

DOI: 10.5846/stxb202110283032

杨秀敏,耿静,徐游,庄海燕,陈文述.基于 TOPSIS 模型的海南岛土地综合承载力时空变化及障碍度诊断.生态学报,2022,42(22):9324-9334.

Yang X M, Geng J, Xu Y, Zhuang H Y, Chen W S. Spatio-temporal change and obstacle degree diagnosis of comprehensive land carrying capacity in Hainan Island based on TOPSIS model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22):9324-9334.

基于 TOPSIS 模型的海南岛土地综合承载力时空变化及障碍度诊断

杨秀敏^{1,2,*}, 耿 静¹, 徐 游², 庄海燕², 陈文述²

1 三亚学院翟明国院士工作站, 三亚 572022

2 三亚学院艺术学院, 三亚 572022

摘要:土地是人类一切活动的根本,是区域经济与社会发展的重要保障。为探讨海南岛土地综合承载能力,依据 2009—2019 年统计数据,采用 TOPSIS 和 GM(1.1)模型从时序角度评价并预测了 2020—2030 年海南岛土地综合承载力,并借助 ArcGIS 软件和障碍度模型对各市县 2015 年、2019 的土地综合承载力进行动态分析及障碍度诊断。结果显示,海南岛土地综合承载力主要受经济与社会子系统的影响,2009—2019 年土地综合承载力水平虽有波动但整体呈缓慢升高趋势,其中水土资源与生态环境子系统贴近度值表现为下降趋势,而经济与社会子系统贴近度值明显升高。预测结果表明 2020—2030 年土地综合承载力呈持续上升趋势。土地综合承载力空间动态变化差异显著,总体表现为沿海市县综合承载力水平高于内陆市县,2015 年与 2019 年处于较高水平的是海口和三亚,处于中等水平的 2015 年为 8 个市县,2019 年达到 11 个市县,处于较低水平的 2015 年为 8 个市县,2019 年只有 5 个市县,并且各市县子系统承载力差异显著。障碍度分析表明,2015 年和 2019 年子系统障碍度最高的是经济子系统,2015 年障碍因子主要有经济密度(X_9)、地均固定资产投资(X_{12})、耕地有效灌溉率(X_6)及人均 GDP(X_8);2019 年障碍因子主要有经济密度(X_9)、地均固定资产投资(X_{12})、人均 GDP(X_8)及复种指数(X_{14})。经济发展水平是制约各市县土地综合承载力的主要障碍因素。研究将为海南岛自由贸易港建设中生态环境与社会经济可持续发展提供科学依据。

关键词:海南岛;土地综合承载力;TOPSIS 模型;GM(1.1)模型;障碍度

Spatio-temporal change and obstacle degree diagnosis of comprehensive land carrying capacity in Hainan Island based on TOPSIS model

YANG Xiumin^{1,2,*}, GENG Jing¹, XU You², ZHUANG Haiyan², CHEN Wenshu²

1 Academician workstation of Zhai Mingguo, University of Sanya, Sanya 572022, China

2 Art Academy, University of Sanya, Sanya 572022, China

Abstract: Land is the foundation of all human activities and important guarantee for regional economic and social development. In order to explore the comprehensive land carrying capacity of Hainan Island, based on the statistical data from 2009 to 2019, the TOPSIS and GM(1.1) models were used to evaluate and predict the comprehensive land carrying capacity of Hainan Island from 2020 to 2030 from time series perspective. In addition, ArcGIS software and obstacle degree model were used to conduct dynamic analysis and obstacle degree diagnosis of the comprehensive land carrying capacity of cities and counties in 2015 and 2019. The results show that the comprehensive land carrying capacity of Hainan Island is mainly affected by the economic and social subsystems. Although the level of comprehensive land carrying capacity fluctuated from 2009 to 2019, it showed a slow upward trend as a whole. The closeness value of water and soil resources and

基金项目:海南省自然科学基金(421MS057); 三亚学院人才引进项目(USYRC19-19); 国家社会科学基金项目(15BJY025)

收稿日期:2021-10-28; **网络出版日期:**2022-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 411909051@qq.com

ecological environment subsystem showed a downward trend, while the closeness value of economic and social subsystem increased significantly. The prediction results show that the comprehensive land carrying capacity shows a continuous upward trend in 2020—2030. There are significant differences in the spatial dynamic changes of the comprehensive land carrying capacity. The overall performance is that the comprehensive carrying capacity of coastal cities and counties is higher than that of inland cities and counties. In 2015 and 2019, Haikou and Sanya were at a high level. Eight cities and counties were at the medium level in 2015, 11 cities and counties in 2019. And 8 cities and counties were at the low level in 2015, while only 5 cities and counties in 2019 and the sub-system carrying capacity of each city and county was significantly different. The analysis of obstacle degree shows that the economic subsystem had the highest obstacle degree in 2015 and 2019. In 2015, the obstacle factors mainly included economic density (X_9), fixed asset investment per land (X_{12}), effective irrigation rate of cultivated land (X_6) and GDP per capita (X_8). In 2019, the main obstacle factors were economic density (X_9), fixed asset investment per land (X_{12}), GDP per capita (X_8) and multiple cropping index (X_{14}). The level of economic development is the main factor restricting the comprehensive carrying capacity of land in cities and counties. This word is expected to provide the scientific basis for ecological conservation and economic sustainable development in the construction process of Hainan Free Trade Port.

Key Words: Hainan Island; comprehensive land carrying capacity; TOPSIS method; GM(1.1) model; obstacle degree

土地是人类一切活动的载体,是人类不可再生的资源^[1]。土地综合承载力在一定程度上反映了城市土地资源利用与社会经济发展的状况,是区域在一定时期内土地资源开发利用、生态环境和社会、经济发展综合能力的体现。当前城市化与社会经济的快速发展下,使本就紧张的土地资源变得更加珍贵,因此,开展土地综合承载力评价及预测有助于定性、定量的研究土地资源、生态环境与社会经济发展之间的关系,同时,科学、客观地评价土地综合承载力也是生态环境与社会经济可持续发展的重要战略。

土地承载力以不仅是“人粮关系”为基础的研究,而是多因素影响下的土地综合承载力研究,其内涵主要体现在各种土地利用类型下,最大限度所承载的人类各种社会与经济活动^[2]。目前对于土地承载力评价的研究大多在评价模型、指标构建和测度分析上,并将评价结果进行等级划分等。国外对土地承载力研究主要围绕人口与粮食间的供求关系方面,强调的承载对象是人口规模,关注的重点是可持续发展及评价指标选择^[3-4]。国内土地承载力的研究主要在评价模型及测度分析等方面。如利用生态足迹理论的^[5-6],有采用状态空间法^[7-8],也有围绕人口、粮食供需平衡及生态服务价值理论等方面开展的土地承载力评价^[9],这些研究基本上都基于土地资源、土地生态与人口之间的平衡关系为研究目标,但随着社会进步,区域经济发展差异,城市化与区域开放性加强,人类对社会经济资源的依赖也不断上升,多种自然资源因素逐渐显露,土地承载力的评价更侧重于土地资源对人口、社会经济及生态环境等综合承载能力的体现。因此,有不少学者采用 PSR 及 DPSIR 模型^[10-12]构建土地综合承载力评价指标体系,也有学者考虑了人口、资源、生态环境及社会、经济等方面的指标^[13-15],并采用不同评价方法,如层次分析法^[15]、可变模糊模型^[16]、熵权—TOPSIS^[17-18]模型等。这些研究主要侧重于土地资源承载力及时空分异评价,而很少对城市差异化土地综合承载力的障碍度进行诊断分析,而不同城市发展水平差异较大,土地综合承载力的障碍度诊断有助于缩小城市间的差异,整体提升土地综合承载力水平。

海南岛地理位置独特自然资源丰厚,是我国重要的生态功能区及国家生态文明试验区。每年都吸引大量的国内外游客来海南度假旅游。特别是近 10 年城市扩张与经济发展加剧了土地利用类型的变化,建筑用地增加迅猛,深刻影响着海南岛的土地资源与生态环境^[19-20],而针对土地综合承载力的研究确鲜有报导,因此,本文从时空角度开展海南岛的土地综合承载力评价,从水土资源、生态环境及社会、经济等方面构建评价指标体系,采 GM(1.1) 模型^[21-22]对 2020—2030 年土地综合承载力进行预测,借助 ArcGIS^[23-24] 软件进行空间承载力动态分析,并通过障碍度诊断,找出土地综合承载力的影响因素,对合理开发利用土地资源,协调社会经济

与生态环境可持续发展提供数据支持。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 区域概况

海南岛位于我国最南部是我国第二大岛屿,地理坐标为 $108^{\circ}37'—111^{\circ}10' E, 18^{\circ}10'—20^{\circ}18' N$,陆地面积约 $3.42 \times 10^4 \text{ km}^2$,地形中间高,周边低,平均海拔 120 m,环岛海岸线长达 1,528 km。海南岛地处热带,属热带季风气候,全年暖热,雨量充沛,平均年降雨量为 1639 mm,干湿季节明显,气候资源多样,见图 1。2019 年统计数据显示:全省年末常住人口 944.72 万人,耕地总面积为 71.3 万 hm^2 ,占总面积的 20%,森林面积 214.1 万 hm^2 ,森林覆盖率为 62.1%,位于全国首位,城市建设用地为 8.7484 万 hm^2 占总面积的 2.4%,国民生产总值 (GDP) 为 5308.93 亿元,其中第三产业占 GDP 比重为 58.95%。

2010 年 1 月,国务院发布了《关于推进海南国际旅游岛建设发展的若干意见》,加速了海南岛开发建设,急速增长的人口迫使海南岛土地开发利用不断增加,2018 年 4 月,海南岛自由贸易港试验区建设推行,确定了海南岛未来一段时期的发展定位。然而海南岛国际化、现代化的开发建设依赖于土地资源,因此,开展海南岛进土地综合承载力评价及预测对海南岛土地资源优化配置及国土空间战略发展定位具有十分重要的意义。

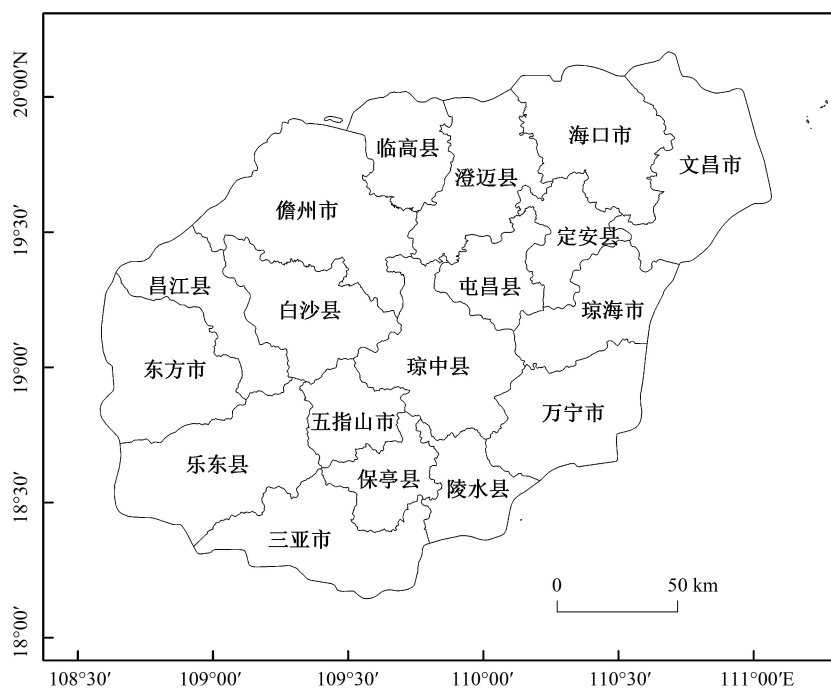


图 1 研究区位置图

Fig.1 The location of the research area

1.2 数据来源

海南岛土地综合承载力评价的基本数据来源于《海南省统计年鉴》,《海南省环境状况公报》,《中国城市统计年鉴》,《海南省水资源公报》,《海南省国民经济与社会发展统计公报》以及各市县的统计年鉴等。

2 研究方法

2.1 土地综合承载力评价指标体系构建

指标的构建是评价研究的基础。土地综合承载力是一个复杂的、综合的系统,它不仅涉及水土资源,也包含社会、经济及生态环境等诸多要素。因此,根据土地综合承载力的相关研究^[13–15],采用频度分析法统计相

关指标的频率,并遵循指标选取的系统性、代表性、综合性和可获取性原则^[16],在结合海南岛的自然情况、区域特征及经济发展基础上,从水土资源承载、经济承载、社会承载和生态环境承载 4 个方面构建了海南岛土地综合承载力评价指标体系。为体现海南岛的发展特征选择了人均生活用水量、人均耕地、土地开发强度等做为水土资源方面的指标,考虑到海南经济发展和产业结构选择了经济密度、第一产业、第三产业占 GDP 比重等经济系统指标,社会承载子系统为常见指标,而在生态环境子系统考虑到海南人口流动特征选择了单位产值生活废水排放及单位 GDP 能耗等指标,见表 1。

表 1 海南岛土地综合承载力评价指标体系及权重

Table 1 Index system for land comprehensive carrying capacity evaluation and weight in Hainan Island

准则层 Rule layer	指标层 Indicator layer	权重 Weight	准则层 Rule layer	指标层 Indicator layer	权重 Weight
水土资源承载 Water and soil resource carrying 0.2437	人均生活用水量(L/人)X ₁	0.0569	经济承载 Economic carrying 0.2701	人均 GDP(万元)X ₈	0.0334
	人均耕地面积(hm ² /万人)X ₂	0.0231		经济密度(万元/km ²)X ₉	0.0322
	人均建设用地面积(km ² /万人)X ₃	0.0400		第一产业占 GDP 比重(%)X ₁₀	0.0273
	土地开发强度(%)X ₄	0.0400		第三产业占 GDP 比(%)X ₁₁	0.0655
	人均粮食产量(kg/人)X ₅	0.0308		地均固定资产投资(万元/km ²)X ₁₂	0.0338
	耕地有效灌溉率(%)X ₆	0.0199		GDP 增长率(%)X ₁₃	0.0494
	城市人均道路面积(m ² /万人)X ₇	0.0331		复种指数(%)X ₁₄	0.0284
社会承载 Social carrying 0.2587	人口密度(人/km ²)X ₁₅	0.0291	生态环境承载 Ecological environment carrying 0.2274	建成区绿化覆盖率(%)X ₂₂	0.0191
	城市化率(%)X ₁₆	0.0223		环境空气优良率(%)X ₂₃	0.0307
	科技、教育占 GDP 比重(%)X ₁₇	0.0606		人均公园绿地面积(m ²)X ₂₄	0.0368
	农村居民人均纯收入(元)X ₁₈	0.0454		森林覆盖率(%)X ₂₅	0.0356
	城镇居民人均可支配收入(元)X ₁₉	0.0383		单位 GDP 能耗(标准煤/万元)X ₂₆	0.0310
	年末城镇登记失业率(%)X ₂₀	0.0204		地均化肥施用量(t/hm ²)X ₂₇	0.0435
	万人拥有医疗技术人员数(人/万人)X ₂₁	0.0426		单位产值生活废水排放(m ³ /万元)X ₂₈	0.0307

2.2 标准化矩阵构建

土地综合承载力评价指标数据中的量纲和单位不统一,为使评价指标具有可比性,必需将指标进行标准化处理。本文采用“min-max 标准化”法,即离差标准化,该方法是对原始数据进行线性变换,使结果落到[0, 1]区间,是较为常用的标准化方法。

2.3 熵值法

权重的计算方法不同会导致评价结果存在一定的差异。权重的确定主要有层次分析法^[15]、均方差决策法^[25]、熵值法^[24]及变异系数法^[26]等。其中熵值法是较为常用的方法,用来判断某个指标的离散程度,离散程度越大,该指标对综合评价的影响越大,该方法赋予的指标权重相对客观,可避免主观赋权对评价结果的影响,计算方法如下:

计算信息熵 E_j :

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (1)$$

计算熵权 W_j :

$$W_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^m (1 - E_j) \quad (2)$$

式中,常数 k 与样本数 n 有关,一般令: $k = 1/\ln n$

2.4 TOPSIS 模型

TOPSIS 模型广泛用于多指标评价研究,是基于理想解的排序法,其原理是通过归一化矩阵,把综合评价的问题转化为各评价对象之间的差异也就是距离,并通过最优、最劣距离计算各指标与理想解之间的贴近度,

是在基于熵值法得到熵权后,构建加权决策矩阵,再确定正负理想解^[27]。

加权规范化矩阵建立 将得到的标准化矩阵与综合权重相乘得到加权规范化矩阵:

$$Z_{ij} = W_j Y_{ij} \quad (3)$$

正负理想解的确定 根据加权规范化矩阵得出正负理想解:

$$Z^+ = \{ \max Y_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \} \quad (4)$$

$$Z^- = \{ \min Y_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \} \quad (5)$$

欧式距离的计算 采用欧式距离计算公式来计算评价对象到正负理想解的距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (7)$$

计算评价对象与最理想解的贴近度:

$$T_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (8)$$

式中, Y_{ij} 为标准化后的矩阵; W_j 为第 j 个指标的权重; Z^+ 、 Z^- 为正、负理想解; D_i^+ 、 D_i^- 为评价对象到正、负理想解的距离; T_i 为贴近度。根据 TOPSIS 模型评价原理,贴近度值越大^[27-28],表明样本离理想解的距离越近,离负理想解的距离越远,即土地综合承载力水平越高,贴近度越小,样本离理想解的距离越远,离负理想解的距离越近,土地综合承载力水平越低。

2.5 灰色预测模型

灰色预测模型是基于单变量、一阶的 GM(1, 1) 模型,是通过灰色关联分析,分析各相关因素对系统的影响程度^[29],通过系统因素之间的发展趋势的相异程度进行关联分析,并进行原始数据生成处理系统变化规律,利用微分方程得到预测模型,再经过精度检验判断模型的合理性和精确性^[30],是目前常用的预测模型,模型表达式如下:

$$X^{(1)}(t+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (9)$$

式中, a 表示发展灰数,反映累加序列与原始序列之间的发展趋势, u 表示内生控制灰数,反映数据间的变化关系, $X^{(0)}$ 为原始序列, $X^{(1)}$ 为一次累加后得到的序列, t 为时间序列, $X^{(1)}(t+1)$ 为累加预测值。

2.6 障碍度模型

障碍度模型用于诊断影响事物发展的障碍因子^[31-32],由因子贡献度 (F_j) 和指标偏离度 I_{ij} 计算得到,计算公式如下:

$$I_{ij} = 1 - Y_j \quad (10)$$

$$O_j = F_j I_{ij} / \sum_{i=1}^n F_j I_{ij} \quad (11)$$

$$Q_j = \sum O_j \quad (12)$$

式中, I_{ij} 为指标偏离度; Y_j 为指标标准化值; F_j 为因子贡献度可用单项指标权重 (W_j) 来表示; O_j 为子系统障碍度; Q_j 为系统障碍度。

3 结果与分析

3.1 海南岛土地综合承载力时间变化分析

3.1.1 海南岛土地综合承载力贴近度

海南岛土地综合承载力评价指标权重见表 1。2009—2019 年海南岛土地综合承载力及子系统贴近度值见表 2,由表 2 可见,2009—2019 年其间海南岛土地综合承载力虽有波动,但整体呈升高趋势,由 2009 年的

0.4131升高到 2019 年的 0.6122,这与海南岛经济与社会发展是分不开的。

水土资源子系统贴适度在研究期内呈波动下降趋势,由 2009 年的 0.5272 升高至 2011 年的 0.6197,之后下降至 2018 年的 0.2540,到 2019 年又增加至 0.5058,水土资源子系统贴适度与人口与经济发展是不可分的。在 2009—2011 年其间虽然人口增加但人均耕地面积、人均粮食产量及人均道路面积等指标均呈正向发展,2012 之后随着人口的不断升高及土地开发强度增大,相关指标呈负向发展,使子系统贴适度值开始下降。2016 年海南省对土地利用进行“有保有控”差别化管理^[33],相继出台了《关于继续落实“两个暂停”政策进一步促进房地产市场健康发展的通知》和《海南省人民政府关于进一步加强耕地占补平衡工作的意见》等文件,加大土地资源保护力度,使 2019 年水土资源子系统贴适度值明显升高。

经济子系统贴适度表现为明显升高,主要受海南岛旅游与房地产业的影响,使经济子系统的各项指标都保持正向发展,尤其在 2009—2010 年其间,贴适度值从 0.1944 上升至 0.4097,但 2011—2013 略有下降,主要是由于 2010 年 GDP 增长率较大,达到 37%,而之后 GDP 增长率大福下降所导致。2013 年之后经济子系统贴适度持续升高,到 2019 年达到 0.6488。

社会子系统贴适度呈平稳增长,从 2009 年的 0.3307 增长至 2019 年的 0.7684,除了人口密度外,其他各项指标都均正向发展,海南岛经济发展直接导致社会系统各项指标正向发展,如城市化率、城镇与农村居民收入,科教支出占 GDP 比重及万人拥有医疗技术人员数等。2014 年和 2019 年有所降低,主要受失业率及科教支出占 GDP 比重这两项指标变化的影响,但总体表现为增长趋势。

生态环境子系统贴适度呈波动下降趋势,由 2009 年的 0.5911 下降至 2019 年的 0.5279。2013 年之前海南生态基础良好各项指标呈正向发展,子系统贴适度达到最大值(0.5988),但随着人口不断增长及城市化建设,空气质量优良率、人均公园绿地面积、地均化肥施用量和单位产值生活废水排放等指标呈负向发展,这些都使生态环境受到影响,由于海南省加强生态环境保护力度,使森林覆盖率及建成区绿化覆盖率保持小幅增长,单位 GDP 能耗不断下降。

表 2 海南岛土地综合承载力贴适度

Table 2 Closeness of land comprehensive carrying capacity in Hainan Island

年份 Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$T_{\text{水土资源承载}}$	0.5272	0.5942	0.6197	0.5732	0.5449	0.4808	0.5813	0.5507	0.4201	0.2540	0.5058
$T_{\text{经济承载}}$	0.1944	0.4097	0.3357	0.3204	0.3780	0.4229	0.4651	0.4968	0.5352	0.5436	0.6488
$T_{\text{社会承载}}$	0.3307	0.3575	0.3513	0.4014	0.4167	0.3854	0.5038	0.5186	0.4915	0.5288	0.7684
$T_{\text{生态环境承载}}$	0.5911	0.5936	0.5808	0.5785	0.5988	0.5583	0.4887	0.5441	0.5221	0.4943	0.5279
T	0.4131	0.4741	0.4609	0.4622	0.4758	0.4556	0.5044	0.5247	0.4934	0.4682	0.6122

T :综合贴适度 Comprehensive closeness; $T_{\text{水土资源承载}}$:水土资源子系统贴适度 Water and soil resource closeness; $T_{\text{经济承载}}$:经济子系统贴适度 Economic closeness; $T_{\text{社会承载}}$:社会子系统贴适度 Social closeness; $T_{\text{生态环境承载}}$:生态环境子系统贴适度 Ecological environment closeness

3.1.2 海南岛土地综合承载力预测分析

依据表 2 中的数据并借助灰色预测模型 GM(1,1),对海南岛 2020—2030 年土地综合承载力进行预测,利用最小二乘法得到预测模型为:

$$X^{(1)}(t+1) = (21.3266)e^{0.0208t} + 20.9135 \quad (13)$$

将 $t = (0, 1, 2, 3, \dots, 10)$ 代入式(13),得到海南岛 2020—2030 年土地综合承载力预测值,见图 2,由图 2 可见,海南岛土地综合承载力呈持续上升趋势,到 2030 年达到 0.6795,为了确保预测结果的精度,对模型进行精度验证,本研究计算了五种精度检验^[34—35]。检验结果见表 3,由表可见模型预测可信度较高,说明预测结果精度较高。

3.2 海南岛土地综合承载力空间分异特征

3.2.1 各市县土地综合承载力分析

为直观说明海南岛各市县土地综合承载力空间动态变化,根据各市县土地综合承载力贴适度值将其进行

等级划分^[18],并采用 ArcGIS 10.2 软件分别绘出 2015 年及 2019 年海南岛各市县土地综合承载力空间分异图,将土地综合承载力划分为 3 个等级,见图 3。由图 3 可见,海南岛各市县土地综合承载力差异显著,呈现出一定的地域性,总体表现为沿海市县明显高于内陆市县,说明经济与社会发展水平是影响各市县土地综合承载力主要因素。

较高承载水平 2015 年和 2019 年贴进度处于较高承载水平只有海口和三亚。这两个市受地理区位的影响,经济发展明显高于其他市县,经济发展水平势必会导致社会发展水平的不断提高,使城市基础设施更加完善,生态环保的资金投入较高,虽然土地资源开发利用规模较大,但土地规划布局更加合理。

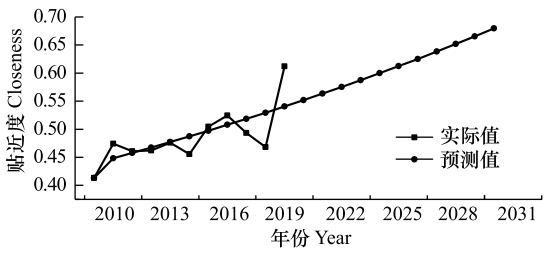


图 2 海南岛土地综合承载力预测

Fig. 2 Predicted of land comprehensive carrying capacity in Hainan Island

表 3 精度检验等级

Table 3 Accuracy inspection level

年份 Year	相对误差 Relative error	关联度 Correlation	均方差比值 Mean square error ratio	小误差概率 Small error probability	绝对误差 Absolute error
数值 Value	0.0445	0.6981	0.4788	>1	2.226%
精度 Accuracy	二级 (<0.05)	四级 (>0.6)	二级 (<0.5)	一级 (>0.95)	97.774%

中等承载水平 2015 年处于中等承载水平的有 8 个市县,2019 年达到 11 个市县,这些市县基本位于沿海地区,受旅游与房地产等行业的影响,这些市县经济发展水平相对高于内陆市县,虽然各别市县经济发展水平较低,但生态基础良好,水土资源和生态环境子系统明显高于经济与社会子系统贴进度值,如五指山、保亭、琼海、万宁及陵水等市县。

较低承载水平 2015 年处于较低承载水平有 8 个市县,而 2019 年只有 5 个市县,分别是定安、屯昌、临高、琼中和白沙。从空间格局来看,2019 年处于较低水平的市县主要在内陆区域,经济与社会发展及弱,如人均 GDP、经济密度、固定资产投资、城镇居民收入及科技、教育支出占 GDP 比重和万人拥有医务人员数等指标均是最低的。各市县的土地综合承载力变化与子系统承载力变化有关。

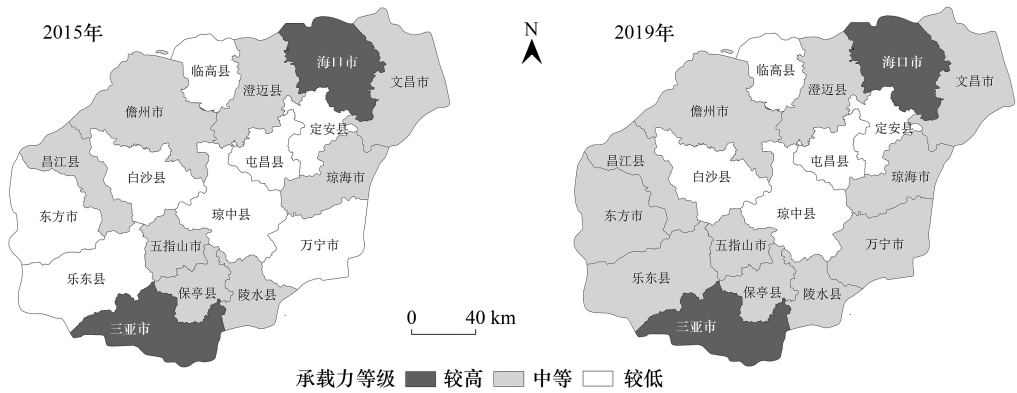


图 3 2015 年、2019 年海南岛土地综合承载力等级分布

Fig.3 Grade distribution of land comprehensive carrying capacity of Hainan Island in 2015 and 2019

3.2.2 各市县子系统贴进度分析

对各市县子系统贴进度进行分析便于了解子系统承载力差异,有利于有针对性的采取相应的投入和措施

加以干预,从而提高子系统承载水平。2015 年、2019 年海南岛各市县子系统贴近度见表 4,由表 4 可见,各市县子系统贴近度差异显著,有些市县水土资源承载与生态环境承载水平较高如五指山、保亭、陵水、乐东等但社会、经济承载相对较低,而社会、经济承载相对较高的市县如海口,其水土资源与生态环境承载水平相对较低。

水土资源子系统 2015 年贴近度最高的是文昌,其次是保亭,这些市县自然资源基础良好,人均耕地面积和耕地有效灌溉率极高,土地开发强度较低,而子系统最低的是海口和儋州。2019 年子系统贴近度最高的是保亭,人均生活用水量和耕地有效灌溉率都显著高于其他市县,而土地开发强度相对较低,子系统最低的仍是海口和儋州。海口为海南省会城市,人口密度较大,使人均耕地面积、人均粮食产量低于其他市县,而土地开发强度高于其他市县,同样儋州人均建设用地及土地开发强度仅低于海口和三亚,并且人均粮食产量及耕地有效灌溉率都低于其他市县。

表 4 海南岛各市县土地综合承载力子系统贴近度

Table 4 Subsystem closeness of land comprehensive carrying capacity in Hainan Island

城市 City	2015 贴近度 Closeness					2019 贴近度 Closeness				
	$T_{\text{水土资源承载}}$	$T_{\text{经济承载}}$	$T_{\text{社会承载}}$	$T_{\text{生态环境承载}}$	T	$T_{\text{水土资源承载}}$	$T_{\text{经济承载}}$	$T_{\text{社会承载}}$	$T_{\text{生态环境承载}}$	T
海口	0.2478	0.7842	0.6791	0.5278	0.6303	0.2015	0.7685	0.6742	0.3688	0.6251
三亚	0.4662	0.6575	0.6678	0.7590	0.6224	0.4343	0.6404	0.7255	0.6773	0.6176
五指山	0.2931	0.2664	0.5180	0.4939	0.3548	0.4786	0.2817	0.5249	0.4825	0.3810
文昌	0.6414	0.1757	0.4128	0.4369	0.3815	0.5145	0.1904	0.4318	0.4524	0.3265
琼海	0.3894	0.2971	0.4320	0.4719	0.3638	0.4926	0.2483	0.4830	0.5065	0.3648
万宁	0.3185	0.2170	0.3737	0.4996	0.3086	0.4128	0.1968	0.3919	0.5212	0.3139
定安	0.3875	0.1545	0.3205	0.3985	0.2737	0.5449	0.1637	0.2883	0.3806	0.2851
屯昌	0.2888	0.1957	0.3026	0.4535	0.2716	0.4171	0.2266	0.2869	0.4249	0.2900
澄迈	0.4492	0.3735	0.3971	0.3720	0.3938	0.4982	0.3410	0.4387	0.2826	0.3777
临高	0.2872	0.1755	0.2273	0.2857	0.2260	0.3929	0.1272	0.2225	0.3607	0.2335
儋州	0.2519	0.2875	0.3873	0.5445	0.3300	0.2478	0.2606	0.3848	0.6137	0.3421
东方	0.4603	0.1333	0.3754	0.2662	0.2711	0.3881	0.1654	0.3661	0.4830	0.3012
乐东	0.3620	0.1353	0.2881	0.3425	0.2439	0.5206	0.1966	0.2687	0.5705	0.3084
琼中	0.2575	0.1485	0.3658	0.4724	0.2693	0.4055	0.1723	0.3936	0.5103	0.2999
保亭	0.4777	0.1586	0.2853	0.7300	0.3238	0.5990	0.1937	0.3162	0.7324	0.3583
陵水	0.4865	0.3625	0.2980	0.5337	0.3927	0.4518	0.3773	0.3033	0.4753	0.3884
白沙	0.2557	0.1317	0.2532	0.6876	0.2610	0.4119	0.1117	0.2946	0.5523	0.2734
昌江	0.3571	0.2039	0.4422	0.4095	0.3120	0.4868	0.1698	0.4478	0.4166	0.3140
极差值 Range	0.3936	0.6525	0.4295	0.4928	0.3864	0.3975	0.6568	0.5030	0.4498	0.3916

经济子系统 2015 年贴近度最高的是海口,其次是三亚和澄迈,海口和三亚受地理位置的影响经济发展一直较为突出,而澄迈是海南的工业重镇,是海南的第三大经济体,这三个市县的人均 GDP、经济密度以及地均固定资产投资等指标明显高于其它市县,子系统最低的是白沙,其次是东方。2019 年子系统贴近度最高的仍是海口,其次是三亚和陵水,陵水虽然只是个县城,但受三亚旅游业与房地产开发的影响使得陵水经济承载子系统贴近度仅低于海口和三亚,而子系统贴近度最低的仍是白沙,其次是临高,经济发展及为落后,人均 GDP、经济密度、地均固定资产投资及复种指数等指标都低于其他市县。

社会子系统 2015 年贴近度最高的是海口、其次是三亚,这两个城市的经济发展水平带动了社会发展水平,子系统中科技教育支出占 GDP 比重、城镇与农村居民收入及万人拥有医疗技术人员数等指标均高于其他市县,子系统贴近度最低的是临高。2019 年子系统贴近度最高的是三亚,其次是海口,最低的仍是临高,主要是临高开发较晚,基础设施不完善,子系统中城镇与农村居民收入、科技教育支出占 GDP 比重及万人拥有医疗技术人员数等指标较低,而人口密度确仅低于海口和三亚,使子系统贴近度最低。

生态环境子系统 2015 年贴近度最高的是三亚,其次是保亭,这两个市县的建成区绿化覆盖率、人均公园

绿地面积高于其他市县,而保亭的森林覆盖率明显高于其它市县,单位 GDP 能耗低于其他市县。其他指标影响不大,子系统贴进度最低的是东方,东方是海南省主要工业城市,矿产资源及为丰富,受环境空气质量、森林覆盖率、单位 GDP 能耗及单位产值生活废水排放等指标的影响使东方的生态环境子系统贴进度值低于其他市县。2019 年子系统贴进度最高的是保亭,其次是三亚,子系统贴进度最低的是澄迈。澄迈是工业老城,建城区绿化覆盖率和空气优良率均低于其他市县,而单位 GDP 能耗与地均化肥用量明显高于其他市县,使子系统贴进度最低。

3.3 海南岛各市县土地综合承载力障碍度分析

3.3.1 子系统障碍度分析

贴进度能反映区域土地综合承载水平,但无法描述土地综合承载力的影响因素,因此,通过障碍度诊断能对各市县土地综合承载力的影响因素进行评判和分析,以便有针对性地提出相应的解决措施,提升土地综合承载力水平。2015 年和 2019 年各市县子系统障碍度见图 4 和图 5。由图 4 和图 5 可见,经济子系统障碍度最高,并且子系统障碍度最高的市县其贴进度往往较低,而障碍度最低的市县其贴进度往往相对较高。

水土资源子系统 2015 年和 2019 年最高的是海口,这与海口的人口密度和土地开发强度等是不可分开的,最低的分别是文昌和保亭;经济子系统 2015 年和 2019 年最高的分别是文昌和保亭,文昌和保亭的经济发展一直落后于其他市县,最低是海口;社会子系统 2015 年和 2019 年最高的分别是陵水和保亭,最低的是海口和三亚;生态环境子系统 2015 年和 2019 年最高的是海口,最低的分别是白沙和保亭。

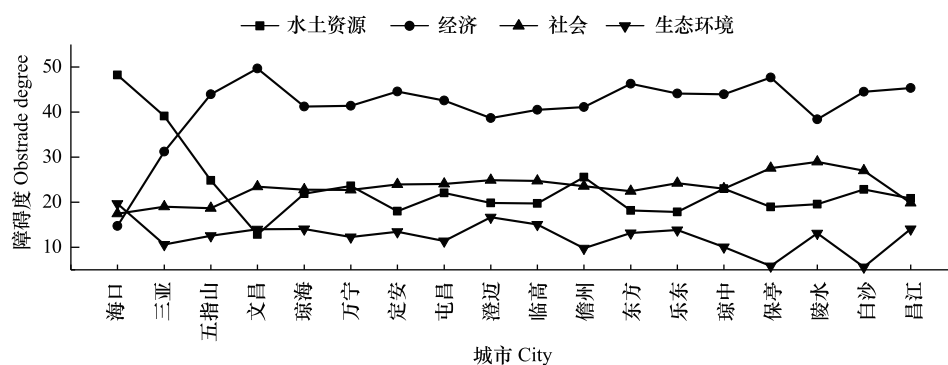


图 4 2015 年海南岛各市县土地综合承载力子系统障碍度

Fig.4 Subsystem obstacle degree of land comprehensive carrying capacity in 2015

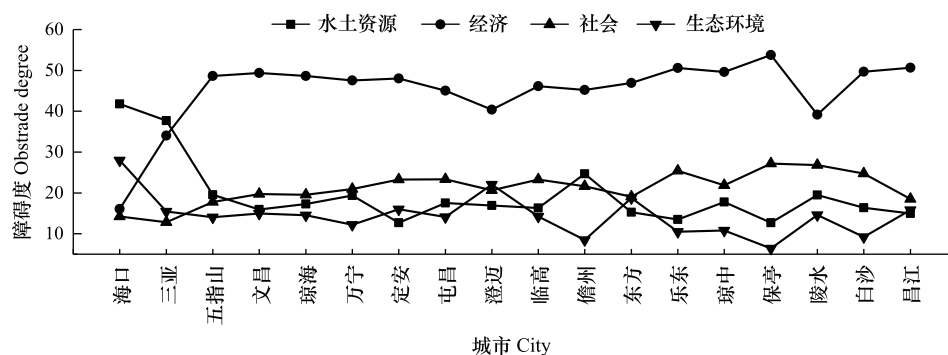


图 5 2019 年海南岛各市县土地综合承载力子系统障碍度

Fig.5 Subsystem obstacle degree of land comprehensive carrying capacity in 2019

3.3.2 障碍因子分析

2015 年、2019 年海南岛各市县土地综合承载力的障碍因子由式(11)计算得到,并列出前 3 名障碍因子,

见表 5。由表可见,2015 年障碍因子出现频次最高的分别是经济密度(X_9)17 次、地均固定资产投资(X_{12})16 次、耕地有效灌溉率(X_6)9 次、人均 GDP(X_8)6 次。2019 年障碍因子频次最高的依次为经济密度(X_9)17 次、地均固定资产投资(X_{12})16 次、人均 GDP(X_8)9 次、复种指数(X_{14})7 次。除了海口与三亚,其他市县经济子系统指标是主要障碍因子。2019 年海口的经济密度与地均固定资产投资分别为 7253 和 4873 万元/ km^2 ,而最低的是白沙只有 267 和 118 万元/ km^2 ,由此可见,各市县经济发展差异较大,说明经济发展水平是制约其土地综合承载力的主要障碍因素。

表 5 海南岛土地综合承载力障碍因子

Table 5 Main obstacle factors of land comprehensive carrying capacity in Hainan Island

城市 City	海口	三亚	五指山	文昌	琼海	万宁	定安	屯昌	澄迈	临高	儋州	东方	乐东	琼中	保亭	陵水	白沙	昌江
2015	X_6	X_9	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}
	X_{14}	X_6	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_6	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9
	X_{17}	X_2	X_8	X_8	X_6	X_8	X_8	X_6	X_{21}	X_6	X_9	X_6	X_8	X_6	X_8	X_{16}	X_6	X_6
2019	X_{14}	X_9	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}	X_{12}
	X_{17}	X_2	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9	X_9
	X_6	X_{14}	X_8	X_8	X_{14}	X_8	X_8	X_8	X_{24}	X_{14}	X_{14}	X_{14}	X_8	X_8	X_8	X_{21}	X_8	X_{14}

4 结论与讨论

4.1 结论

通过 2009—2019 年海南岛土地综合承载力的时空动态变化特征及系统障碍度诊断,得到以下结论:

(1)海南岛土地综合承载力主要受经济与社会子系统的影响,2009—2019 年土地综合承载力水平虽有波动但整体呈缓慢升高趋势,其中水土资源与生态环境子系统贴近度值表现为下降趋势,而经济与社会子系统贴近度值明显升高。预测结果显示 2020—2030 年海南岛土地综合承载力呈持续上升趋势,经五种精度检验该模型预测可信度较高,说明预测结果精度较高。

(2)土地综合承载力空间变化差异显著,总体表现为沿海市县综合承载力水平高于内陆市县,2015 年与 2019 年处于较高水平的是海口和三亚,处于中等水平的 2015 年为 8 个市县,2019 年达到 11 个市县,处于较低水平的 2015 年为 8 个市县,2019 年只有 5 个市县,并且各市县子系统承载力差异显著。

(3)障碍度分析显示经济子系统障碍度最高,并且子系统障碍度最高的市县其贴近度往往是较低的,而障碍度最低的市县其贴近度往往相对较高。2015 年障碍因子出现频次最高的分别是经济密度(X_9)17 次、地均固定资产投资(X_{12})16 次、耕地有效灌溉率(X_6)9 次、人均 GDP(X_8)6 次;2019 年障碍因子频次最高的依次为经济密度(X_9)17 次、地均固定资产投资(X_{12})16 次、人均 GDP(X_8)9 次、复种指数(X_{14})7 次。经济发展水平是制约各市县土地综合承载力的主要障碍因素。

海南岛土地综合承载力评价结果客观真实,评价指标构建适应海南岛的地域及发展特征,评价方法充分体现海南岛不同时期、不同区域的发展差异,反应了水土资源、生态环境与区域社会、经济发展间矛盾关系。预测模型的选择是预测结果可靠性的重要基础,预测结果显示海南岛未来一定时期土地综合承载力的变化,预测精度还有待于进一步的提升。障碍度模型真实反应出土地综合承载力的障碍因子。该方法在今后土地承载力研究中无论是评价指标构建还是评价方法选择都具有一定的借鉴意义和参考价值。

4.2 讨论

研究期内海南省经历了国际旅游岛和自贸港建设两大重要发展变革,经济与社会发展取得了巨大成就,使 2010 年和 2019 年经济子系统贴近度值变化显著,但在 2009—2011 年间经济与社会发展对水土资源与生态环境无明显的影响,2012 年后水土资源子系统首先表现为波动下降趋势,尤其在 2018 年贴近度值仅为 0.2540,虽然一方面受自然降雨量的影响,但主要是由于经济发展对土地资源的高强度利用所导致。而生态

环境是从 2013 年呈现波动下降趋势,2013 年之前海南岛生态环境基础良好,经济发展对生态环境的影响并不显著,但随着经济的不断发展,2013 年之后生态环境子系统有明显下降趋势。本文就海南岛土地综合承载力作客观评述,评价方法可行,但由于评价指标选取存在一定的主观性同时也受数据的限制,而子系统间又存在一定的动态性和关联性,因此,指标选取对评价结果、预测精度和障碍因子会有一定的影响。

海南岛是我国重要的旅游胜地,在国际旅游岛及自贸港建设背景下,深入研究土地综合承载力及其障碍度对海南岛未来一段时期的空间战略发展十分重要。海南岛土地综合承载力评价及预测虽然逐年升高,但不容乐观,各市县应不断优化土地利用布局,强化土地管理,统筹安排各类用地,加强水、土资源的节约利用和农业用水管理,加强生态环境保护方面的资金投入,同时也应重点帮扶经济发展较为落后的市县,缩小子系统贴近度的极差值,整体提升海南岛土地综合承载力水平。

参考文献 (References):

- [1] 程小于, 杨庆媛, 毕国华. 重庆市江津区土地资源承载力时空差异研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2319-2330.
- [2] 赵伟, 姜长军, 李贻学. 杭州市土地资源综合承载力评价及耦合协调性研究. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 345-352.
- [3] Syers J K, Pushparajah E, Hamblin A. Indicators and thresholds for the evaluation of sustainable land management. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(4): 423-428.
- [4] Allan W. The African Husbandman. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1965.
- [5] 张杰, 李清泉, 吴祥茜, 张晨晨, 王敬哲, 鄢国锋. 基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析. 生态学报, 2021, 41(21): 8375-8386.
- [6] 苏子龙, 袁国华, 周伟. 基于生态足迹的 1997—2009 年西安市土地生态承载力评价. 水土保持研究, 2020, 27(3): 226-232.
- [7] 万金彪, 李念春, 周建伟, 赵振华, 彭玉明, 熊靖. 基于组合权-状态空间模型的黄河三角洲地区土地资源承载力评价. 国土与自然资源研究, 2015(4): 18-22.
- [8] 纪学朋, 白永平, 杜海波, 王军邦, 周亮. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. 生态学报, 2017, 37(17): 5861-5870.
- [9] 宫雪, 李玉环, 吕玮, 张军, 刘晓旭, 杨晓. 泰安市粮食耕地人口承载力评价. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 258-261.
- [10] 李念春. 基于 PSR 模型的土壤环境承载力综合评价——以黄河三角洲高效生态经济区为例. 国土资源科技管理, 2016, 33(5): 117-125.
- [11] 何刚, 夏业领, 朱艳娜, 王雯雯. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的安徽省土地承载力评价及预测. 水土保持通报, 2018, 38(2): 127-134.
- [12] 石汝杰. 基于 DPSIR 模型的重庆市土地资源可持续承载力评价. 湖南农业科学, 2015(10): 88-92.
- [13] 游韵, 潘科, 刘斌, 周仲礼. 基于城市差异化的土地综合承载力评价——以四川省为例. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 500-507.
- [14] 何如海, 阮梦雅, 程玉祺, 王其帅. 芜湖市土地资源承载力综合评价研究. 安徽农业大学学报, 2019, 46(3): 471-477.
- [15] 董思, 任志远, 魏倩倩. 生态脆弱区土地综合承载力时空差异分析——以榆林市为例. 水土保持研究, 2017, 24(6): 286-291, 299.
- [16] 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.
- [17] 赵伟, 姜长军, 李贻学. 杭州市土地资源承载力评价及其协调发展. 地球环境学报, 2020, 11(3): 302-315.
- [18] 李洁. 长江经济带土地综合承载力时空分异评价与障碍因子诊断. 华东经济管理, 2019, 33(8): 67-75.
- [19] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [20] 刘采, 张海燕, 李迁. 1980—2018 年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制. 地理科学进展, 2020, 39(4): 567-576.
- [21] 李坦, 王静, 张庆国, 崔玉环, 姚佐文. 合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析. 生态学报, 2019, 39(5): 1735-1747.
- [22] 代磊, 王志杰, 张万胜. 贵阳市 1998—2018 年土地资源承载力分析与预测. 中国农学通报, 2021, 37(1): 108-115.
- [23] 李通, 闫敏, 陈博伟, 张丽, 宋茜茜. 海南岛海岸带土地利用强度与生态承载力分析. 测绘通报, 2020(9): 54-59.
- [24] 李晓蒙, 田孝蓉. 基于 ArcGIS 的河南省土地承载力时空动态变化分析. 国土与自然资源研究, 2021(1): 17-20.
- [25] 鲁春阳, 文枫. 基于均方差法的郑州市土地综合承载力评价. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 20-25.
- [26] 施生旭, 甘彩云. 基于 PSR 模型的生态文明建设评价研究——以安徽省为例. 林业经济, 2016, 38(8): 3-8.
- [27] 郑晶, 于浩, 黄森慰. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的福建省生态环境承载力评价及障碍因素研究. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4391-4398.
- [28] 雷勋平, Robin Qiu, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.
- [29] 魏媛, 吴长勇, 曾昉, 王红林. 喀斯特贫困山区土地资源承载力动态分析与预测. 水土保持研究, 2016, 23(6): 322-326.
- [30] 全江涛, 杨永芳, 周嘉昕. 河南省土地资源承载力时空演变分析与预测. 水土保持研究, 2020, 27(2): 315-322.
- [31] 马勇, 黄智洵. 长江中游城市群生态文明水平测度及时空演变. 生态学报, 2016, 36(23): 7778-7791.
- [32] 岳启蒙, 文倩, 贺奕, 田培, 王纤阳, 鱼京善, 朱占亮. 水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响——以武汉市为例. 生态学报, 2021, 41(14): 5586-5597.
- [33] 陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价. 生态学报, 2021, 41(3): 975-986.
- [34] 段宝玲, 冯强, 刘德军, 卜玉山. 基于灰色 GM(1, 1) 模型的城市人口规模预测——以大同市为例. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2016, 36(1): 35-38, 76.
- [35] 孟展, 张锐, 刘友兆, 钱旭. 基于熵值法和灰色预测模型的土地生态系统健康评价. 水土保持通报, 2014, 34(4): 226-231.