

DOI: 10.5846/stxb201311302853

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.

Yu G H, Sun C Z. Land carrying capacity spatiotemporal differentiation in the Bohai Sea Coastal Areas. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4860-4870.

环渤海沿海地区土地承载力时空分异特征

于广华, 孙才志*

辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029

摘要:沿海地区是中国未来社会经济发展的重点区域, 近年来沿海地区人地矛盾越来越突出, 研究沿海地区土地承载力具有重要意义。针对以往评价中的不足, 采用韦伯-费希纳定律确定指标评价标准; 利用 D-S 证据理论进行主客观综合权重的计算, 运用可变模糊集理论及模型对土地承载力进行综合评价, 并以环渤海沿海地区进行实例分析。研究结果表明, 2000—2011 年, 环渤海地区土地承载力整体呈持续上升趋势, 但空间分布差异显著, 天津、唐山、大连、盘锦、青岛、烟台、东营、威海土地承载力相对较高, 锦州、营口、秦皇岛、滨州、潍坊、日照属于中等水平, 沧州、丹东、葫芦岛四市土地承载力相对较低。可变模糊评价模型应用于土地承载力评价, 计算简便, 可操作性强, 评价结果可信度高。

关键词:土地承载力; 韦伯-费希纳定律; 可变模糊评价; D-S 证据合成理论

Land carrying capacity spatiotemporal differentiation in the Bohai Sea Coastal Areas

YU Guanghua, SUN Caizhi*

The center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: The study of land carrying capacity is important for coordinating the development of resources, environment, and the economy. This carrying capacity is an important element in the study of regional sustainable development. Coastal areas have the greatest populations, highest population densities, rich resources, and convenient transportation. As in other coastal countries, the coastal area of China is the most developed part of the country. With the acceleration of urbanization, population and economic activity are strongly agglomerating in these coastal areas, resulting in a series of land use conflicts. With such tremendous growth of the economy and society, the conflict between supply and demand of land resources has become increasingly acute. Unreasonable and excessive use of land resources has caused serious damage to the ecological environment of coastal areas and a degradation of land resources. Study on the land carrying capacity of the Bohai Sea coastal areas has great significance for the sustainable development of the Bohai Sea economic circle. The land resource system is complex and has openness, dynamics, social and other characteristics. Therefore, it is difficult to accurately quantify the population, environment, and socioeconomic development. It is also difficult to quantify limits on the land carrying capacity. However, by constructing an indicator system, we can measure dynamic trends and relative land carrying capacity, thereby guiding land use activities. Land carrying capacity assessment is a comprehensive evaluation that involves multiple factors, including natural, social, economic, technological, and others. These factors are interconnected and place mutual restrictions on each other. Relationships between these factors are complex. There is vagueness and uncertainty, as well as dynamic variability under certain temporal and spatial conditions. To date, studies on land carrying capacity have mostly concentrated on inland and ecologically vulnerable areas. There is little research on land carrying capacity in coastal

基金项目: 教育部人文社会科学重点研究基地项目 (12JJD790032)

收稿日期: 2013-11-30; 修订日期: 2014-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

areas. Further, classification standards of assessment indexes in variable fuzzy assessment are mostly determined with reference to relevant statistical data and existing standards. There is a certain subjectivity and arbitrariness, along with inaccuracies. In view of the limitations of prior studies, this work applied the Weber-Fischna law to determine classification standards of assessment indexes. We also used D-S evidential theory to combine subjective factor weights and objective weights to make integrated weights more reliable and accurate. The variable fuzzy assessment method was used to assess comprehensive land carrying capacity in the Bohai Sea coastal areas. Results for those areas show that the land carrying capacity of seventeen cities from 2000 to 2011 had an upward trend on the whole, along with obvious spatial distribution differences. There were higher land carrying capacities at Tianjin, Tangshan, Dalian, Panjin, Qingdao, Dongying, Yantai, and Weihai. Those capacities at Jinzhou, Yingkou, Qinhuangdao, Binzhou, Weifang, and Rizhao were at a medium level, and those at Cangzhou, Dandong, and Huludao were relatively low. The economic development level had strong effects on land carrying capacity. An appropriate economic scale and structure is conducive to sustainable and intensive land use. Application of the variable fuzzy assessment model to land carrying capacity is characterized by simple calculation, ease of operation, and reliable results.

Key Words: land carrying capacity; Weber-Fischna law; variable fuzzy assessment method; D-S evidential theory

与国际上其它沿海国家一样,沿海地区是中国人口密度最大、经济、科技、文化最发达的地区。沿海地区是中国未来社会经济发展的重点区域,评价沿海地区的承载能力成为保证经济与生态协调发展的基础^[1]。随着沿海地区城市化进程的加快,人口和经济活动在沿海地区高度集聚。在经济社会取得了长足发展的同时,沿海地区也出现了建设用地供需矛盾日益突出、不合理的过度建设利用破坏沿海地区的生态环境、沿海地区各种土地资源严重退化等问题。在这种背景下,对沿海地区土地承载力进行研究具有重要的现实意义。

国外 20 世纪 70 年代以前的土地承载力研究是和生态学结合在一起的。1948 年, Vogot^[2] 首先提出了土地资源人口承载力的概念及计算公式。1949 年英国的 Allan^[3] 提出了以粮食为标志的土地资源人口承载力计算公式,给出了土地资源承载人口的上限。20 世纪 70 年代, Millington 等^[4] 应用多目标决策分析法,从各种资源对人口的限制角度出发,计算了澳大利亚的土地资源承载力。70 年代末,联合国粮农组织在主持的土地资源人口承载力研究,提供了确定土地生产潜力的新途径,即农业生态区域法 (Agricultural Ecology Zone, AEZ)。80 年代,英国科学家 Sleeser^[5] 设计了承载力研究的 ECCO (Evaluation of Capital Creation Options) 模型,即提高承载力的策略模型。1995 年诺贝尔经济学奖得主 Arrow^[6] 在 Science 发表的《经济增长、承载力和环境》对土地承载力进行了系统论述,影响深远。

国内土地承载力研究兴起于 20 世纪 80 年代后期,其中《中国土地资源生产能力及人口承载量研究》^[7] 项目的研究成果最具代表性。目前土地承载力的研究方法主要有系统动力学、生态足迹、投影寻踪、SPA (Set Pair Analysis) 集对分析等。如陈传美等^[8] 建立了土地承载力系统动力学模型,模拟了郑州市土地承载力系统的动态趋势,并提出缓解人地矛盾的若干对策。周金星等^[9] 通过建立土地资源生产潜力和人口数量预测模型以及回归模型方程,以宜宾市为例对长江流域低山丘陵区土地可承载人口及土地承载力进行了估算。许月卿^[10] 运用生态足迹模型计算了北京市的生态足迹和土地承载力。姜秋香等^[11] 提出了基于粒子群优化投影寻踪模型的土地资源承载力评价方法,并以三江平原进行实例研究。南彩艳等^[12] 建立了基于改进 SPA 的水土资源承载力综合评价模型,并对关中地区水土资源承载力进行评价。高洁宇^[13] 提出基于生态环境敏感性的城市土地承载力评估方法,以指导城市建设用地开发。施开放等^[14] 应用耕地生态足迹模型对重庆市的耕地生态承载力供需平衡状况进行了系统的评价。

目前土地资源承载力研究多局限于内陆、生态脆弱地区,对沿海地区土地资源承载力研究成果尚不多见。与一般的土地资源承载力相比,沿海地区土地承载力有其独特的特点。如海岸线及浅海滩涂是沿海地区独有的资源。滩涂是重要的后备土地资源,具有面积大、分布集中、区位条件好、农牧渔业综合开发潜力大等特点,

对沿海地区发展具有重要影响。土地承载力不同于传统的土地人口承载力,土地不仅指耕地,承载对象也不仅是人口数量,还包括社会发展规模、经济技术水平等人类的各种社会经济活动。本文认为土地承载力是指在一定时期,在一定的物质文化生活水平及生产条件下,以土地资源的可持续利用,土地生态系统不被破坏为原则,一个地区的土地所能支持人口、环境和社会经济协调发展的能力或限度。由于土地资源系统是具有社会性、开放性、动态性的复杂巨系统,难以准确定量计算其所能支持的人口、环境和社会经济发展的能力或限度,但可以通过构建指标体系,测度土地承载力的动态变化趋势及相对水平,指导土地开发利用实践活动。

土地承载力评价是一个涉及到多因素的综合评价问题,各因素间关系错综复杂,具有模糊性、不确定性,且在一定时空条件下具有相对性和动态可变性,因此可以应用可变模糊集理论进行土地承载力评价。由于实际用于评价的因素指标评价标准是区间的概念,所以大多数的评价方法将评价标准或参照标准处理成点的形式还存在一定的不足^[15]。应用可变模糊集理论,可以很好地解决评价指标标准为区间形式的评价识别问题^[16]。可变模糊评价应用过程中主要存在两个问题:一是评价标准的确定,目前研究成果较多的是参考相关统计数据 and 已有标准确定分级情况,存在不准确性和不适用性;二是合理地确定评价指标的权重,目前常用的有主观性较强的层次分析法,客观性较强的熵值法,或者将二者简单加权,影响评价结果的可靠性;本文采用韦伯-费希纳定律确定指标评价标准;利用 D-S 证据合成理论将主观性较强的 AHP (Analytical Hierarchy Process) 法和客观性较强的熵值法相结合确定综合权重;应用可变模糊评价模型^[17]对环渤海 17 个沿海城市土地承载力进行评价,并分析其时空分异规律。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 可变模糊评价模型

设有对土地承载力作识别的 n 个样本集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 第 j 个样本的特性用 m 个指标特征值表示 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$, 则样本集可用 $m \times n$ 阶指标特征值矩阵表示: $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 式中 x_{ij} 为样本 x_j 指标 i 的特征值 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)。若样本集依据 m 个指标 c 个级别指标标准特征值进行识别, 则指标标准特征值矩阵为 $Y = (y_{ih})_{m \times c}$ 。式中, y_{ih} 为指标 i 级别 h 的标准特征值 ($h = 1, 2, \dots, c$)。

参照指标标准值矩阵和待评价年份的实际情况确定环渤海沿海地区土地承载力可变集合的吸引(为主)域矩阵 $I_{ab} = ([a_{ih}, b_{ih}])_{m \times c}$ 及范围域矩阵 $I_{cd} = ([c_{ih}, d_{ih}])_{m \times c}$ 。根据环渤海沿海地区土地承载力评价指标 c 个级别的实际情况, 确定吸引(为主)域 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 中相对差异度 $D_A(x_{ij})_h = 1$ 的点 M_{ih} 的矩阵 $M = (M_{ih})_{m \times c}$ 。判断样本特征值 x_{ij} 在 M_{ih} 点的左侧还是右侧, 计算差异度及指标对 h 级别的相对隶属度 $\mu_A(x_{ij})_h$ 矩阵 ($U_h = (\mu_A(x_{ij})_h)$), 建立可变模糊评价模型:

$$u'_{hj} = \left\{ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_A(x_{ij})_h)]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i \mu_A(x_{ij})_h]^p} \right]^{\alpha/p} \right\}^{-1} \quad (1)$$

式中, u'_{hj} 为非归一化的综合相对隶属度, w_i 为指标权重, α 为模型优化准则参数, $\alpha = 1$ 为最小一乘方准则, $\alpha = 2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧氏距离。

由式(1)可得到非归一化的综合相对隶属度矩阵:

$$U' = (u'_{hj}) \quad (2)$$

将式(2)进行归一化处理得到综合相对隶属度矩阵:

$$U = (u_{hj}), \text{ 其中 } u_{hj} = u'_{hj} / \sum_{h=1}^c u'_{hj} \quad (3)$$

根据模糊概念在分级条件下最大隶属度原则的不适用性, 采用级别特征值方法对样本进行级别评价。级别特征值矩阵为:

$$H = (1, 2, \dots, c) \times U \quad (4)$$

级别特征值判断准则公式^[16]为:

$$\begin{cases} 1.0 \leq H(u_0) \leq 1.5, \text{ 归属于 1 级} \\ h - 0.5 < H(u_0) \leq h, \text{ 归属于 } h \text{ 级, 偏 } (h - 1) \text{ 级 } (h = 2, 3, \dots, c - 1) \\ h < H(u_0) \leq h + 0.5, \text{ 归属于 } h \text{ 级, 偏 } (h + 1) \text{ 级 } (h = 2, 3, \dots, c - 1) \\ c - 0.5 < H(u_0) \leq c, \text{ 归属于 } c \text{ 级} \end{cases} \quad (5)$$

级别特征值方法利用全部相对隶属度信息,其评价结果比最大隶属度原则得到的结果更加客观全面,可信度更高。

1.1.2 D-S 证据合成理论

证据理论是由 Dempster^[18-19] 首先提出,并由 Shafer^[20] 进一步发展起来的一种处理不确定性的理论。设 D 为样本空间,函数 $M: 2^D \rightarrow [0, 1]$, 且满足 $M(\Phi) = 0$, $\sum M(A) = 1$, 其中 $A \subseteq D$, 则称 M 是 2^D 上的概率分配函数, $M(A)$ 称为 A 的基本概率数。

命题的信任函数 $Bel: 2^D \rightarrow [0, 1]$, 且 $Bel(A) = \sum M(B)$, 其中 $B \subseteq A$ 。 Bel 函数又称为下限函数, $Bel(A)$ 表示对命题 A 为真的信任程度。

似然函数 $Pl: 2^D \rightarrow [0, 1]$, 且 $Pl(A) = 1 - Bel(\neg A)$, 其中 $A \subseteq D$ 。似然函数的含义是由于 $Bel(A)$ 表示对 A 为真的信任程度, 所以 $Bel(\neg A)$ 就表示对非 A 为真, 即 A 为假的信任程度, 由此可推出 $Pl(A)$ 表示对 A 为非假数理逻辑符号的信任程度。似然函数又称为不可驳斥函数或上限函数。

设 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 是 n 个概率分配函数, 则其正交和 $M = M_1 \oplus M_2 \oplus \dots \oplus M_n$ 为:

$$M(\Phi) = 0$$

$$M(A) = k^{-1} \sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq i \leq n} M_i(A_i) \quad \text{其中: } K = 1 - \sum_{\cap A_i = \Phi} \prod_{1 \leq i \leq n} M_i(A_i) = \sum_{\cap A_i \neq \Phi} \prod_{1 \leq i \leq n} M_i(A_i) \quad (6)$$

D-S 证据理论适用于互补、不确定信息的融合,它能够大量繁杂的主观不确定信息,通过 D-S 证据理论信息融合原理有效地转化为确定性的决策结果。已有研究成果将主客观权重相结合时多采用线性加权法,运用 D-S 证据理论合成不确定的主观权重和确定的客观权重,能提高权重的准确性和科学性。本文采用 D-S 证据合成理论将主观性较强的 AHP 法和客观性较强的熵值法相结合确定综合权重。

1.1.3 韦伯-费希纳定律

德国生理学家韦伯和物理学家费希纳提出韦伯-费希纳定律用于揭示心理量与物理量之间数量关系的定律,可以确定各种感觉阈限和测量刺激的物理量和心理学的关系^[21]。W-F 能够确切表达人体产生的反应量 k 与客观环境刺激量 c 之间的函数关系:

$$c_{ik} = c_{i0} \alpha_i^k \quad (7)$$

近年来,韦伯-费希纳定律逐渐被一些学者引用到环境影响评价研究中^[22-23],考虑到资源环境等对土地承载力的影响类似于环境污染因素对环境质量的影响,本文根据韦伯-费希纳的基本原理,将资源、环境等各项影响因素作为外界刺激强度,进行指标分级。

W-F 定律应用到土地承载力评价中基于以下 3 点假设: c 为影响土地承载力的外部因素即评价指标;把人体产生的反应量 k 视为外部影响因素即评价指标对土地承载力的影响程度; α 为韦伯常数。

对公式(7)两边求差分可得:

$$c_{ik} = c_{i0} \alpha_i^k \quad (8)$$

公式(8)表明当影响土地承载力的外部因素 c 成等比变化时,对土地承载力的影响程度成等差变化。

因此在计算分级标准值时,虽然影响因素各相邻标准级别之间的值成等比变化,但这一影响因素对土地承载力造成的影响程度变化应是等差分级。将 i 指标的等级划分为 5 级, $k=1$ 对应于 c_{i0} 的级别, $k=6$ 对应于 c_{id} 的级别。可知 i 指标任意两级 k, l 之间的客观重要性比率为:

$$c_{ik} = c_{i0} \alpha_i^k \quad (k, l = 1, \cdots, 6)$$

(9)

取 $l=0$, 上式变为:

$$c_{ik} = c_{i0} \alpha_i^k$$

(10)

公式中:

$$\alpha_i = (c_{id}/c_{i0})^{1/6}$$

(11)

式中, α_i 定义为 i 指标相邻两级标准的影响程度比率。

本文运用韦伯-费希纳定律计算环渤海 17 个沿海城市各评价指标的分级标准, 通过研究期间同一指标所有地区数据的最大值与最小值计算相邻两级标准确定分级情况, 具有整体性, 改善了参考相关统计数据 and 已有标准确定评价等级的不足, 提高了分级标准的科学性和合理性。

1.2 数据来源

本文以环渤海沿海地区 17 个沿海城市为研究区域, 数据主要来源于 2000—2012 年间的《中国区域经济统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国城市(镇)生活与价格年鉴》及各省市区统计年鉴和统计公报。

2 研究区概况

环渤海沿海地区是指环绕着渤海全部及黄海的部分沿岸地区而组成的广大经济区域, 与长三角、珠三角一起构成我国沿海经济增长的“三极”, 它与华东、华南沿海地区共同构成中国经济发展的“黄金海岸”^[24]。在行政区上, 它包括 1 个直辖市天津和 16 个地级行政区(辽宁省的丹东、大连、营口、盘锦、锦州和葫芦岛, 河北省的秦皇岛、唐山和沧州, 山东省的东营、滨州、潍坊、烟台、威海、青岛和日照)。环渤海沿海地区是人地矛盾尖锐的典型区域, 近年来在经济快速发展的同时, 城市化进程加快, 生态环境压力增大, 不断膨胀的城市建设用地需求与有限的土地资源矛盾越来越尖锐。研究环渤海沿海地区土地承载力, 对于缓解环渤海沿海地区土地资源的供需矛盾, 实现土地资源和社会经济的可持续发展具有深远的意义。

3 综合评价

3.1 土地承载力评价指标体系及权重

本文遵照选取指标的综合性、系统性、可操作性以及区域特殊性原则, 参考前人的研究成果, 结合环渤海地区实际情况以及当前经济社会发展特点, 从水土资源、生态环境、经济技术及社会 4 个系统进行详细分析, 构建了环渤海沿海地区土地承载力评价指标体系, 并运用 D-S 证据理论科学确定综合权重(表 1)。

表 1 土地承载力评价指标体系及权重
Table 1 Indicator system for land carrying capacity assessment and indicator weight sets

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Indicator layer	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight	D-S 综合权重 D-S comprehensive weight
环渤海沿海地区 土地资源承载力 Land carrying capacity of the Bohai Sea Coastal Areas	水土资源保障 (0.2761)	人均耕地面积 $C_1/(\text{hm}^2/\text{人})$	0.0617	0.0503	0.1031
		粮食自给率 $C_2/\%$	0.0299	0.0314	0.0312
		耕地灌溉率 $C_3/\%$	0.0205	0.0286	0.0195
		人均滩涂面积 $C_4/(\text{m}^2/\text{人})$	0.0068	0.1082	0.0244
		人均建设用地 $C_5/(\text{m}^2/\text{人})$	0.0434	0.0237	0.0342
		人均居住用地 $C_6/(\text{m}^2/\text{人})$	0.0851	0.0301	0.0851
		建筑容积率 $C_7/\%$	0.0141	0.0246	0.0115
		工业用地比例 $C_8/\%$	0.0097	0.0158	0.0051
		人均水资源量 $C_9/(\text{m}^3/\text{人})$	0.0049	0.1192	0.0194

续表

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Indicator layer	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight	D-S 综合权重 D-S comprehensive weight
	生态环境保护 (0.1953)	单位耕地化肥施用量 $C_{10}/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	0.0045	0.0158	0.0024
		环保投资占 GDP 比重 $C_{11}/\%$	0.0064	0.0672	0.0143
		生活垃圾无害化处理率 $C_{12}/\%$	0.0638	0.0111	0.0235
		工业废水排放达标率 $C_{13}/\%$	0.0207	0.0046	0.0032
		工业固废综合利用率 $C_{14}/\%$	0.0139	0.0121	0.0056
		万元 GDP 工业废水排放量 $C_{15}/(\text{t}/\text{万元})$	0.0093	0.0071	0.0022
	经济技术发展 (0.3905)	建城区绿化覆盖率 $C_{16}/\%$	0.0474	0.0124	0.0195
		人均公共绿地面积 $C_{17}/(\text{m}^2/\text{人})$	0.0293	0.0256	0.0249
		人均 GDP $C_{18}/(\text{元}/\text{人})$	0.1203	0.0681	0.2721
		地均 GDP $C_{19}/(\text{万元}/\text{km}^2)$	0.0290	0.0737	0.0710
		GDP 增长率 $C_{20}/\%$	0.0423	0.0143	0.0201
		复种指数 $C_{21}/\%$	0.0613	0.0228	0.0464
		粮食单产 $C_{22}/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	0.0873	0.0119	0.0345
		第一产业占 GDP 比重 $C_{23}/\%$	0.0070	0.0131	0.0030
		第三产业占 GDP 比重 $C_{24}/\%$	0.0096	0.0138	0.0044
		地均固定资产投资 $C_{25}/(\text{万元}/\text{km}^2)$	0.0199	0.0031	0.0020
	社会支撑 (0.1381)	单位建设用地面积 GDP $C_{26}/(\text{万元}/\text{km}^2)$	0.0137	0.0417	0.0190
		人口密度 $C_{27}/(\text{人}/\text{km}^2)$	0.0220	0.0157	0.0115
		人口自然增长率 $C_{28}/(\%)$	0.0043	0.0048	0.0007
		非农业人口比重 $C_{29}/\%$	0.0333	0.0241	0.0267
		城镇居民恩格尔系数 $C_{30}/\%$	0.0486	0.0141	0.0228
		科技教育投入占 GDP 比重 $C_{31}/\%$	0.0062	0.0240	0.0049
		城镇居民人均可支配收入 $C_{32}/\text{元}$	0.0144	0.0272	0.0130
		农村居民人均纯收入 $C_{33}/\text{元}$	0.0094	0.0396	0.0124

3.2 评价指标分级标准

利用韦伯-费希纳拓广定律,结合环渤海地区实际情况,制定各评价指标的分级标准(表 2)。

表 2 评价指标分级标准

Table 2 Classification standards of assessment indexes

指标 Indicator	类型 Type	高 High	较高 Relatively high	中 Medium	较低 Relatively low	低 low
		I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
		Level I	Level II	Level III	Level IV	Level V
C_1	正	>0.29	0.23—0.29	0.18—0.23	0.14—0.18	<0.14
C_2	正	>158	113—158	80—113	58—80	<58
C_3	正	>76	62—76	52—62	43—52	<43
C_4	正	>315	167—315	88—167	47—88	<47
C_5	正	>105	75—105	50—75	35—50	<35
C_6	正	>33	23—33	17—23	12—17	<12
C_7	正	>0.6	0.45—0.6	0.34—0.45	0.25—0.34	<0.25
C_8	正	>36	26—36	18—26	13—18	<13
C_9	正	>1940	970—1940	490—970	250—490	<250
C_{10}	逆	<310	310—420	420—560	560—760	>760
C_{11}	正	>1.7	1.2—1.7	0.7—1.2	0.2—0.7	<0.2

续表

指标 Indicator	类型 Type	高 High	较高 Relatively high	中 Medium	较低 Relatively low	低 low
		I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
		Level I	Level II	Level III	Level IV	Level V
C_{12}	正	>80	65—80	55—65	45—55	<45
C_{13}	正	>95	80—95	50—80	40—50	<40
C_{14}	正	>95	75—95	55—75	40—55	<40
C_{15}	逆	<3	3—8	8—14	14—20	>20
C_{16}	正	>42	35—42	30—35	25—30	<25
C_{17}	正	>16	9—16	5—9	3—5	<3
C_{18}	正	>78000	47000—78000	28000—47000	17000—28000	<17000
C_{19}	正	>4500	2200—4500	1000—2200	500—1000	<500
C_{20}	正	>18	14—18	11—14	9—11	<9
C_{21}	正	>160	140—160	120—140	100—120	<100
C_{22}	正	>6600	5000—6600	3800—5000	2800—3800	<2800
C_{23}	逆	<4	4—6	6—10	10—16	>16
C_{24}	正	>40	32—40	25—32	20—25	<20
C_{25}	逆	<160	160—400	400—1000	1000—2500	>2500
C_{26}	正	>100000	65000—100000	41000—65000	26000—41000	<26000
C_{27}	逆	<280	280—360	360—480	480—640	>640
C_{28}	逆	<0	0—4	4—7	7—10	>10
C_{29}	正	>65	50—65	37—50	28—37	<28
C_{30}	逆	<35	35—40	40—45	45—50	>50
C_{31}	正	>2.5	2—2.5	1.5—2	1—1.5	<1
C_{32}	正	>16000	9600—16000	5800—9600	3500—5800	<3500
C_{33}	正	>10500	7000—10500	5000—7000	3500—5000	<3500

表中正指效益型指标,逆指成本型指标;其中 C_5 人均建设用地、 C_6 人均居住用地、 C_7 建筑容积率、 C_8 工业用地比例,应该属于适度型,但是鉴于《城市用地分类与规划建设用地标准(GB 50137—2011)》的规定、区域土地利用特征及现有资料的缺失,将上述指标归为正指标计算

3.3 评价结果

应用可变模糊评价模型(式(1))计算环渤海沿海地区土地承载力综合相对隶属度,根据综合相对隶属度计算级别特征值(表3)。土地承载力级别特征值代表土地承载力的相对大小,通过级别特征值按照式(5)可以判定土地承载力的评价等级,级别特征值越大,则土地承载力相对越低;按照级别特征值大小可以对评价地区进行排序以及分类,从而更好地评价分析土地承载力的时空分异。

4 环渤海沿海地区土地承载力时空分异分析

4.1 土地承载力时间分异分析

从表3可以看出,环渤海17沿海城市2000—2011年土地承载力级别特征值整体呈减小趋势,各地土地承载力总体上随时间而不断提高,说明各地区在2000—2011年期间,土地资源逐渐向集约、高效方向发展。各地积极编制土地利用总体规划,结合区域特点,严格保护耕地,加强基本农田的保护,统筹安排各类各业用地,不断优化土地利用布局,加强土地集约利用,协调土地利用和生态建设,提高了土地承载力。这主要表现在各地区经济总量逐年增长的同时,土地生产效率也在不断提高。随着经济社会发展、人口不断增长,虽然部分地区人均耕地面积有所减少,但是由于技术进步,粮食单产及粮食自给率不断提高,在一定程度上弥补了耕地减少的不足,提高了土地资源的人口承载力。人均GDP、地均GDP、单位建设用地面积GDP等呈不断增长趋势,说明土地集约利用程度有所加强,土地经济承载力逐年提高。建筑容积率、人均建设用地面积、工业用地比例等波动增长,反映了土地建设规模承载力的提高。各地生态环境保护投入增多、生活垃圾无害化处理

率、工业废水排放达标率等不断提高,人均公共绿地面积有所增加,除个别地区外均达到国家规划标准,使土地生态承载力水平提高。

表 3 环渤海沿海地区土地承载力级别特征值

Table 3 Level characteristic values of land carrying capacity of the Bohai Sea Coastal Areas

地区 Area	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
天津	4.170	4.046	3.939	3.656	3.320	3.085	2.898	2.627	2.384	2.289	2.099	1.884
唐山	4.402	4.342	4.284	4.100	3.811	3.399	3.183	2.981	2.576	2.466	2.224	1.994
秦皇岛	4.579	4.554	4.495	4.495	4.355	4.219	4.112	3.862	3.543	3.546	3.309	3.183
沧州	4.668	4.704	4.747	4.632	4.558	4.358	4.162	4.074	3.853	3.770	3.467	3.261
大连	4.079	3.894	3.709	3.415	3.130	3.031	2.724	2.522	2.169	1.987	1.718	1.509
丹东	4.658	4.603	4.600	4.619	4.551	4.437	4.334	4.181	3.904	3.799	3.491	3.225
锦州	4.479	4.456	4.439	4.529	4.412	4.272	4.182	3.997	3.723	3.614	3.202	2.935
营口	4.677	4.643	4.623	4.561	4.423	4.302	4.049	3.734	3.335	3.153	2.893	2.524
盘锦	3.626	3.548	3.557	3.338	3.194	2.880	2.658	2.474	2.313	2.317	1.969	1.562
葫芦岛	4.833	4.776	4.747	4.720	4.608	4.607	4.560	4.429	4.364	4.343	4.110	3.887
青岛	4.334	4.152	3.995	3.763	3.486	3.267	3.009	2.763	2.407	2.168	1.936	1.693
东营	3.480	3.328	3.198	2.940	2.552	1.939	1.735	1.592	1.458	1.431	1.336	1.344
烟台	4.499	4.404	4.200	4.030	3.723	3.360	3.103	2.840	2.566	2.444	2.129	1.961
潍坊	4.649	4.629	4.590	4.531	4.408	4.314	4.072	3.797	3.424	3.299	3.109	2.936
威海	3.983	3.800	3.563	3.273	3.028	2.966	2.484	2.202	2.116	2.131	1.946	1.806
日照	4.624	4.630	4.558	4.475	4.385	4.287	4.094	3.863	3.534	3.344	3.083	2.860
滨州	4.670	4.644	4.616	4.574	4.441	4.080	3.836	3.413	3.149	3.051	2.876	2.547

决定这种不断提高趋势的根本原因在于经济技术水平的不断提高。经济发展可以使人民生活水平不断提高,土地的投入产出效率也更高。经济发展使政府有更多的资金来改善城市公共基础设施以及公共环境,经济发展也会促进科技进步。技术的发展使土地的生产能力得到提高,如相关的农业种植技术、病虫害防治技术等可以提高土地的粮食产量;由于技术的发展废水废物的排放得到有效处理,减少了对环境的污染、保护了土地生态稳定。随着环渤海沿海地区社会经济的快速发展,也将会对土地承载力提出更高的要求。

4.2 土地承载力空间分异分析

为了更形象地说明环渤海 17 个沿海城市土地承载力的空间分异情况,根据土地承载力级别特征值(表 3),采用模糊迭代自组织聚类算法^[25]将环渤海地区 17 个城市分为 3 类(图 1)。第一类土地承载力相对较高,包括:天津、唐山、大连、盘锦、青岛、烟台、东营、威海。第二类土地承载力中等,包括:锦州、营口、秦皇岛、滨州、潍坊、日照。第三类土地承载力相对较低,包括:沧州、丹东、葫芦岛。

4.2.1 土地承载力相对较高地区

天津、唐山、大连、盘锦、青岛、烟台、东营、威海分别是所属省份沿海发达城市,无论是经济技术水平、生态环境保护力度、土地集约利用程度等均相对较高,土地承载力水平整体相对较高。到 2011 年,以上地区人均 GDP 均大于 70000 元,地均 GDP 也都处于 1 级或 2 级,其中天津、大连、青岛属于 1 级,唐山、盘锦、东营、烟台、

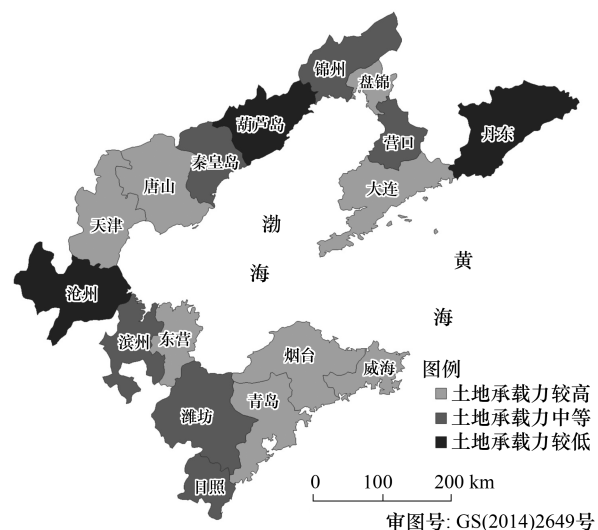


图 1 环渤海沿海地区土地承载力聚类图

Fig.1 the land carrying capacity clustering map of 17 cities in the Bohai Sea Coastal Areas

威海属于 2 级,天津更是高达 9000 万元/km²。近年来生活垃圾无害化处理率均保持在 90% 以上,人均公共绿地面积均达到 2 级,其中威海人均公共绿地面积最高,人均约 25 m²。

天津、唐山、大连、青岛、烟台、威海 6 市人多地少,地理区位优势,经济技术发达,土地集约利用程度较高,在一定程度上弥补了土地资源不足的问题。天津坚持可持续与节约集约利用土地资源,遵循“耕地与基本农田严格保护,城乡建设用地优化整合,基础设施用地合理保障,生态建设和环境保护用地维护养育”的基本原则,不断提高土地资源对经济社会的承载能力。唐山大力推进土地整理复垦,确保补充耕地质量,严格保护耕地,人均耕地面积比较稳定,变化幅度较小,维持在人均 0.11 hm² 左右。唐山是资源型重工业城市,工业用地比例较高,近年着力优化土地空间布局,加大区域土地利用结构调整和建设用地空间管制,加强土地综合整治,打造绿色港口城市,加快由资源型城市向生态型城市的转型。

大连、青岛、烟台、威海 4 市地形以山地丘陵为主,建设用地布局分散,工业用地比例最高数值分别为 22%、24%、23%、30%。第一产业比重较低,大连、烟台、威海低于 10%,青岛已低于 5%。大连对土地进行综合分区,实施差别化的土地利用政策,逐步形成了产业结构合理、分工明确、优势互补的用地格局。青岛确定“环湾保护,拥湾发展”的城市发展战略,按照保护耕地,优先安排农业用地,严格控制各类农业建设规模扩大及保护生态环境的原则调整土地利用结构,统筹安排各业用地,转变土地利用方式,促进了土地资源优化配置和集约利用。烟台优质耕地少,全市三分之二的耕地是中低产田,通过合理调整土地利用结构,保证耕地总量动态平衡,逐步提高耕地质量,粮食单产已由 2000 年的 4480 kg/hm² 提高到 2011 年的 5850 kg/hm²;通过高效利用海岸、科学发展海岛、统筹海陆发展,强化了城市用地的集聚规模和效益。威海市生态环境较好,2011 年建城区绿化覆盖率为 47.6%。威海是一个新兴工业城市,土地利用率高达 95%,但基本农田质量呈下降趋势,复种指数由 173% 下降到 138%;通过加强土地利用的宏观调控和微观管理、实施严格的土地转用和“占补”挂钩制度、强化基本农田保护和加强土地利用环境管理等措施,耕地保护体系初步健全。

盘锦、东营土地资源丰富,人均耕地较充足,2011 年分别为 0.38、0.21 hm²,境内均有广阔的滩涂湿地,油气资源丰富,人均滩涂面积分别达 300、500 m²。盘锦地表水域广阔,土壤肥沃,拥有世界最大的滨海沼泽湿地;辽河三角洲位于盘锦境内,鱼米产量丰富。盘锦是石油化工城市,境内蕴藏着丰富的石油、天然气等矿产资源,石油工矿用地遍布全市。东营位于黄河入海口,滩涂面积 1019 km²,浅海油田及盐矿资源丰富,境内有“东方湿地”之称的黄河三角洲国家级自然保护区湿地生态系统。两市在发展过程中应注意保护耕地,加强土地集约利用,注意环境保护,减少石油开采对土地资源的污染破坏。

4.2.2 土地承载力中等地区

锦州耕地数量多,分布相对集中,耕地占土地总面积的比重为 39.50%,2011 年人均耕地面积为 0.23 hm²,粮食单产 6236 kg/hm²;耕地后备资源充足,多为荒草地和滩涂,水源条件较好,农业基础设施完备,开垦难度小;建设用地效率较高,2011 年单位建设用地面积 GDP 为 74710 万元/km²,处于 2 级。但锦州也存在现有耕地减少过快,局部出现退化,农村居民点及交通用地规模较大等问题。

营口土地利用程度较高,土地利用率达到 90%,但耕地后备资源匮乏,建设用地利用效率总体不高,土地退化和破坏以及海侵现象比较严重。2011 年人均耕地面积为 0.1 hm²,粮食自给率较低为 81.3%,复种指数不到 90%,单位建设用地面积 GDP 为 68000 万元/km² 属于 2 级。营口通过加强耕地保护,发展优质园地,提高了粮食综合生产能力,由 2000 年的 4250 kg/hm² 提高到 2011 年的 6180 kg/hm²;统筹安排各类各区域用地,切实转变用地观念,不断提高了土地资源对经济社会发展的支撑和保障能力。

秦皇岛第三产业比重较高,耕地质量较差,单位耕地化肥施用量高且持续增长,2000 年为 545 kg/hm²,2011 年增加到 928 kg/hm²,加重了对土地的污染;建设用地节约集约利用水平不高,2011 年单位建设用地面积 GDP 为 61700 万元/km²。通过充分贯彻落实“两保一优一统筹”的土地利用战略,逐步构建“三带四田四轴多中心”的土地利用格局,土地利用率和集约利用水平有所提高。

潍坊土地利用率达 90.34%,耕地面积约占土地面积的 50%,2011 年人均耕地面积为 0.19 hm²,但耕地灌

溉率不足 70%,化肥施用量常年在 750 kg/hm^2 上下浮动,耕地保护压力大。潍坊目前正处于新型工业化和城镇化加速发展的进程中,建设用地需求较大,建设用地中居民点及工矿用地约占 85%。潍坊通过统筹城乡土地利用,重点发展北部沿海地区,突出农用地特别是耕地保护,推动集体建设用地使用权流转,提高建设用地集约利用水平,促进土地承载力不断提高。

日照未利用地面积 350.8 km^2 ,约占 6.5%,土地利用率较高;建设用地集约利用水平较高,2011 年单位建设用地面积 GDP 为 106645 万元/km^2 。全市农用地占较大比重,其中耕地面积 2300 km^2 ,占全市土地面积的 43%,但耕地质量呈下降趋势,2000 年至 2011 年粮食单产由 6560 kg/hm^2 降低至 5180 kg/hm^2 。日照应加强对耕地特别是基本农田的保护,保护和提高粮食生产力。

滨州地处黄河三角洲高效生态经济区,区域内土层深厚,土地资源较丰富,农用地比重较大,2011 年耕地面积比例约 48%,人均耕地面积为 0.18 hm^2 ,人均滩涂面积为 117 m^2 ,粮食自给率达 205%。人均建设用地较少,仅 2011 年达到 2 级,为 79.6 m^2 ,其余年份均处于 3 级或 4 级水平。滨州优化调整城乡建设用地结构,动态管理农用地转用计划,将土地资源优势转化为产业优势,按照建设黄河三角洲高效生态经济区的要求,实施生态保育战略,推进土地生态建设,以实现土地资源的可持续利用。

4.2.3 土地承载力相对较低地区

沧州、丹东、葫芦岛在环渤海 17 个沿海城市中属于经济不发达地区,土地集约利用水平较低。2011 年人均 GDP 分别为 35918、36858、23107 元,地均 GDP 分别为 1840、581、625 万元/km^2 。除沧州市外建设用地效率较低,丹东、葫芦岛单位建设用地面积 GDP 分别为 51282、45887 万元/km^2 。三市耕地质量总体偏低,沧州中低产田多、低洼易涝、盐碱重,灌溉条件较差,沧州耕地灌溉率不到 80%,丹东、葫芦岛均低于 40%。生态环境保护力度相对较低,2011 年建城区绿化覆盖率均低于 40%。

沧州耕地面积持续减少,后备资源不足,水资源极其匮乏,人均水资源量仅有 170 m^3 ;开发区、工业园多是先平整后建设,建设速度滞后,土地闲置现象显著;城市和小城镇过度膨胀,造成城区内存在大量闲置土地且利用效率较低。丹东土地利用程度较高,水资源丰富,但可开发利用的其他土地有限,耕地后备资源不足;耕地面积相对较少,耕地面积比例不足 15%。沧州、丹东农村居民点用地过多、利用粗放,应加强农用地及农村居民点整理。葫芦岛局部地区土地退化较严重,土地整治补充耕地难度较大;城乡建设用地布局分散,特殊用地比例大。

5 结语

(1) 指标权重的确定是否合理,直接关系到整个评价体系的科学性,本文改变以往常用的主客观权重线性加权确定综合权重的方法,运用 D-S 证据理论合成客观权重,提高了权重的准确性和科学性。采用韦伯-费希纳定律确定指标评价标准,提高了分级标准的科学性和合理性。运用可变模糊评价模型,对环渤海沿海地区土地承载力进行时空分异综合评价,计算简便,取得了较好的评价效果。

(2) 研究表明,2000—2011 年,环渤海沿海地区土地承载力整体不断提高,但是空间分布差异明显。天津、唐山、大连、盘锦、青岛、烟台、东营、威海土地承载力相对较高,锦州、营口、秦皇岛、滨州、潍坊、日照属于中等水平,沧州、丹东、葫芦岛土地承载力相对较低。

(3) 经济发展水平对土地承载力有重要影响,土地承载力随着社会经济的发展而动态变化,并伴随逐步升高的趋势。适度的经济规模和经济结构有利于土地可持续集约利用。在追求经济效益最大化的同时,应转变经济发展方式,加快产业结构优化和布局调整,保证经济、资源、环境的协调发展,最终达到综合效益最大化,实现环渤海经济区的快速崛起。各地应针对地区实际情况,加强耕地保护,强化耕地质量建设,提高农业综合生产能力;因地制宜改善土地生态环境,统筹安排城乡建设用地,优化土地利用结构,提高建设用地利用效率;沿海地区应积极推进港口、滩涂等资源的开发利用,调整陆域产业布局,实现海陆产业联动发展,坚持陆海统筹,加强海陆一体化开发。

(4) 土地承载力还受其他一些自然资源和环境要素(太阳能、水环境等)的限制和影响,还受到人口流动、政策、地区间贸易等的影响。由于区域间可以自由贸易,一个地区可以在保护耕地资源的同时,充分发挥当地的比较优势,发展与当地的土地资源类型相适宜的产业,而不是必须大力发展农业生产来保障人口对粮食的需求,这更符合当前的社会现实。在海洋的作用下,为了应对海洋的压力,沿海地区土地系统也做出了相应变化(利用海洋资源、防范海洋灾害等),新的土地利用类型在沿海地区不断出现;围海造田等也会改变土地资源的格局。在研究沿海地区的土地承载力时还应更多的考虑海洋开发对海岸地区土地利用的影响。由于资料有限,以上问题本文并未完全考虑到。在以后的研究中应加以综合考虑,建立更为完善的土地承载力综合评价指标体系。

参考文献(References):

- [1] 魏超,叶属峰,过仲阳,刘汉奇,邓邦平,刘星. 海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例. 生态学报, 2013, 33(18): 5893-5904.
- [2] Vogot W. The Way of Subsistence. Chicago: Chicago University Press, 1949: 256-342.
- [3] Allan W. Studies in African Land Usage in Northern Rhodesia, Rhodes Livingstone Papers and No. 15. Cape Town: Oxford University Press, 1949.
- [4] Millington R, Gifford R. Energy and How We Live. Australian UNESCO Seminar, Committee for Man and Biosphere, 1973.
- [5] Slessor M. Enhancement of Carrying Capacity Option ECCO. London: The Resource Use Institute, 1990.
- [6] Arrow K, Bolin B, Costanza R, Dasgupta P, Folke C, Holling C S, Jansson B O, Levin S, Mäler K G, Perrings C, Pimentel D. Economic growth, carrying capacity, and the environment. Science, 1995, 268(5210): 520-521.
- [7] 陈百明. “中国土地资源生产能力及人口承载力”项目研究方法概论. 自然资源学报, 1991, 6(3): 197-205.
- [8] 陈传美,郑垂勇,马彩霞. 郑州市土地承载力系统动力学研究. 河海大学学报:自然科学版, 1999, 27(1): 53-56.
- [9] 周金星,李冬雪,漆良华,张旭东,杨祎. 长江流域低山丘陵区土地承载力评价. 资源科学, 2006, 28(5): 164-170.
- [10] 许月卿. 基于生态足迹的北京市土地生态承载力评价. 资源科学, 2007, 29(5): 37-42.
- [11] 姜秋香,付强,王子龙. 基于粒子群优化投影寻踪模型的区域土地资源承载力综合评价. 农业工程学报, 2011, 27(11): 319-324.
- [12] 南彩艳,栗晓玲. 基于改进 SPA 的关中地区水土资源承载力综合评价. 自然资源学报, 2012, 27(1): 104-114.
- [13] 高洁宇. 基于生态敏感性的城市土地承载力评估. 城市规划, 2013, 37(3): 39-42.
- [14] 施开放,刁承泰,孙秀峰,左太安. 基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究. 生态学报, 2013, 33(6): 1872-1880.
- [15] 陈守煜,胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271.
- [16] 陈守煜,李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型. 水利学报, 2006, 37(4): 431-435.
- [17] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用. 大连:大连理工大学出版社, 2009.
- [18] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. The Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325-339.
- [19] Dempster A P. A generalization of bayesian inference. Journal of the Royal Statistical Society, 1968, 30(2): 205-247.
- [20] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976: 1-150.
- [21] 李祚泳,彭荔红. 基于韦伯-费希纳推广定律的环境空气质量标准. 中国环境监测, 2003, 19(4): 17-19.
- [22] 张宝,刘静玲,陈秋颖,李永丽,林超,曹寅白. 基于韦伯-费希纳定律的海河流域水库水环境预警评价. 环境科学学报, 2010, 30(2): 268-274.
- [23] 李小燕,王菲凤,张江山. 基于韦伯-费希纳定律的湖泊富营养化评价. 水电能源科学, 2011, 29(3): 37-39.
- [24] 孙才志,韩建,高扬. 基于 AHP-NRCA 模型的环渤海地区海洋功能评价. 经济地理, 2012, 32(10): 95-101.
- [25] 孙才志,林学钰. 模糊划分有效性函数的构建与应用. 系统工程理论与实践, 2004, 24(2): 106-110.