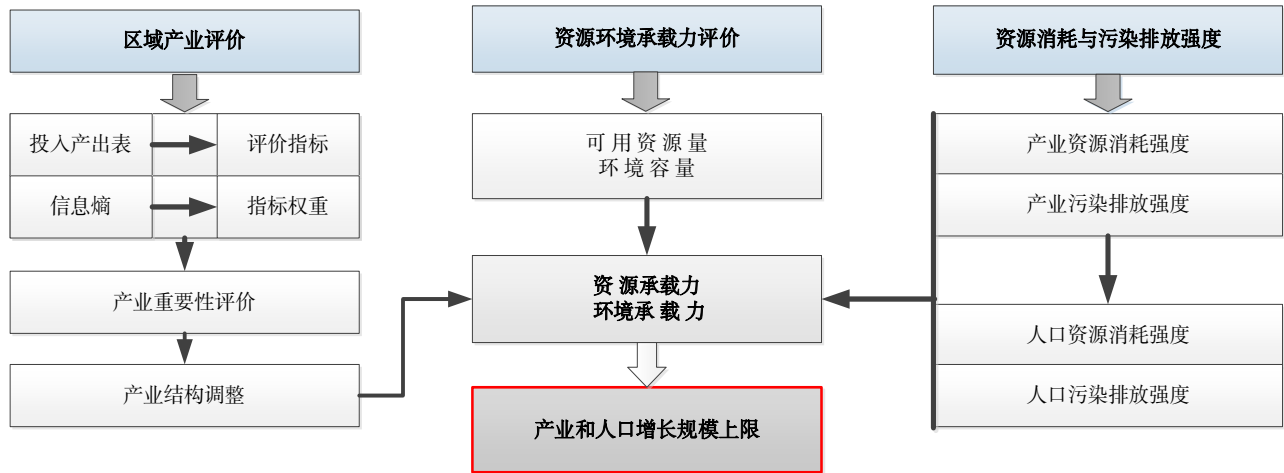


图2 资源环境承载力综合评价框架

Fig.2 Analytical framework of resource environmental carrying capacity evaluation

力。计算公式为：

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^m l_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m l_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中： I_j 是产业 j 的产业影响力指数； l_{ij} 是Leontief逆矩阵元素值， i 和 j 分别表示Leontief矩阵的行号与列号。基于中国投入产出表（刘卫东等，2018）计算获得Leontief逆矩阵。 $\sum_{i=1}^m l_{ij}$ 表征产业 j 的产业影响力； $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m l_{ij}$ 表征区域所有产业的平均产业影响力。

2) 产业感应度指数

产业感应度指数指区域所有产业均增加一个单位的最终需求，所产生的对某产业的需求量，表征该产业对当地产业经济的推动力，计算公式为：

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^m l_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中： R_i 是产业 i 的感应度指数； $\sum_{j=1}^m l_{ij}$ 表征产业 i 的推动力； $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij}$ 表征所有产业的平均推动力。

3) 产业市场潜力

综合本地产量与市场需求、全国的产量与市场需求评价该产业的市场潜力，计算公式为：

$$M_j = \frac{Y_j^r}{Y_j} \times \frac{aY_j^r}{aY_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中： M_j 是产业 j 的市场潜力； Y_j^r 与 Y_j 分别是产业 j

的区域内年销售额、全国年销售额； aY_j^r 与 aY_j 分别为研究区内产业 j 的人均年销售额、全国人均年销售额。

2.1.2 产业重要性评价 在确定上述指标权重的基础上进行加权得出各个产业的重要性。采用较为客观的信息熵法计算上述指标的权重。根据信息熵，若样本中某个指标的值存在很大差异，则该指标将被赋予较高的权重。假设有 m 个产业 n 个指标（本案例中 $m=35$ ， $n=4$ ），首先对各指标进行标准化消除量纲。设 x_{ij} 是第 i 个产业第 j 指标的值。产业 i 的指标 j 占有所有产业的指标 j 值总和的比例 p_{ij} 为：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

其中，指标 j 的熵值 E_j 计算公式如下所示，其中 $1/\ln(m)$ 是标准化系数。

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

其中，指标 j 的权重 w_j 计算公式为：

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (6)$$

确定各指标权重之后，将各个指标予以加权得出产业的重要性，如下式所示，其中 V_i 是产业 i 的重要性。

$$V_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} w_j \quad (7)$$

2.2 资源环境承载力评价方法

2.2.1 可用水土资源量及水环境容量 根据《海南省统计年鉴（2017）》，2016年海南省可用水资源

量为489.9亿m³，用水总量45亿m³，其中农业用水33.1亿m³、工业用水3.1亿m³、生活用水8.3亿m³、生态用水0.5亿m³。剩余可用水资源量为444.9亿m³。水环境容量方面，化学需氧量（COD）是研究区主要污染物，采用COD容量作为衡量指标。根据一级水质标准（COD含量为15 mg/L）（生态环境部，2002），可计算出海南省COD总容量为73.35万t，检出排放总量18.59万t（2016年），剩余容量54.76万t，并未超载。土地资源方面，海南省2020年规划建设用地36.67万hm²，已经使用34.41万hm²（2016年），剩余可用建设用地为2.26万hm²。

2.2.2 水资源承载力 水资源承载力指的是，随着经济和人口的增长，区域可用水资源量能够支撑的最大人口数量。具体而言，留出生态用水，求解剩余可用水资源能够承载的最大经济总量和人口规模。公式（8）用于求解产业增长对应的人口增加。公式（9）用于求解产业和人口增加所需水资源量，最大承载时，产业和人口用水量之和等于可用水资源量。

$$\text{pop}_n = \frac{\sum_{i=1}^m p_i}{a\text{GDP}} \quad (8)$$

$$W_a = \sum_{i=1}^m p_i \times \text{inten}W_i + \text{pop}_n \times \text{Pop}W + \text{Eco}W \quad (9)$$

式中： pop_n 是人口数量； p_i 是产业 i 的产值； $a\text{GDP}$ 是人均GDP，受技术发展水平影响，为对比不同的发展情景，本文假设技术水平不变，即 $a\text{GDP}$ 等于数据年份的人均GDP（2016年）； W_a 是生产生活生态用水总量； $\text{inten}W_i$ 是产业 i 对水资源的消费强度； $\text{Pop}W$ 是人口水资源消费强度，即人均资源消费量； $\text{Eco}W$ 是生态用水量，根据前文海南省水质利用状况，生态用水是生产生活用水的1.1%。

2.2.3 水环境承载力 水环境承载力是产业和人口污染排放总量等于水环境容量时的经济或人口规模，如下式所示：

$$E^{\text{COD}} = \sum_{i=1}^m p_i \times \text{inten}E_i^{\text{COD}} + \text{pop}_n \times \text{Pop}E^{\text{COD}} \quad (10)$$

式中： E^{COD} 是产业和人口的COD排放总量，水环境最大承载状态时， E^{COD} 等于当地水环境容量； p_i 与 pop_n 分别是产业 i 的GDP、人口总量； $\text{inten}E_i^{\text{COD}}$ 是 i 类产业的COD排放强度； $\text{Pop}E^{\text{COD}}$ 是居住人口的COD排放强度，即人均年生活COD排放量。

2.2.4 土地资源承载力 产业和人口的增长需要消耗土地资源，受限于规划建设用地，因此，土地最大承载时，产业用地与居住用地之和等于总的可用

土地资源量，如公式（11）所示。

$$L = \sum_{i=1}^m p_i \times \text{inten}L_i + \text{pop}_n \times \text{Pop}L \quad (11)$$

式中： L 是生产生活用地总量； p_i 是产业 i 的GDP； pop_n 是人口数量； $\text{inten}L_i$ 是产业 i 对土地资源消费强度（见表2）； $\text{Pop}L$ 是居住人口的土地资源的消耗强度，即人均土地资源消耗量。

3 结果分析

工业通常是产业结构调整的重要抓手，也是污染的主要来源，而农业难以实现大面积调整。因此，以工业为例，不同产业发展模式下，评价当地水资源、土地资源、水环境容量能够支撑的产业和人口最大规模，即承载力。如此将当地资源环境禀赋与其产业、人口的资源消耗、污染排放相结合评价资源环境承载力。

3.1 产业评价结果

各产业重要性评价结果如表1所示，基于该评价结果，采用自然断裂点法将产业分为3个层级。第一层级产业对当地的社会经济发展影响最强，重要性等级最高，包括烟草制造业；第二层级产业重要性次之，称为一般性产业，包括石油加工、炼焦及核燃料加工业，化学原料及化学制品制造业等；第三类产业经济效益和影响力较弱，称为辅助性产业。结果表明海南省的第一、第二层级产业多为高

表1 海南省产业权重

Table 1 Weights of industries in study area

分级	产业	权重	排序
第一层级	烟草制品业	0.753	1
	石油加工、炼焦及核燃料加工业	0.249	2
	化学原料及化学制品制造业	0.122	3
	电力、热力的生产和供应业	0.121	4
第二层级	农副食品加工业	0.093	5
	医药制造业	0.083	6
	非金属矿物制品业	0.082	7
	造纸及纸制品业	0.080	8
第三层级	汽车制造业	0.057	9
	有色金属矿采选业	0.051	10
	黑色金属矿采选业	0.051	11
	水的生产和供应业	0.051	12
	电气机械及器材制造业	0.042	13
	燃气生产和供应业	0.037	14
	酒、饮料和精制茶制造业	0.033	15
	橡胶和塑料制品业	0.031	16
	金属制品业	0.031	17
	食品制造业	0.029	18
	黑色金属冶炼及压延加工业	0.022	19
	计算机、通信及其他电子设备制造业	0.015	20

污染的化工产业。产业重要性评价结果为海南省产业结构调整提供依据。

3.2 产业和人口资源消耗与污染排放强度

3.2.1 产业的资源消耗与污染排放强度 通过计算得到各产业的水土地资源消耗强度、COD 排放强度(表2)。该表是资源环境承载力评价的基础。

表2 2016年中国产业的资源利用与污染排放强度

Table 2 Industrial resource utilization efficiency and pollution emission intensity

产业	水资源利用/ ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	COD/ ($\text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$)	土地利用/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{亿元}^{-1}$)
烟草制品业	1.73	0.13	8.43
石油加工、炼焦及核燃料加工业	56.21	2.65	489.15
化学原料及化学制品制造业	100.80	6.37	653.35
电力、热力的生产和供应业	908.46	0.69	1017.29
农副食品加工业	93.73	12.46	211.89
医药制造业	48.74	5.44	140.40
非金属矿物制品业	43.62	0.93	549.51
造纸及纸制品业	450.33	90.28	1 026.19
汽车制造业	19.48	0.50	135.71
有色金属矿采选业	106.50	4.88	181.94
黑色金属矿采选业	93.85	1.14	152.68
水的生产和供应业	745.69	4.19	418.32
电气机械及器材制造业	11.89	0.18	21.85
燃气生产和供应业	173.97	5.01	426.84
酒、饮料和精制茶制造业	79.40	12.09	213.97
橡胶和塑料制品业	10.02	0.75	117.26
金属制品业	32.91	0.93	85.11
食品制造业	60.72	6.44	210.79
黑色金属冶炼及压延加工业	61.69	1.49	454.96
计算机、通信及其他电子设备制造业	21.55	0.34	28.29

3.2.2 居住人口资源利用效率和污染排放强度 根据《海南省统计年鉴(2017)》,2016年海南省人均生活用水为 90.50 m^3 ;生活COD排放量为7.85万t,人均生活COD排放为 8.56 kg ;土地资源方面,由于各市县的數據不全,参考省会海口市用地情况,居住用地 44 km^2 ,人口174.58万人,人均居住用地为 0.0025 hm^2 。

3.3 资源环境承载力评价结果

根据产业重要性评价结果设定两种发展情景,分别用于检验当前经济发展模式和追求更高的经济发展水平而进行产业结构调整后的资源环境承载力。基础情景(情景1):保持2016年产业结构不变,即各产业保持现有的规模比例持续发展下去;产业结构调整情景(情景2):在情景1的基础上加以产业结构调整,着力发展第一和第二层级产业,

即烟草制品业、石油加工炼焦及核燃料加工业、化学原料及化学制品制造业、电力热力的生产和供应业、农副食品加工业、医药制造业、非金属矿物制品业、造纸及纸制品业。通过对比不同发展情景下的资源环境承载力,可知产业调整政策效果,辅助决策。

情景1评价结果(表3)显示,水资源、水环境、土地资源承载力均高于2016年人口总量(917.13万人),表明2016年海南省资源环境并未超载,产业有进一步发展空间。两种发展模式下均是水资源承载力最高,土地资源承载力最低,水环境承载力居中,表明研究区土地资源较为紧缺,这也源于国家为保护生态环境,对土地资源开发量予以总量控制。为谋求经济的进一步发展,海南省需要加强土地资源的集约利用。而水环境承载力低于水资源承载力,表明该地区虽然水资源总量还有很大的承载空间,但需降低污染排放强度,提升水环境质量。

表3 资源环境承载力评价结果

Table 3 Evaluation results of resource environmental carrying capacity

评价指标	情景1	情景2
水资源承载力	人口规模/万人	6 744.66
	经济规模/亿元	2 225.92
水环境承载力	人口规模/万人	10 672.62
	经济规模/亿元	9 816.23
土地资源承载力	人口规模/万人	3 801.59
	经济规模/亿元	1 901.97
	人口规模/万人	7 325.23
	经济规模/亿元	9 816.23
	人口规模/万人	955.74
	经济规模/亿元	926.08
	人口规模/万人	4 088.43
	经济规模/亿元	4 083.97

不同的发展模式下土地承载力变化不大,在调整产业结构后(情景2),土地承载力略有提升,而水环境承载力和水资源承载力却呈明显的下降。这表明,着力发展第一二层级产业,虽然可以推动经济发展,并略微提升土地利用效率,但污染排放、水资源利用强度会进一步增加,说明了2016年海南省第一、二层级产业多为高耗水高污染性产业,亟需加强水资源集约利用,并降低污染排放强度。

4 结论与讨论

本文着眼于产业和人口的资源消耗与污染排放,建构了资源环境承载力评价方法,将产业结构与资源环境承载力相联系,明晰了不同产业结构下资源环境的最大承载上限,即不同发展模式下的资源环境承载力,有助于推进资源环境承载力理论研究与实践应用相结合,为资源环境承载力评价提供

参考。但本文未考虑技术进步对资源环境承载力的影响,而资源环境所能支撑的经济规模及人口总量会随着技术进步而提升。因此,就模型的有效性而言,关注于评价结果的相对值更具意义,即不同发展情景的资源环境承载力的相对大小对于决策参考更具意义。

海南省案例研究显示,2016年的经济规模并未超载,产业有进一步发展空间。各种要素对比,水资源承载力最高,土地资源承载力最低,水环境承载力居中,表明研究区土地资源较为紧缺,需加强发展土地集约型产业,提升土地利用效率。为提升经济发展速度,可调整产业结构,着力发展经济效益更高的产业,即烟草制品业、石油加工炼焦及核燃料加工业、化学原料及化学制品制造业、电力热力的生产和供应业、农副食品加工业、医药制造业、非金属矿物制品业、造纸及纸制品业。但这些产业多为高耗水、高污染排放型产业,影响经济发展上限。为进一步提升经济发展规模,需要亟需加强水资源集约利用、降低污染排放强度,同时培育低能耗、低排放产业。

本文将区域产业、人口与资源环境承载力相联系,所建构的资源环境承载力评价方法政策意义更为明确,可用于对比不同发展模式下的资源环境承载力,回答“*What-if*”问题,为产业结构调整、控制发展规模提供科学依据。同时有助于推进资源环境承载力理论研究与实践应用相结合,丰富资源环境承载力、区域发展、产业规划等方面研究。另外,本文也存在一些不足之处,例如虽然基于社会经济与资源环境的作用关系厘清了产业、人口的资源利用和污染排放强度,但由于规模效应的存在,随着产业规模的提升,其资源利用效率通常会有所提升,污染排放强度也会下降,当地资源环境承载力会有进一步提升。因此,为提升模型的有效性和准确性,需进一步建立产业、人口的资源消耗与污染排放强度与其规模的关系。管理技术水平的进步也会提升资源利用效率、减少污染排放。因此,未来研究需要进一步明晰社会经济在不同规模时的资源环境效应。纳入更多的资源环境要素(如大气环境)也是进一步深化的重要内容。就具体应用而言,要素的选择需结合研究区的特点和实际需求。

参考文献 (References):

De Jonge V N, Pinto R and Turner R K. 2012. Integrating Ecological, Economic and Social Aspects to Generate Useful Management

Information Under the EU Directives' 'Ecosystem Approach'. *Ocean Coast Management*, 68: 169-188.

Errington P L. 1934. Vulnerability of Bobwhite Populations to Predation. *Ecology*, 15: 110-127.

樊杰,王亚飞,汤青,周侃. 2015. 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*, 35(1): 1-10. [Fan Jie, Wang Yafei, Tang Qing and Zhou Kan. 2015. Academic Thought and Technical Progress of Monitoring and Early-Warning of the National Resources and Environment Carrying Capacity (V 2014). *Scientia Geographica Sinica*, 35(1): 1-10.]

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. *地理科学进展*, 36(3): 266-276. [Fan Jie, Zhou Kan and Wang Yafei. 2017. Basic Points and Progress in Technical Methods of Early-Warning of the National Resource and Environmental Carrying Capacity (V 2016). *Progress in Geography*, 36(3): 266-276.]

封志明,杨艳昭,闫慧敏,潘韬,李鹏. 2017. 百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践. *资源科学*, 39(3): 379-395. [Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, Pan Tao and Li Peng. 2017. A Review of Resources and Environment Carrying Capacity Research Since the 20th Century: From Theory to Practice. *Resources Science*, 39(3): 379-395.]

国家标准化管理委员会. 2017. 国民经济行业分类(GB/T4754-2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjbz/201709/t20170929_1539288.html. [Standardization Administration. 2017. Industrial Classification for National Economic Activities (GB/T4754-2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjbz/201709/t20170929_1539288.html.]

国家统计局. 2018a. 中国统计年鉴(2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.html>. [National Bureau of Statistics of China. 2018a. China Statistical Yearbook (2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>.]

国家统计局,环境保护部. 2018b. 中国环境统计年鉴(2017). (2019-10-30) [2020-01-21]. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2018050254>. [National Bureau of Statistics, Ministry of Environment Protection. 2018b. China Statistical Yearbook on Environment (2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2018050254>.]

国家统计局能源统计司. 2018. 中国能源统计年鉴(2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2018070147>. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. 2018. China Energy Statistical Yearbook (2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2018070147>.]

海南省统计局. 2018. 海南统计年鉴(2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <http://stats.hainan.gov.cn/tj/tjsu/ndsj>. [National Bureau of Statistics of Hainan. 2018. Hainan Statistical Yearbook

- (2017). (2019-10-31) [2020-01-21]. <http://stats.hainan.gov.cn/tjj/tjsu/nds.j>.]
- Leontief W W. 1941. *Structure of American Economy, 1919-1929*. Cambridge: Harvard University Press, 181.
- Lou B, Qiu Y H and Ulgiati S. 2015. Energy-Based Indicators of Regional Environmental Sustainability: A Case Study in Shanwei, Guangdong, China. *Ecol. Indic.*, 57: 514-524.
- 李天霄, 付强, 彭胜民. 2012. 基于DPSIR模型的水土资源承载力评价. 东北农业大学学报, 43 (8): 128-134. [Li Tianxiao, Fu Qiang and Peng Shengmin. 2012. Evaluation of Water and Soil Resources Carrying Capacity Based on DPSIR Frame Work. *Journal of Northeast Agricultural University*, 43(8): 128-134.]
- 刘卫东, 唐志鹏, 韩梦瑶. 2018. 2012年中国31省区域间投入产出表. 北京: 中国统计出版社. [Liu Weidong, Tang Zhipeng and Han Mengyao. 2018. *The 2012 China Multi-Regional Input-Output Table of 31 Provincial Units*. Beijing: Science Press.]
- Malthus T R. 2001. *An Essay on the Principle of Population*. London: Pickering. [1st ed. of 1798]
- 毛汉英, 余丹林. 2001. 环渤海地区区域承载力研究. 地理学报, 56 (3): 363-371. [Mao Hanying and Yu Danlin. 2001. Regional Carrying Capacity in Bohai Rim. *Acta Geographica Sinica*, 56(3): 363-371.]
- 牛方曲, 封志明, 刘慧. 2018. 资源环境承载力评价方法回顾与展望. 资源科学, 40 (4): 655-663. [Niu Fangqu, Feng Zhiming and Liu Hui. 2018. Evaluating Methods of Regional Resources and Environment Carrying Capacity: A Review. *Resources Science*, 40(4): 655-663.]
- Odum H T. 1988. Self-Organization, Transformity, and Information. *Science*, 242: 1132-1139.
- Peng J, Du Y Y, Liu Y X and Hu X X. 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. *Ecological Indicators*, 60: 1017-1030.
- Rees B, Wackernagel M and Testemale P. 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Brand: New Society Publishers.
- Rees W E. 1992. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out. *Environment and Urbanization*, 4(2): 121-130.
- Sutton P C, Anderson S J, Tuttle B T and Morse L. 2012. The Real Wealth of Nations: Mapping and Monetizing the Human Ecological Footprint. *Ecol. Indic.*, 16: 11-22.
- 生态环境部. 2002. 地表水环境质量标准(GB 3838-2002). (2019-10-31) [2020-01-21]. http://http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml. [Ministry of Ecology and Environment of PRC. 2002. Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838-2002). (2019-10-31) [2020-01-21]. http://http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml.]
- Thebault J, Schraga T S, Cloern J E and Dunlavy E G. 2008. Primary Production and Carrying Capacity of Former Salt Ponds After Reconnection to San Francisco Bay. *Wetlands*, 28(3): 841-851.
- Wackernagel M. 1991. Land Use: Measuring a Community's Appropriated Carrying Capacity as an Indicator for Sustainability. Vancouver: UBC Task Force on Healthy and Sustainable Communities.
- Wei C, Guo Z Y, Wu J P and Ye S F. 2014. Constructing an Assessment Indices System to Analyze Integrated Regional Carrying Capacity in the Coastal Zones-A Case in Nantong. *Ocean & Coast Management*, 93: 51-59.
- Zheng D F, Zhang Y, Zang Z and Sun C Z. 2015. Empirical Research on Carrying Capacity of Human Settlement System in Dalian City, Liaoning Province, China. *China Geographical Science*, 25 (2): 237-249.
- Zhou X Y, Lei K, Meng W and Khu S T. 2017. Industrial Structural Upgrading and Spatial Optimization Based on Water Environment Carrying Capacity. *Journal of Cleaner Production*, 165: 1462-1472.
- Zhu Y, Drake S, Lu H S and Xia J. 2010. Analysis of Temporal and Spatial Differences in Eco-Environmental Carrying Capacity Related to Water in the Haihe River Basins, China. *Water Resource Management*, 24: 1089-1105.
- 张林波, 李兴, 李文华, 王维, 刘孝富. 2009. 人类承载力研究面临的困境与原因. 生态学报, 29 (2): 889-897. [Zhang Linbo, Li Xing, Li Wenhua, Wang Wei and Liu Xiaofu. 2009. Human Carrying Capacity Research: Dilemma and Reasons. *Acta Ecologica Sinica*, 29(2): 889-897.]

Water and Soil Carrying Capacity and Adjustment of Industrial Structure in Hainan Province

Niu Fangqu^{1,2,3}, Yang Xinyu^{1,3} and Sun Dongqi^{1,3}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geopolitical Setting of Southwest China and Borderland Development, Kunming 650500, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: After 40 years of rapid development, China has produced incredible economic results at the heavy cost of resources and the environment. Although research on this has attracted increasing attention, no unified paradigm has been formed so far. Additionally, the mechanical exploration of the interaction among socioeconomic factors, resources, and the environment is still weak, and conclusions lack operability, which makes it difficult to provide effective decision-making support for industrial development. This study focuses on the relationship among industry, population, resources, and environmental factors in order to construct a comprehensive evaluation framework to be applied to Hainan province. The framework first evaluates the importance of industries and then analyzes the quantitative relationship among regional industries, population resource consumption, and the intensity of pollution emissions. Finally, it sets different adjustments to the industrial structure based on the industrial and population resource consumption and the intensity of pollution emissions to evaluate the resource and environmental carrying capacity of different industrial structures (that is, the upper limit of the scale of industry and population). The results show that the current economic scale of Hainan province is not overloaded, and there remains room for further industrial development. For example, land resources have become the primary limiting factor for the development of Hainan province, followed by the water environment. Most pillar and basic industries with higher economic benefits are highly water-consuming and polluting industries. There is an urgent need to reduce the use of water resources as well as the intensity of pollution emissions. To further enhance economic development, it is necessary to cultivate industries with low energy consumption and low emissions. The evaluation method of resource and environmental carrying capacity constructed in this study holds clearer policy significance and can provide decision-making references for optimizing industrial structure adjustments while controlling the scale of industry and population development. This study further connects the theoretical research and practical application of resource and environmental carrying capacity, improves the operability of the research results in terms of decision-making support, and provides methodological references for the evaluation of resource and environmental carrying capacity. Future research challenges were also discussed. With respect to the specific application of the model, it is more meaningful to focus on the relative value of the model evaluation results (that is, differences among development scenarios) instead of the absolute values of each scenario.

Keywords: Resource and Environmental Carrying Capacity (RECC); sustainable development; industrial structure; resource consumption; pollutant emission; Hainan Province