

# 资源环境承载力综合评价方法在西藏产业结构调整中的应用

牛方曲<sup>1,2</sup>, 封志明<sup>1</sup>, 刘 慧<sup>1</sup>

(1. 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)

**摘要:** 经济的快速发展造成资源的过度消耗和环境恶化, 资源环境承载力研究逐渐得以关注。本文构建了产业、人口、经济、资源、环境综合分析框架, 该框架首先评价各产业对区域社会经济的重要性, 确定产业结构调整方向; 进而分析产业、人口与资源环境间相互作用机制, 明晰产业经济、人口规模与资源利用、环境污染的关系; 然后开展资源环境承载力综合评价, 为实现环境友好、资源有效利用前提下的最大社会经济发展规模提供依据。西藏自治区案例研究结果显示, 有色金属矿采选业、旅游业、酒饮料和精制茶制造业对当地社会经济系统有着重要作用, 成为支柱产业; 不同发展情景的资源环境承载力评价, 确定了资源环境限制下各种产业结构调整所能支撑的最大人口和经济规模, 为区域产业发展提供决策依据。本文所构建的分析框架可为实现“社会经济—资源环境”系统可持续发展提供决策支撑。该框架的建立增强了资源环境承载力评价方法在辅助决策方面的可操作性, 有助于推进区域资源环境承载力理论研究和实践应用。

**关键词:** 资源环境承载力; 产业结构; 评价方法; 可持续发展; 西藏

DOI: 10.11821/dlxb201908006

## 1 引言

资源环境承载力 (Resource Environment Carrying Capacity, RECC) 理论关注于社会经济发展与资源环境相互作用关系, 为实现“社会经济—资源环境”的可持续发展提供良好的支撑。区域资源环境承载力是指特定的区域 (社会经济系统) 内, 在自然生态环境不受破坏并维系良好的生态系统前提下, 区域资源环境所能承载的人口数量的上限<sup>[1]</sup>。

Errington 于 1934 年提出承载力概念, 并将其定义为生态系统基于有限的食物和避难所以及捕食者和人类开采同时存在的限制条件下达到饱和水平时的最大生物量, 并以野生鹤鹑为例评价了区域生态环境承载力, 即所能承载的野生鹤鹑的最大种群数量<sup>[2]</sup>。之后从人类社会经济角度研究 RECC 的文献大量涌现, 提出了资源承载力的概念, 例如土地资源承载力<sup>[3-5]</sup>、水资源承载力<sup>[6-8]</sup>、矿产资源承载力<sup>[9]</sup>、环境承载力<sup>[10-11]</sup>、生态承载力<sup>[12]</sup>等。文献回顾可知, 资源环境承载力研究起源于人口论, 之后发展了多种方法论, 包括生态足迹系列、能值、综合指数法等方法。

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2019-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503506); 中国科学院战略性先导科技专项(A类) (XDA19040401, XDA20080100) [Foundation: National Key Research and Development Program, No.2016YFC0503506; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19040401, No.XDA20080100]

作者简介: 牛方曲(1979-), 男, 安徽淮南人, 博士, 副研究员, 主要从事区域、城市可持续发展模拟分析研究。

E-mail: niufuq@reis.ac.cn

Malthus 于 1798 年发表的论文 “An essay on the principle of population”<sup>[13]</sup> 是 19 世纪和 20 世纪最具影响力的人口学说, 也被认为是现代 RECC 概念的基础<sup>[14]</sup>。Malthus 最早意识到环境对人类物资需求的限制<sup>[15]</sup>, 奠定了之后的 “人口增长—资源环境—发展” 研究框架。该理论侧重的是食物限制, 只是在特定时间段内得到验证, 更适用于低收入国家而非发达国家, 此外, 马氏人口论并未剥离出社会经济系统对本地资源环境的压力, 而这正是目前区域 RECC 评价要回答的问题<sup>[1]</sup>。

生态足迹 (Ecological Footprint, EF) 的概念由 Wackernagel 等于 20 世纪 90 年代提出<sup>[16-19]</sup>。EF 实则是提供了一个资源利用清算工具, 用于计算特定的人口所消耗的生态生产性土地和水域面积<sup>[20]</sup>。EF 可用于计算特定区域生态盈余和生态赤字, 在计算全球生态环境承载力、国家或地区自然资源负债情况以及比较不同人群的生态消耗方面可以发挥很好的作用。但就区域尺度而言, 由于涉及跨区占用问题, EF 未能反映本地生态环境的承载状态 (对当地的压力)。对于一个开放的区域系统来说, 当地资源环境对其社会经济系统的承载力是多少, 并未得到回答。

净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 用于度量人类对地球生物圈层的影响, 是生态系统吸收太阳能减去其呼吸作用消耗的能量后剩下的能量<sup>[21]</sup>。研究认为 NPP 提供了所有消费物体生存、增长、繁殖所需要的能量, 是地球上食物的总来源<sup>[21-22]</sup>, 之后诸多学者利用能值开展研究<sup>[23-25]</sup>。联合国粮农组织基于粮食产量与人均热量需求定义了承载力的计算方法<sup>[26]</sup>。NPP 方法可评价人类活动对地球资源的消耗情况, 但对于区域资源环境的承压状态未作关注, 难以直接应用于区域 RECC 评价<sup>[1]</sup>。

综合指数法包括数学模型处理法和指标加权法, 是基于 “压力—状态—响应”<sup>[27-28]</sup>、“压力—状态—影响—响应”<sup>[29]</sup>或 “驱动因素—压力—影响—响应”<sup>[30-32]</sup>等理论, 通过对一系列指标进行数学处理或直接加权得出一个综合指数<sup>[33-35]</sup>, 评价结果为一个无量纲的表征值, 物理意义不清晰, 难以给出关键阈值与预警指数标准, 政策指导意义不强。此外, 综合指数法评价结果多是承载状态, 而非承载力。也有学者将系统动力学模型 (SD)<sup>[36]</sup>、多目标函数 (MOP)<sup>[37]</sup>、神经网络 (ANN)<sup>[36]</sup>等方法用于 RECC 模拟评价。

各种方法共同的目标是实现人与自然的和谐共存, 但要素之间的相互作用关系、深层作用机制仍然需要进一步明晰<sup>[1, 38-39]</sup>, 理论研究与实践应用方面仍然存在着脱节<sup>[40]</sup>, 在辅助产业调控、空间布局方面难以起到很好的支撑作用。本文构建了产业、人口、经济、资源环境的综合分析框架, 根据产业在社会经济系统中的作用评价其重要性, 基于产业、人口与资源环境间的相互作用机制评价资源环境承载力, 为确定环境友好、资源有效利用前提下最大社会经济发展规模提供决策依据。该框架通过参数修正可用于其他区域, 有助于推进 RECC 理论研究及实践应用。

## 2 研究区域及数据

### 2.1 研究区概况

西藏自治区位于中国西部 (图 1), 该地区多为山地, 地广人稀, 风景优美但生态脆弱, 是中国相对封闭的地区。西藏总面积为 122.84 万 km<sup>2</sup>, 包括 7 个地级市或地区, 2015 年总人口 323.97 万人, GDP 为 1026.39 亿元, 经济发展相对滞后、工业化程度较低, 目前正着力发展经济。为避免经济发展带来的资源环境问题, 开展资源环境承载力评价研究, 辅助决策以实现 “社会经济—资源环境” 系统可持续发展具有重要意义。

山区由于土地形态限制及生态保护所需, 土地资源通常较为紧缺<sup>[38]</sup>, 是经济发展的

限制性因素之一。此外,该地区富含水源,是雅鲁藏布江、澜沧江等河流的发源地。作为源头汇水区,西藏的水资源利用和水环境质量是重要的考量内容。为此本文重点研究西藏水和土承载力。其中“水”承载力包括两部分:水资源承载力和水环境承载力,前者考量的是可用水资源总量,后者关注的是水环境容量。

## 2.2 研究数据

研究数据来自于各种统计资料以及研究团队在实践工作中积累。数据来源包括《西藏统计年鉴(2016)》《中国统计年鉴(2016)》《中国环境年鉴(2016)》《中国能源统计年鉴(2016)》《拉萨统计年鉴(2016)》。产业分类依据国民经济行业分类(GB/T4754-2002)。为评价产业的重要性,本文基于中国区域间投入—产出表计算了产业的影响力系数、感应度系数、市场发展潜力。

(1) 可用水资源。根据《西藏统计年鉴(2016)》《中国环境年鉴(2016)》,西藏自治区2015年可用水资源总量为3853亿 $\text{m}^3$ ,用水总量30.8亿 $\text{m}^3$ ,剩余可用水资源量总量为3822.2亿 $\text{m}^3$ 。用水包括农业用水27.2亿 $\text{m}^3$ 、工业用水1.4亿 $\text{m}^3$ 、生态用水0.1亿 $\text{m}^3$ 、居民生活用水6361万 $\text{m}^3$ 以及其他产业用水。由此得出城镇生态用水占比为4.7%。

(2) 水环境容量。根据《中国环境统计年鉴(2016)》,西藏地区主要水污染物是COD,2015年西藏的COD排放总量为2.88万t,其中工业、农业、家庭生活排放分别为0.09万t、0.55万t、2.21万t。根据中国地表水环境质量标准<sup>[41]</sup>,Ⅰ类、Ⅱ类水化学需氧量(COD)  $\leq 15 \text{ mg/L}$ ,据此水质标准、利用公式(1)可计算西藏剩余水环境容量( $WC_{\text{remain}}$ )为575.07万t/a,远未超载。

$$WC_{\text{remain}} = \text{Water}_{\text{total}} \times WS - \text{Emission}_{\text{COD}} \quad (1)$$

式中: $WC_{\text{remain}}$ 为剩余水环境容量; $\text{Water}_{\text{total}}$ 为当地可用水资源总量; $WS$ 是水质标准; $\text{Emission}_{\text{COD}}$ 为COD排放量。

(3) 可用土地资源。根据《国土资源部关于西藏自治区土地利用总体规划(2006-2020年)》<sup>[42]</sup>,2020年西藏的规划建设用地为16.47万 $\text{hm}^2$ 。《西藏统计年鉴(2016)》数据显示已使用建设用地为14.5万 $\text{hm}^2$ 。由此得出剩余建设用地为1.97万 $\text{hm}^2$ ,用于支撑产业和人口的进一步增长。

## 3 研究方法

### 3.1 分析框架

区域资源环境承载力评价包括三大步骤(图2):产业重要性评价、社会经济资源环境效应分析、资源环境承载力评价,具体过程详述如下:

① 产业重要性评价是通过评价各个产业对当地社会经济的重要性对产业进行分级。评价指标包括产业国内生产总值、产业影响力系数、产业感应度系数、产业潜力。采用

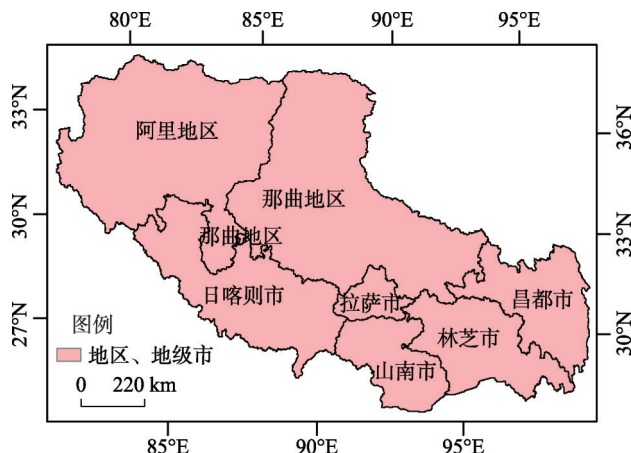


图1 研究区:中国西藏

Fig. 1 Study area: Tibet, China

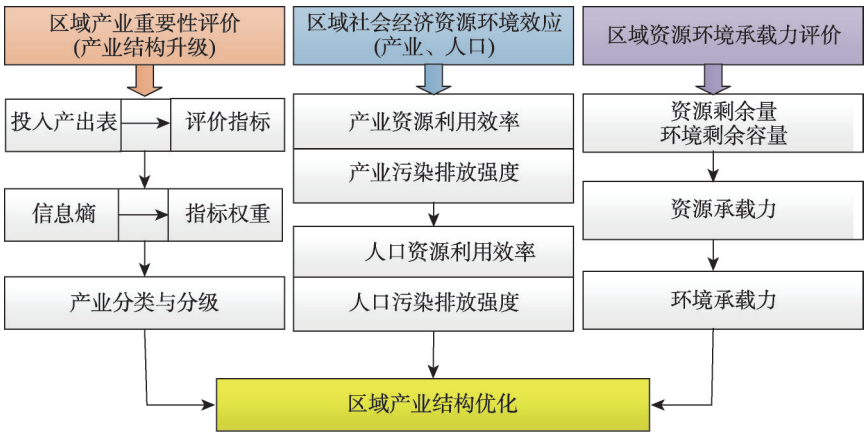


图2 资源环境承载力综合评价分析框架

Fig. 2 Analytical framework of RECC comprehensive evaluation

熵值法确定每个指标的权重后通过指标加权评价各产业的重要性，据此将产业分为三大类：支柱产业、一般性产业、辅助性产业，基于此调整产业结构。

② 社会经济资源环境效应分析旨在确定各产业及居住人口对各类资源的消耗强度及污染排放强度。产业规模和结构是影响区域资源环境最直接的因素，不同产业的资源消耗、污染类型、排放强度存在差异，产业结构的变化会对区域资源环境效率产生重要影响。除了产业外，区域的资源消耗、污染排放来源也包括家庭人口。本步骤将分别确定产业经济和居住人口的资源环境效应。

③ 开展资源环境承载力评价，根据上述产业重要性评价结果，设定不同的发展情景（产业结构），基于产业、人口的资源环境效应综合评价不同发展模式的资源环境承载力。

3.2 产业重要性评价

为评价产业对于地区经济发展的重要性，选取的指标包括地区总产值、产业影响力系数、产业感应度系数、产业潜力。除地区生产总值以外，其他指标需要采用子模型计算得出。重要性评价价值越高，表明产业对于当地经济发展越重要。

3.2.1 产业评价指标的建立 产业影响力系数、产业感应度系数最初由 Leontief 提出<sup>[43]</sup>。根据中国 2012 年投入产出表<sup>[44]</sup>，计算得到 Leontief 逆矩阵，基于该矩阵计算得出各产业的影响力系数和感应度系数。产业影响力系数指的是该产业一个单位的增长对其他产业的影响程度，反映了一个产业对其他产业的带动能力。假设有  $m$  个产业，计算公式如下：

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

式中： $I_j$  是产业  $j$  的影响力系数，表征产业  $j$  对其他产业的带动能力； $l_{ij}$  是 Leontief 逆矩阵元素值，表征的是产业  $j$  对产业  $i$  的带动力； $\sum_{i=1}^m l_{ij}$  表征产业  $j$  的影响力； $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m l_{ij}$  表征所有产业的平均影响力； $i$  和  $j$  分别表示 Leontief 逆矩阵的行号与列号。

产业感应度系数指的是若所有产业的最终需求均增加一个单位，对某产业需求的影响，表征了该产业对当地产业的推动力，计算公式如下：

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^m l_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij}}, \quad (i=1, 2, \cdots, m) \tag{3}$$



式中:  $R_i$  是产业  $i$  的感应度系数;  $\sum_{j=1}^m l_{ij}$  表征产业  $i$  的响应能力;  $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij}$  表征所有产业的平均响应能力。

上述计算过程显示, 某个产业的影响力系数与感应度系数的计算是基于该产业的发展状态与其他产业平均状态之间相对关系, 如此可以减少 Leontief 矩阵中异常值造成的偏差。产业的影响力系数与感应度系数可以很好地反应在区域经济系统中某个产业的重要性。

另一个评价指标是产业市场潜力, 该指标综合考量本地产量与市场需求、全国的产量与市场需求评价该产业市场潜力, 计算公式如下:

$$M_j = \frac{S_j^r}{S_j^c} \times \frac{aS_j^r}{aS_j^c}, \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中:  $M_j$  是产业  $j$  的市场潜力;  $S_j^r$ 、 $S_j^c$  分别为研究区某产业的年销售额、全国同业年销售额;  $aS_j^r$ 、 $aS_j^c$  分别为研究区某产业的人均年销售额、全国同业人均年销售额。

**3.2.2 产业重要性评价** 评价产业重要性前首先需要确定每个评价指标的权重, 本研究采用熵值法确定指标权重。信息熵是用于测试各指标对于评价目标有效性的较为客观的方法。例如, 当某个指标在不同产业间其值存在很大差异, 该指标的信息熵会很小, 该指标被认为很重要, 将被赋予较高的权重。

首先, 所有产业的指标组成一个矩阵  $Y=(X_{ij})_{m \times n}$ , 如表 1 所示。为计算产业的权重, 需要对各个指标予以标准化 (公式 (5)), 消除量纲。公式中  $\max(X_{ij})$ 、 $\min(X_{ij})$  分别是样本数据中指标  $j$  的最大值和最小值。标准化后的矩阵为  $A=(x_{ij})_{m \times n} (x \in [0, 1])$ 。

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}, \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

首先计算产业  $i$  的第  $j$  个指标占有所有产业的指标  $j$  值总和的比例  $p_{ij}$ :

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (6)$$

指标  $j$  的熵值  $h_j$  计算公式如下:

$$h_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

式中:  $1/\ln(m)$  是标准化系数。指标  $j$  的权重  $w_j$  计算如下:

$$w_j = \frac{1 - h_j}{\sum_{j=1}^n (1 - h_j)} \quad (8)$$

区域各个产业的重要性 ( $V_i$ ) 可通过公式 (9) 计算得到:

$$V_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} w_j \quad (9)$$

表 1 产业评价指标矩阵

Tab. 1 Industrial evaluation index matrix

产业	GDP	产业影响力系数	产业感应度系数	产业潜力
产业 1	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$
产业 2	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$
产业 3	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}$
...	...	...	...	...
产业 $m$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	$X_{m3}$	$X_{m4}$

产业的重要值  $V_i$  为产业结构调整提供依据。计算过程是基于统计数据和投入/产出数据。其中产业影响力系数、感应度系数、市场潜力的计算确保了评价结果及支柱产业选择的合理性。

西藏目前处于工业化初期，进一步工业化谋求经济发展仍然是其重要诉求，同时旅游业是其第一大产业，因此本文重点分析工业和旅游业。西藏产业评价结果如表2所示。对西藏社会经济发展影响较为显著的工业及旅游业共17个，排序后采用自然断点法将其分为三类，第一类包括：有色金属矿采选业、旅游业、酒饮料和精制茶制造业，第一类产业是对当地经济发展具有重要带动作用的产业，称为支柱产业，也是产业结构优化重点考虑的产业；第二类产业称为一般性产业，可以保持现有态势继续发展；第三类是对当地经济发展贡献较小的产业，称为辅助性产业，在产业结构优化过程中可以考虑淘汰或削减的产业。

表2 西藏产业重要性评价  
Tab. 2 Weights of industries in Tibet, China

层级	产业	重要性	排序
第一类 (支柱产业)	有色金属矿采选业	0.617	1
	旅游业	0.333	2
	酒饮料和精制茶制造业	0.182	3
第二类 (一般性产业)	医药制造业	0.154	4
	化学原料及化学制品制造业	0.137	5
	印刷业和记录媒介的复制	0.132	6
	造纸及纸制品业	0.127	7
	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	0.127	8
	食品制造业	0.118	9
	农副食品加工业	0.116	10
第三类 (辅助性产业)	电力热力生产供应业	0.078	11
	非金属矿物制品业	0.074	12
	黑色金属矿采选业	0.053	13
	纺织业	0.047	14
	木材加工和木、竹、藤、棕草制品业	0.033	15
	电器机械及器材制造业	0.030	16
	非金属矿采选业	0.017	17

3.3 社会经济资源环境效应

区域社会经济的资源环境效应分析旨在确定产业及人口的资源消耗强度及污染排放强度，为RECC评价做准备。

3.3.1 产业资源环境效应 参考《中国统计年鉴（2016）》《中国环境年鉴（2016）》《中国能源统计年鉴（2016）》《西藏统计年鉴（2016）》《中国城市统计年鉴（2016）》的相关数据，计算了各产业的资源消耗强度和环境污染强度，其中旅游业参考了餐饮住宿业的数据计算得出（表3），各产业的资源消耗强度和污染排放强度存在明显差异。

3.3.2 人口资源环境效应 产业的发展通常会伴随着人口数量的增长，人口的增长同样会带来资源消耗与污染排放的增加。如前文所述，西藏地区2015年居民生活用水6361万m<sup>3</sup>，总人口323.97万人。由此得出人均生活用水为19.63 m<sup>3</sup>。

表3 产业资源消耗及污染排放强度  
Tab. 3 Intensity of China's resource consumption and pollution emission by industry

层级	产业	水资源消耗 (m <sup>3</sup> /万元)	COD (kg/万元)	土地利用 (hm <sup>2</sup> /亿元)
第一层级	有色金属矿采选业	106.5	4.88	112.63
	旅游业	24.63	9.85	2.88
	酒饮料和精制茶制造业	79.4	12.09	33.19
第二层级	医药制造业	48.74	5.44	15.98
	化学原料及化学制品制造业	100.8	6.37	35.83
	印刷业和记录媒介的复制	19.8	0.32	1.27
	造纸及纸制品业	450.33	90.28	188.41
	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	20.68	0.22	1.02
	食品制造业	60.72	6.44	20.82
	农副食品加工业	93.73	12.46	30.59
第三层级	电力热力生产供应业	908.46	0.69	200.00
	非金属矿物制品业	43.62	0.93	71.01
	黑色金属矿采选业	93.85	1.14	16.23
	纺织业	160.44	7.02	31.51
	木材加工和木、竹、藤、棕草制品业	34.32	1.54	12.85
	电器机械及器材制造业	11.89	0.18	0.12
	非金属矿采选业	133.53	1.75	36.58

根据《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》可得到居民日污水产生量、排放系数和排放浓度，利用公式（10）计算得出居民人均生活 COD 年排放量为 16.75 kg。

$$PopE^{COD} = aPopWP \times \alpha \times d \tag{10}$$

式中： $PopE^{COD}$ 为居民人均生活 COD 年排放量； $aPopWP$ 人均年污水产生量； $\alpha$ 和 $d$ 分别为污水排放系数、COD 排放浓度。

西藏自治区的城市化人口和土地主要集中于省会拉萨市，参考拉萨情况，居住用地 24.76 km<sup>2</sup>，居住人口 29.71 万人，可以得出人均居住用地 83 m<sup>2</sup>。

3.4 区域资源环境承载力评价

3.4.1 水资源承载力评价 水资源承载力考量的是水资源在特定的经济水平下可承载的最大人口数量。产业进一步发展需要消耗水资源，增长的人口也进一步消耗资源。水资源处于最大承载状态时，产业和人口用水量之和等于可用水资源量，如公式（11）所示。这里的可用水资源量是将区域可用水资源总量去除生态用水（4.7%）的结果。

$$R_a^v = \sum_{i=1}^m p_i \times intenR_i^v + pop \times PopR^v \tag{11}$$

$$pop = \frac{\sum_{i=1}^m p_i}{aGDP} \tag{12}$$

式中： $R_a^v$ 是 $v$ 类资源（水资源）的可用量； $m$ 是产业数量； $p_i$ 是产业 $i$ 的产值； $intenR_i^v$ 是产业 $i$ 对资源 $v$ 的消费强度（表3）； $pop$ 是人口数量； $PopR^v$ 是人口对 $v$ 类资源（水资源）的消费强度，即人均资源消费量； $aGDP$ 是人均 GDP，假设社会经济水平不变的情况

下,  $aGDP$  等于目前的人均 GDP。根据公式 (11)、(12) 可得出水资源量能够支撑的产业和人口的上限。

**3.4.2 水环境承载力评价** 水环境承载力在保证一定水质的情况下, 水环境容量所能支撑的最大人口数量。与资源消耗类似, 产业和居住人口均产生污染排放, 最大承载时的产业和人口污染排放之和等于水环境容量, 计算公式如下:

$$E^v = \sum_{i=1}^m p_i \times intenE_i^v + pop \times PopE^v \tag{13}$$

式中:  $E^v$  是  $v$  类污染物容量, 在本文中, 其为 COD 容量;  $m$  是产业数量;  $p_i$ 、 $pop$  分别是产业  $i$  的地区生产总值、人口总量;  $intenE_i^v$  是  $i$  类产业的  $v$  类污染排放强度 (表 3),  $PopE^v$  是居住人口的  $v$  类污染物排放强度, 即人均年生活排放量。根据公式 (12) 和公式 (13) 可以得出水环境容量能够支撑的产业发展和人口增长潜力。

**3.4.3 土地资源承载力评价** 土地资源承载力评价目标是确定在特定的社会经济发展水平下可用土地资源能够承载的人口数量。对于工业行业而言, 产业进一步发展需要消耗土地资源, 受限于规划建设用地, 同时居住人口也占用土地资源, 因此, 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, 计算公式如下:

$$L = \sum_{i=1}^m p_i \times intenL_i + pop \times PopL \tag{14}$$

式中:  $p_i$  是产业  $i$  的产值,  $pop$  是人口数量,  $L$  是土地资源的可用量,  $intenL_i$  是产业  $i$  对土地资源消费强度 (表 3),  $PopL$  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。根据公式 (14) 和公式 (12) 可得出土地资源能够支撑的产业及人口增长潜力。

4 评价结果

根据上述西藏产业评价结果, 设定不同的产业结构调整情景。首先评价的是案例区社会经济按照目前模式发展下去的 RECC (情景 1), 在该情景的基础上调整产业结构, 着力发展支柱产业, 同时淘汰辅助性产业 (情景 2)。此外, 旅游业目前是西藏产值最高的产业, 也是目前大力发展的产业, 因此, 本文进一步分析着力发展旅游业情景下区域资源环境承载力 (情景 3)。

如前文所述, 资源环境承载力评价是基于一定的社会经济发展水平。为方便各种情景对比, 本文假定各种发展情节下, 社会经济发展水平不变, 采用人均 GDP 表征。其中情景 2 (着力发展支柱产业、淘汰辅助性产业) 因为淘汰了辅助性产业, 剩余水资源总量需要包括淘汰产业所节省出来的水资源量, 即目前剩余水资源量与淘汰产业的用水量之和; 剩余水环境容量、可用土地资源情况类似。

利用上述分析框架, 西藏各种发展情景的资源环境承载力评价结果如表 4 所示。评价结果显示, 3 种发展模式下均是土地资源承载力最弱, 水资源承载力最强, 而水环境

表 4 西藏资源环境承载力评价结果  
Tab. 4 Resource and environment carrying capacity evaluation in Tibet

承载力分项	保持现有模式		着力发展支柱产业、淘汰辅助性产业		着力发展旅游业	
	人口(亿人)	经济(万亿元)	人口(亿人)	经济(万亿元)	人口(亿人)	经济(万亿元)
水资源承载力	4.05	12.84	24.98	79.12	33.34	105.63
水环境承载力	2.25	7.41	1.93	6.11	2.08	6.58
土地资源承载力	0.04	0.12	0.05	0.17	0.25	0.79



承载力居中(图3),说明制约研究区社会经济发展的首要因素是土地资源,源于该地区为山区,可用的建设用地面积有限,任何发展模式都难以逾越;同时也表明该地区水资源丰富,单从总量上而言,足以支撑该地区的社会经济发展;此外,水环境承载力低于水资源承载力,表明目前的排放强度下,尽管水资源丰富,水污染将制约社会经济发展。

各种情景对比可知,较之目前的发展模式,着力发展支柱产业并淘汰辅助性产业、着力发展旅游业对于水资源承载力均有较大的提高(图4a),表明目前的产业发展对水资源需求较大,产业结构调整对水资源利用效率有很大的提升;水环境承载力方面(图4b),保持目前的发展模式水环境承载力最高;土地资源承载力方面(图4c),与现有发展模式相比,着力发展支柱产业并淘汰辅助性产业、着力发展旅游业两种发展情景下土地资源承载力均有所提高,其中着力发展支柱产业对于土地资源承载力提升微弱,而发展旅游业对其提升较大。总的来看,着力发展旅游业对研究区的资源环境承载力提升较高。在不破坏景观的情况下,西藏可致力于旅游业的发展。

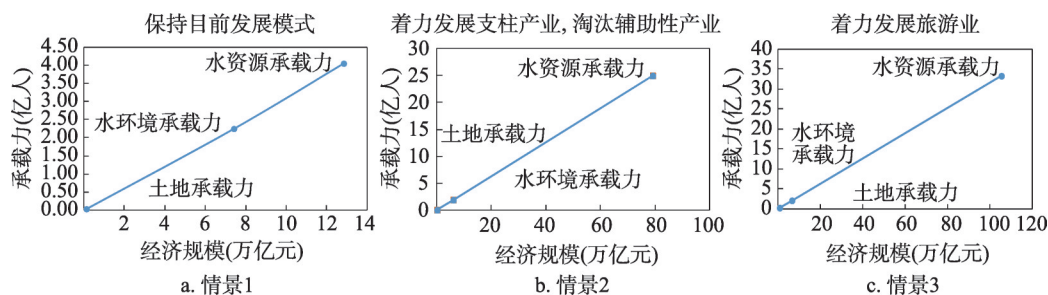


图3 各发展情景下西藏资源环境承载力

Fig. 3 RECC of different development scenarios in Tibet

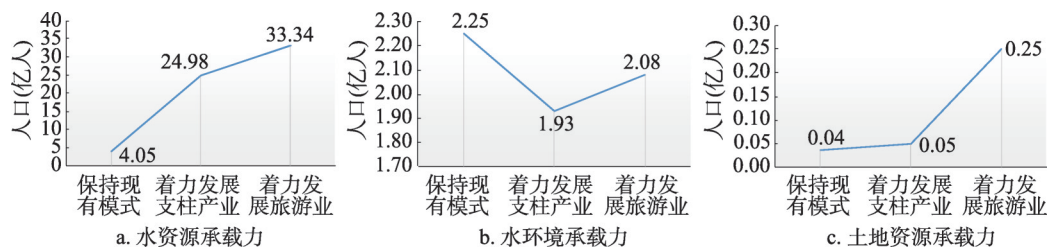


图4 各发展情景下西藏资源环境承载力对比

Fig. 4 Comparison of RECC under various scenarios in Tibet

## 5 讨论

### 5.1 模型的作用

本文所设置的西藏产业发展情景不代表官方政策,各项参数未来也会有变化,因此RECC评价结果较之未来实际情况会有偏差。通常模型输出结果的相对分布更具意义,而非其绝对值<sup>[45-46]</sup>。对比不同发展情景RECC的差异,可辅助产业结构调整并控制总的发展规模。此外,本文构建的系统化的RECC评价方法,可为RECC评价研究提供参考。

### 5.2 产业权重

根据产业对区域经济系统的作用评价产业的权重,确定支柱产业、一般性产业和辅助性产业。产业的重要性评价可以是经济发展优先,也可以是资源环境友好导向,不同

的学者会观点不同,评价指标的选择及评价结果会有差异。本文所构建的分析框架关注于社会经济与资源环境相互作用关系,其有效性和辅助政策的作用不会改变,可为不同地区RECC评价研究提供方法上的参考。

### 5.3 产业间相互影响及规模效应

不同产业间会相互影响,一个产业的发展对其他产业有着带动或推动作用。本研究在产业结构情景设置中,考虑的是产业的取舍(例如重点发展支柱产业、淘汰辅助性产业),而产业之间存在相互作用,例如支柱产业的发展会带动其他产业增长,而其他产业的增长同样会在某种程度上推动支柱产业发展。因此该过程是一个循环作用的过程,在评价方法上,需要采用递归算法模拟该过程,这也将使得评价方法进一步复杂化。

此外由于规模效应的存在,随着经济规模的增加,资源利用效率会增加,资源投入与产出比例将缩小,因此产业在发展过程中资源利用强度、污染排放强度均会有所变化。而本文对于规模效应的影响未做考虑。为实现精细化评价,以提高评价结果的准确性,需要甄别产业在不同的规模时的资源环境效应。

### 5.4 产业空间配置优化

限于数据的获取,本文在西藏自治区尺度开展了案例研究。但资源数量与环境容量在空间上是异质的,不同的子区域(如各地区)的社会经济系统不同,对应于不同的资源环境效应。在进一步获取更细尺度数据(例如各地市或地区)基础上可以评价各子区域的资源环境承载力,同时结合土地、水资源分布,河流的走向,可辅助实现产业优化布局。例如将产业布局于资源丰富、水环境容量更大的区域,减少超载或资源环境压力较大的地区的产业。

## 6 结论

资源环境承载力是典型的社会与资源环境耦合系统,本文所构建的资源环境承载力综合分析框架聚焦于人类活动与资源环境的相互作用过程,将社会经济活动与资源消耗及污染排放很好的关联,在有限的资源数量和环境容量条件下,可通过调整产业结构提升资源环境对社会经济的支撑能力,实现资源利用、环境保护与经济发展平衡。西藏案例应用揭示了不同发展模式的资源环境承载力。综合西藏地区各种发展情景的评价结果,着力发展旅游业可以较大幅度提升西藏地区资源环境承载力。

本研究强化了社会经济一侧研究,进一步桥接了资源环境承载力理论研究与实践应用,增强了研究方法在决策支撑方面的可操作性。本研究也存在不足之处。分析框架的实现是根据研究区特点选定了特定要素,但资源环境承载力还涉及生态承载力及其他诸多要素。因此,在扩展应用于其他地区时,需根据各地区具体情况建立不同的评价子系统,增强分析框架普适性的同时逐步完善评价体系。

### 参考文献(References)

- [1] Niu Fangqu, Feng Zhiming, Liu Hui. Evaluating methods of regional resources and environment carrying capacity: A review. *Resources Science*, 2018, 40(4): 655-663. [牛方曲, 封志明, 刘慧. 资源环境承载力评价方法回顾与展望. *资源科学*, 2018, 40(4): 655-663.]
- [2] Errington P L. Vulnerability of bobwhite populations to predation. *Ecology*, 1934 15: 110-127.
- [3] Zheng Zhenyuan. Research of potential population carrying capacity of Chinese land. *China Land Science*, 1996, 10(4): 33-38. [郑振源. 中国土地的人口承载潜力研究. *中国土地科学*, 1996, 10(4): 33-38.]
- [4] Dang Anrong, Yan Shouyi, Wu Hongqi, et al. A GIS based study on the potential land productivity of China. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2000, 20(6): 910-915. [党安荣, 阎守邕, 吴宏歧, 等. 基于 GIS 的中国土地生产潜力研究. 生态学报, 2000, 20(6): 910-915.]
- [5] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, You Zhen. Research on land resources restriction on population distribution in China, 2000- 2010. Geographical Research, 2014, 33(8): 1395-1405. [封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的土地资源限制性和限制制度研究. 地理研究, 2014, 33(8): 1395-1405.]
- [6] Shi Yafeng, Qu Yaoguang. The Carrying Capacity of Water Resources and Its Reasonable Use of Urumqi River. Beijing: Science Press, 1992. [施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [7] Gao Yanchun, Liu Changming. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (8): 73-79. [高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析. 水利学报, 1997(8): 73-79.]
- [8] Feng Zhiming, Liu Dengwei. A study on water resources carrying capacity in Jingjinji Region. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 689-699. [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. 自然资源学报, 2006, 21(5): 689-699.]
- [9] Xu Qiang. An exploration of several problems about the analysis of regional mineral resources carrying capacity. Journal of Natural Resources, 1996, 11(2): 135-140. [徐强. 区域矿产资源承载能力分析几个问题的探讨. 自然资源学报, 1996, 11(2): 135-140.]
- [10] Xu Dahai, Wang Yu. Plume footprints analysis for determining the bearing capacity of atmospheric environment. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(6): 1734-1740. [徐大海, 王郁. 确定大气环境承载力的烟云足迹法. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1734-1740.]
- [11] Zeng Weihua, Yang Yuemei, Chen Rongchang, et al. Application of environmental carrying capacity in environmental impact assessment in planning. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(6): 27-31. [曾维华, 杨月梅, 陈荣昌, 等. 环境承载力理论在区域规划环境影响评价中的应用. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(6): 27-31.]
- [12] Qi Yabin. The present situation of resource environmental bearing- capacity research and analysis of its main problems. Natural Resource Economics of China, 2005, 18(5): 7-11. [齐亚彬. 资源环境承载力研究进展及其主要问题剖析. 中国国土资源经济, 2005, 18(5): 7-11.]
- [13] Malthus T R. An Essay on the Principle of Population [1st ed. of 1798]. London: Pickering, 2001.
- [14] Seidl I, Tisdell C A. Carrying capacity reconsidered: From Malthus' population theory to cultural carrying capacity. Ecological Economics, 1999, 31: 395-408.
- [15] Bowen I. Population. Cambridge: Cambridge University Press, 1954.
- [16] Wackernagel M. Land Use: Measuring a Community's Appropriated Carrying Capacity as an Indicator for Sustainability. UBC Task Force on Healthy and Sustainable Communities, Vancouver, 1991.
- [17] Wackernagel M. Using Appropriated Carrying Capacity as an Indicator, Measuring the Sustainability of a Community. UBC Task Force on Healthy and Sustainable Communities, Vancouver, 1991.
- [18] Wackernagel M, Rees B. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Canada, Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [19] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [20] Kitzes J, Wackernagel M, Loh J, et al. Shrink and share: Humanity's present and future ecological footprint. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2008, 363: 467-475.
- [21] Vitousek P M, Ehrlich P R, Ehrlich A H, et al. Human appropriation of the products of photosynthesis. BioScience, 1986, 36(6): 368-373.
- [22] Kitzes J, et al. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. Ecological Economics, 2009, 68 (7): 1991-2007.
- [23] Lou B, Qiu Y H, Ulgiati S. Energy-based indicators of regional environmental sustainability: A case study in Shanwei, Guangdong, China. Ecological Indicators, 2015, 57: 514-524.
- [24] Sutton P C, Anderson S J, Tuttle B T, et al. The real wealth of nations: Mapping and monetizing the human ecological footprint. Ecological Indicators, 2012, 16: 11-22.
- [25] Thebault J, Schraga T S, Cloern J E, et al. Primary production and carrying capacity of former salt ponds after reconnection to San Francisco Bay. Wetlands, 2008, 28(3): 841-851.
- [26] Zhou Y J, Zhou J X. Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity constrained by GDP-PM<sub>2.5</sub>. Ecological Indicators, 2017, 73: 637-652.
- [27] Wei C, Guo Z Y, Wu J P, et al. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying

- capacity in the coastal zones: A case in Nantong. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 93: 51-59.
- [28] Zheng D F, Zhang Y, Zang Z, et al. Empirical research on carrying capacity of human settlement system in Dalian City, Liaoning Province. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(2): 237-249.
- [29] Lockie S, Rockloff S, Helbers D, et al. A conceptual framework for selecting and testing potential social and community health indicators linked to changes in coastal resource management or condition. *Coastal CRC Discussion Paper*, 2005.
- [30] De Jonge V N, Pinto R, Turner R K. Integrating ecological, economic and social aspects to generate useful management information under the EU directives' "ecosystem approach". *Ocean & Coastal Management*, 2012, 68: 169-188.
- [31] Li Tianxiao, Fu Qiang, Peng Shengmin. Evaluation of water and soil resources carrying capacity based on DPSIR framework. *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.]
- [32] 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.]
- [33] 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.]
- [34] 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.]
- [35] Fan Jie, Zhou kan, Wang Yafei. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016), *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.]
- [36] Wang S, Xu L, Yang F L, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 1070-1081.
- [37] Wang W Y, Zeng W H. Optimizing the regional industrial structure based on the environmental carrying capacity: An inexact fuzzy multi-objective programming model. *Sustainability*. 2013, 5(12): 5391-5415.
- [38] 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. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1017-1030.
- [39] Zhang Linbo, Li Xing, Li Wenhua, et al. Human carrying capacity research: Dilemma and reasons. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 889-897. [张林波, 李兴, 李文华, 等. 人类承载力研究面临的困境与原因. *生态学报*, 2009, 29(2): 889-897.]
- [40] Zhou X Y, Lei K, Meng W, et al. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 1462-1472.
- [41] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water (GB 3838-2002). [中华人民共和国生态环境部. 地表水环境质量标准(GB3838-2002). [http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601\\_66497.shtml](http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml) (访问日期2016-06-06.)]
- [42] Ministry of Natural Resources of PRC. General Land Use Planning in Tibet Autonomous Region (2006-2020), 2017. [http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101\\_2324978.html](http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324978.html). (accessed on June 6, 2018). [中国自然资源部. 国土资源部关于西藏自治区土地利用总体规划(2006-2020年). 2017. [http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101\\_2324978.html](http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324978.html). (访问日期2018-06-06.)]
- [43] Leontief W W. *Structure of American Economy, 1919-1929*. Cambridge: Harward University Press, 1941.
- [44] Liu Weidong, Tang Zhipeng, Han Mengyao. The 2012 China Multi-regional Input-Output Table of 31 Provincial Units. Beijing: China Statistics Press, 2018. [刘卫东, 唐志鹏, 韩梦瑶. 2012年中国31省区域间投入产出表. 北京: 中国统计出版社, 2018.]
- [45] Niu Fangqu, Li Jun. Modeling the population and industry distribution impacts of urban land use policies in Beijing. *Land Use Policy*, 2018, 70: 347-359.
- [46] Niu Fangqu, Wang Fang. Modelling urban spatial impacts of land-use/transport policies. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 380-392. [牛方曲, 王芳. 城市土地利用—交通集成模型的构建与应用. *地理学报*, 2018, 73(2): 380-392.]

## Evaluation of resources environmental carrying capacity and its application in industrial restructuring in Tibet, China

NIU Fangqu<sup>1,2</sup>, FENG Zhiming<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geopolitical Setting of Southwest China and Borderland Development, Kunming 650500, China)

**Abstract:** As natural resources are experiencing rapid reduction and the environment is degenerating, resource environmental carrying capacity has attracted more and more attention in China. However, current research on resource environmental carrying capacity still stays at theoretical level leaving the gap with applications. Moreover, the study conclusions are usually not of policy implications and lack of operability. This study develops a comprehensive analytical framework for the co-development of industries, population, economy, resources and environment. The framework first evaluates the importance of all industries to local social economy and determines the direction of industrial structure adjustment, and then identifies the interaction relationships among the socioeconomic development, resource consumption and environment emission, and subsequently evaluates the resource environmental carrying capacity, which helps achieve the maximum socio-economic development under the premise of environmental protection and efficient resource utilization. The Tibet case study estimates the local resource environmental carrying capacity under different development scenarios and therefore determines the maximum population and economic scale through industrial structure adjustments under the constraints of resource and environment. The results show that to focus on the development of tourism can significantly improve the resource environmental carrying capacity of Tibet. The results could help make decision regarding local industrial structure adjustments to achieve sustainable development. In conclusion the proposed analytical framework provides an operational decision support tool for "socio-ecological" sustainability. It can be extended to other regions through minor parameter adjustments.

**Keywords:** resource environmental carrying capacity (RECC); industrial structure; evaluation method; sustainable development; Tibet