

基于 DPSIR-TOPSIS 模型的安徽省 土地承载力评价及预测

何刚, 夏业领, 朱艳娜, 王雯雯

(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: [目的] 定量评价和预测土地承载力状况并诊断其障碍因子, 为提高安徽省土地承载力提供科学依据, 也为区域土地承载力评价研究提供新思路。[方法] 基于 DPSIR 模型构建了安徽省土地承载力评价指标体系, 运用 TOPSIS 方法与障碍度模型评价和诊断了 2006—2015 年安徽省土地承载力状况和关键障碍因素。基于评价结果, 运用 GM(1,1) 模型预测了未来 5 a 安徽省土地承载力变化趋势。[结果] 2006—2015 年安徽省土地承载力经历了先下降后上升的变化历程; 驱动力、压力、状态子系统承载力均呈先下降后上升的变化态势, 影响和响应子系统承载力呈显著波动变化态势; 未来 5 a, 压力和状态子系统承载力逐年递减, 承载力水平堪忧, 需重点关注; 研究期内工业废水排放量始终是制约安徽省土地承载力水平提高的首要因素, 环境保护投资占 GDP 比重、工业固体废弃物产生量等是重要制约因素。[结论] 虽然安徽省土地承载力水平总体呈上升趋势, 但受压力和状态子系统承载力水平低的限制, 安徽省土地承载力仍处中级水平。

关键词: 土地承载力; DPSIR 模型; TOPSIS 模型; GM(1,1) 模型; 障碍度模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0127-08

中图分类号: X826

文献参数: 何刚, 夏业领, 朱艳娜, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的安徽省土地承载力评价及预测[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 127-134. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 20180309. 001. He Gang, Xia Yeling, Zhu Yanna, et al. Evaluation and prediction of land carrying capacity in Anhui Province based on DPSIR-TOPSIS model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 127-134.

Evaluation and Prediction of Land Carrying Capacity in Anhui Province Based on DPSIR-TOPSIS Model

HE Gang, XIA Yeling, ZHU Yanna, WANG Wenwen

(School of Economics and Management, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] Quantitative evaluation and prediction of land carrying capacity and diagnosis of its obstacle factors were carried out to provide a scientific basis for improving the land carrying capacity of Anhui Province, and also to provide new ideas for the evaluation of regional land carrying capacity. [Methods] Based on the DPSIR model, the evaluation index system of land carrying capacity in Anhui Province was constructed. The TOPSIS method and obstacle degree model were used respectively to evaluate the land carrying capacity and diagnose the key obstacle factors in Anhui Province in the past 2006—2015 years. The GM(1,1) model was used to predict the change trend of land carrying capacity in Anhui Province in the next 5 years. [Results] The results showed that the land carrying capacity of Anhui Province had gone through the change course of first descending and then rising in the past 2006—2015 years which was the same as the pressure and state subsystem, and the influence and response subsystem showed a significant fluctuation trend. In the next 5 years, the carrying capacity of the pressure and the state subsystem will experience decreasing year by year, which will result to a low level of carrying capacity which is needed to be paid attention to. During the study period, the amount of industrial wastewater discharge was always the primary

收稿日期: 2017-11-09

修回日期: 2017-12-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“个体与环境交互作用下煤矿员工安全行为能力评价及动态预警”(51574010); 2017 年度安徽理工大学青年教师科学基金项目(QN2017111); 校级大学生创新项目(2017CX2124)

第一作者: 何刚(1966—), 男(汉族), 安徽省庐江人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态安全评价、决策与咨询等研究。E-mail: hgang0111@163.com.

通讯作者: 夏业领(1993—), 女(汉族), 安徽省六安市人, 硕士研究生, 研究方向为生态安全评价与治理。E-mail: xiayeling@163.com.

factor that restricted the increase of land carrying capacity in Anhui Province. The proportion of environmental protection investment to GDP and the output of industrial solid waste were two important constraints. [Conclusion] Although the level of land carrying capacity of Anhui Province is on the rise generally, limited by the low level of carrying capacity of pressure and state subsystem, the land carrying capacity of Anhui Province is still at an intermediate level.

Keywords: land carrying capacity; DPSIR model; TOPSIS model; GM (1,1) model; obstacle degree model

土地是人类一切经济活动的基础,随着工业化、城镇化进程的逐步加快,粗放型的土地利用方式使得原本稀缺的土地资源不断被侵占、浪费,严重影响并制约社会经济发展。社会经济矛盾、生态矛盾、资源矛盾等多种矛盾的交织叠加对土地资源造成巨大的压力。党的十八大将生态文明建设提升到国家战略高度,使生态安全问题越来越受重视。如何评价土地承载力、找寻并识别影响土地承载力的关键因素成为当前学术界关注的热点问题之一。安徽省土地总面积约 $1.40 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 1.46%。2014 年人均耕地面积 1.13 hm^2 , 低于全国的 1.52 hm^2 , 是我国典型的人多地少的省份之一。本研究以安徽省为例,采用科学的方法评价土地承载力并识别其障碍因素,明确安徽省土地承载力现状,有利于指导安徽省土地资源合理、可持续利用。学术界关于土地的研究成果较多,目前研究主要集中在土地利用绩效评价^[1]、土地整治评价^[2]、土地生态安全状况评价^[3]、土地承载力评价等方面^[4]。相较于土地利用、土地整治等,应更加关注土地承载力研究。因为社会经济发展的同时带来了一系列问题,如建设用地供需矛盾日益突出、污染加剧、环境恶化、土地资源退化等,这都与土地承载力密切相关。学术界将土地承载力定义为在特定时空和特定经济、资源环境下,土地所能持续供养人口的数量以及所能承载的人类各种活动的规模和强度的限度^[5-6]。近年来,学者们对土地承载力的研究取得了丰富的成果。研究的重点主要集中在土地承载力评价方面,研究内容包括土地承载力的定义、土地承载力评价指标体系的构建、土地承载力预测^[7-8]等。研究对象主要集中在城市土地承载力^[9]、区域土地承载力以及特殊地带(沿海地区^[10]、农牧交错带^[5])土地承载力。从研究方法来看,张红等^[4]立足海岛城市舟山市,使用改进的生态足迹模型评价海岛城市土地承载力。张晓娟等^[8]利用熵权 TOPSIS 方法与灰色模型评价和预测三峡库区土地承载力。石岩等^[11]通过构建土地承载力环境安全格局,借助 GIS 技术平台,对山东省威海地区土地承载力进行评估。韩书成等^[7]从水土资源支撑系统、经济技术支撑系统、社会支撑系统和生态环境支撑系统 4 个方面构建了江苏省土地综合承载能力评价指标体系,采用综合评价法评价各县(市)土地综合承载能力。这些研

究不仅丰富了土地承载力的相关理论,同时也为土地资源的整治提供了有力的指导,其不足之处在于:①指标体系的建立忽视了土地承载力演进变化全过程和内在机制;②只是客观测度土地承载力,并未识别制约承载力的障碍因素,不能提出针对性的政策建议;③对土地承载力动态预测较少,且不同方法之间预测结果不便于比较。土地承载力的测度和评价是动态的,且存在诸多复杂性和不确定性,在评价的基础之上进行预测,可以准确把握区域土地承载力未来变化趋势,亦便于相关部门及时掌握土地利用的动态变化并进行监督管理。事实上,在社会发展的不同时期,土地承载力状况也不尽相同,土地承载力评价的目的在于接近土地承载力的最佳状态,远离土地承载力的最劣状态,而 TOPSIS 方法就是测度目标对象与正、负理想解的距离。与其他评价方法相比, TOPSIS 法在指标多少、样本含量和数据分布等方面都没有严格的限制和要求,且能够实现不同评价指标在同一年份之间的横向比较和同一评价指标在不同年份之间的纵向比较^[12]。驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型综合考虑了影响土地承载力的经济、社会、人口、资源、环境等因素,强调了土地承载力演进变化全过程和内在机理,突出了人口、资源、环境之间的耦合关系。鉴于此,本文基于 DPSIR 模型构建安徽省土地承载力评价指标体系,引入熵值法和 TOPSIS 方法实证分析安徽省土地承载力,通过 GM(1,1)模型预测未来 5 a(2016—2020 年)安徽省土地承载力发展状况,最后利用障碍度模型,识别制约安徽省土地承载力提高的障碍因素,为安徽省土地承载力治理提供依据,也为区域土地承载力评价研究提供新思路。

1 安徽省土地承载力评价指标体系构建及数据来源

DPSIR 模型是一种用于表征复杂因果关系的框架,该模型在水资源安全评价^[13]、生态安全评价^[14]、城市可持续发展评价^[15]等方面应用较广,在土地承载力评价方面应用较少。因此,本文将 DPSIR 模型引入土地承载力评价,模型包括 5 个子系统,分别为驱动力子系统(D)、压力子系统(P)、状态子系统(S)、

影响子系统(I)和响应子系统(R)(如图 1 所示)。GDP 增长、城镇化发展、就业人口增加以及推动经济社会发展的各项投资作为驱动因素给土地承载力带来了巨大的压力和挑战,引起土地资源需求的增加,同时带来废水、固体废弃物等污染物排放量的增加。城市人口密度变化是土地利用变化的一种重要的社会驱动力^[16],而不同的土地利用方式会影响土地承载力状况,因此,将城市人口密度指标纳入到压力子系统中。环境污染的加剧、土地资源的过度使用给土地资源带来质和量的变化,人均城市建设用地面积、人均耕地面积、人均土地资源等指标可以直观反映出

土地资源量的变化,量变会产生质变,量变背后反映的是土地资源质的变化。土地资源量的变化会直接影响自然保护区面积、建成区绿化覆盖率、森林覆盖率等指标,这些指标可以反映出土地覆被和被扰动的程度。土地资源质的下降会造成经济损失、人民生活水平下降,甚至因土地污染造成人口的死亡。土地承载力的下降对人民的生命财产造成胁迫,胁迫反馈到经济社会中,通过关键因子的识别,促使人类社会利用技术,减少污染物排放,并通过政策管理全面加强土地承载力的调控,实现经济、社会、人口、资源、环境的协调发展。

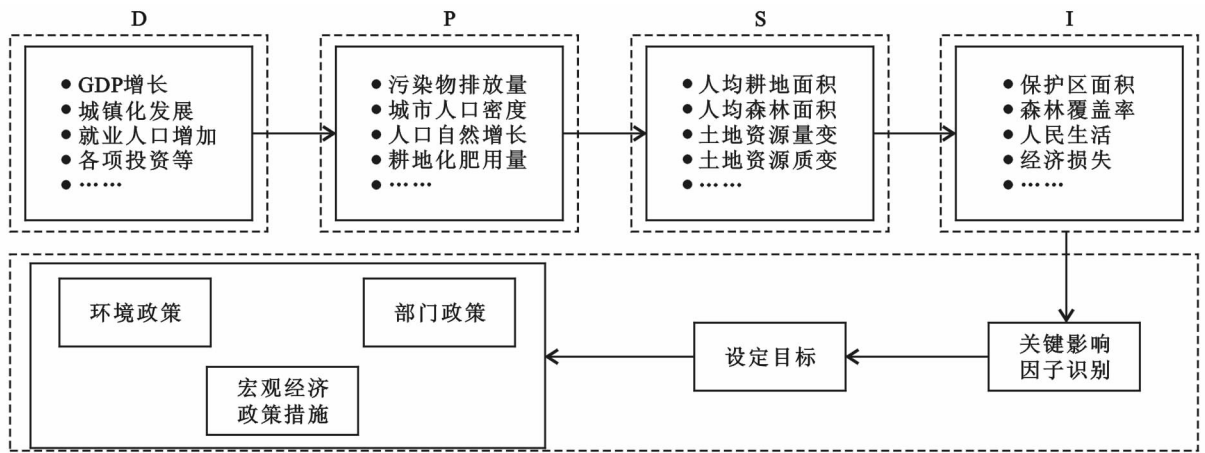


图 1 DPSIR 模型

本文基于 DPSIR 模型并在参考大量有关土地承载力评价的参考文献^[17-19]基础上,考虑到数据的可获得性,力求做到既涵盖统计年鉴直接可查的指标,又涵盖根据年鉴数据计算而成的指标,尽可能体现指标的多样性、综合性和全面性,具体的指标体系详见表 1。由表 1 可知,在 25 个指标中,压力子系统内的各指标权重略高于其余 4 个子系统的指标,其中工业废水排放量指标权重最大,权重为 0.092 3,说明该指标对安徽省土地承载力影响程度最大。影响程度最小的指标是响应子系统内的工业固体废弃物综合利用,权重为 0.020 9,其次是环境保护投资占 GDP 重指标,权重为 0.025 6,说明这两个指标对安徽省土地承载力影响较小。

本文原始数据来源于 2006—2015 年的《安徽省统计年鉴》、《安徽省环境状况公报》、《安徽省国民经济和社会发展统计公报》、《安徽省水资源公报》、《中国国土资源年鉴》,部分指标数据根据安徽省统计年鉴数据及各公报数据计算而成。

2 安徽省土地承载力评价方法

TOPSIS 方法是一种常见的基于多目标的评价

方法,原理是通过测度备选方案评价价值与正理想解和负理想解的相对距离进行排序优选。

2.1 评价指标同趋势化

TOPSIS 法进行评价时,要求所有指标变化方向一致(即所谓同趋势化),一般将低优指标转化为高优指标,转化方法常用倒数法,即令原始数据中低优指标 x_{ij} ,通过 $x'_{ij} = 1/x_{ij}$ 变换而转化成高优指标。对同趋势化后的数据进行归一化,公式为:

$$a_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2} \quad (1)$$

确定正、负理想解 a^+ 和 a^-

$$a^+ = \{\max a_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_m^+\} \quad (2)$$

$$a^- = \{\min a_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_m^-\}$$

计算评价对象各指标值与最优方案及最劣方案的距离 D_j^+ 与 D_j^- :

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (a_i^+ - a_{ij})^2} \quad (3)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (a_i^- - a_{ij})^2}$$

式中: w_i ——第 i 个指标的权重,指标权重采用熵权法^[20]进行确定,熵权法确定指标权重可以避免主观误差。

表 1 安徽省土地承载力评价指标体系

子系统	指标名称	指标性质	指标代码	指标权重
驱动力(D)	地均 GDP/(万元·km ⁻²)	正向	I ₁	0.039 9
	地区生产总值/亿元	正向	I ₂	0.039 9
	城镇化率/%	正向	I ₃	0.030 8
	地均社会消费品零售额/(万元·km ⁻²)	正向	I ₄	0.038 5
	地均就业人数/人	正向	I ₅	0.034 5
	地均固定资产投资/(万元·km ⁻²)	正向	I ₆	0.036 6
压力(P)	工业固体废弃物产生量/10 ⁴ t	逆向	I ₇	0.040 2
	人口密度/(人·km ⁻²)	逆向	I ₈	0.049 9
	人口自然增长率/%	正向	I ₉	0.050 2
	工业废水排放量/10 ⁴ t	逆向	I ₁₀	0.092 3
	城市污水排放量/10 ⁴ m ³	逆向	I ₁₁	0.028 9
	单位耕地面积化肥施用量/(kg·hm ⁻²)	逆向	I ₁₂	0.043 4
状态(S)	人均城市建设用地面积(km ² /人)	正向	I ₁₃	0.033 8
	人均耕地面积(hm ² /人)	正向	I ₁₄	0.059 6
	人均森林面积(hm ² /人)	正向	I ₁₅	0.036 5
	人均土地资源量(km ² /人)	正向	I ₁₆	0.050 5
	人均城市道路面积(m ² /人)	正向	I ₁₇	0.036 5
	人均公园绿地面积(m ² /人)	正向	I ₁₈	0.029 9
影响(I)	自然保护区面积/10 ⁴ hm ²	正向	I ₁₉	0.035 5
	建成区绿化覆盖率/%	正向	I ₂₀	0.025 6
	森林覆盖率/%	正向	I ₂₁	0.053 5
响应(R)	工业固体废弃物综合利用率/%	正向	I ₂₂	0.020 9
	环境保护投资占 GDP 比重/%	正向	I ₂₃	0.025 6
	城镇污水处理厂集中处理率/%	正向	I ₂₄	0.032 6
	生活垃圾无害化处理率/%	正向	I ₂₅	0.034 4

2.2 计算评价对象与最优方案的接近程度即贴适度 T_j

贴适度通常用 T_j 表示,表征评价对象与最优方案的接近程度,取值范围为 $[0,1]$,愈接近 1,表示该评价对象愈接近最优水平。反之,愈接近 0,表示该评价对象愈接近最劣水平,计算公式如下:

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (4)$$

根据鲁春阳等人^[21]的研究,将贴适度 T 划分为 4 个等级,详见表 2。

表 2 土地承载力等级评判标准

贴适度	0.00~0.30	0.31~0.60	0.61~0.80	0.81~1.00
评判等级	低级	中级	良好	优质

2.3 安徽省土地承载力障碍因子诊断模型

对影响安徽省土地承载力的主要障碍因素进行分析与诊断,可以针对性的制定和调整土地资源综合治理的政策。具体方法为:引入因子贡献度 F_i 、指标偏度 C_i 和障碍度 O_i 三个变量。因子贡献度 F_i 表示

单一指标 I_i 对总目标的贡献大小,一般可用各指标权重 w_i 表示;指标偏度 C_i 为各指标实际值与最优目标值之间的差距,可以用 1 与各指标标准化值 r_{ij} 之差表示;障碍度 O_i 的大小可以表示各子系统或指标对土地承载力影响程度的高低,计算公式为:

$$O_i = C_i w_i / (\sum_{i=1}^m C_i w_i) \quad (5)$$

其中: $C_i = 1 - r_{ij}$ 。

3 实证研究

基于 2006—2015 年安徽省土地资源相关数据,以熵值法、TOPSIS 方法、GM(1,1)模型与障碍度模型作为理论基础,实证研究安徽省土地承载力状况。

3.1 土地承载力评价结果与分析

根据公式(1)~(4),测算得到 2006—2015 年安徽省土地承载力及各子系统承载力(图 2)。

3.1.1 综合承载力分析 图 2 显示,2006—2015 年安徽省土地承载力变化趋势相对平缓,具体来看,2006—2009 年安徽省土地承载力呈略微下降态势,

原因是土地供需矛盾突出。由于人口逐年增长,人均资源占有量减少,如人均森林面积,由 2006 年的 $0.094 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降到了 2009 年的 $0.0423 \text{ hm}^2/\text{人}$,下降了 54.9%。2010 年后安徽省土地承载力缓慢上升,由 2009 年的 0.352 21 上升为 2015 年的 0.523 28,增长了 32.6%。该成绩的取得一是得益于节能减排、废物循环利用等科技的进步,提高了资源利用效率,减轻了环境压力,如工业固体废弃物综合利用率由 2006 年的 82% 增加到 2015 年的 88.48%,生活垃圾无害化处理率由 2006 年的 31.4% 增加到 2015 年的 99.6% 等;二是得益于 2010 年后安徽省一系列有关节能减排政策的出台,如《安徽省节约能源条例》、《安徽省土地利用总体规划》等,使得安徽省土地资源利用效率大大提升,进而遏制了人类对包括土地资源在内的自然资源肆无忌惮的索取。虽然安徽省在资源、环境、经济社会等方面取得了较大的突破和进展,但安徽省土地承载力整体水平仍较低,处于中级水平。因此,对安徽省土地承载力的研究仍需投入更多的关注。

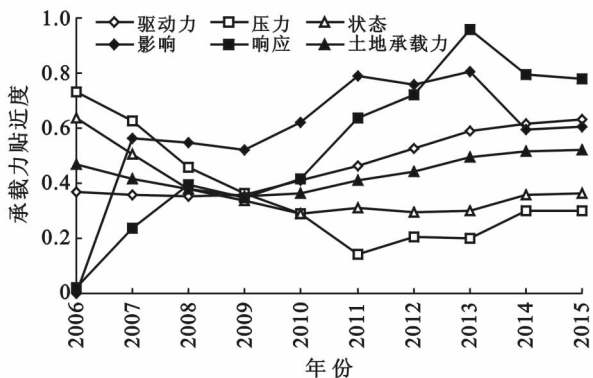


图 2 安徽省土地承载力评价结果

3.1.2 子系统承载力分析 ①驱动力子系统。由图 2 可知,驱动力子系统承载力呈现出和安徽省土地承载力一致的变化趋势,都是先缓慢下降,之后又逐年上升,说明驱动力子系统与土地承载力显著正相关。驱动力子系统承载力由 2006 年的 0.370 55 增加到 2015 年的 0.629 45,实现中级向良好等级的转变。这表明安徽省经济实力在逐渐增强,从宏观层面来说主要得益于一些重大战略机遇,如中部崛起、承接产业转移等,从微观层面来说主要是 2006—2015 年地均 GDP 实现了 260.01% 的增长,城镇化率由 2006 年的 37% 增长到 2015 年的 51%。经济发展在消耗更多土地资源的同时,也带来了巨大的污染。但是,随着经济发展水平达到更高的阶段,势必会提供更先进的技术,提高资源的利用效率,在污染治理、节能减排

等方面也会有更多的受益,这也是驱动力子系统承载力逐年提升的重要原因之一。值得注意的是,2006—2009 年安徽省土地承载力水平高于驱动力子系统承载力水平,2010—2015 年安徽省土地承载力水平低于驱动力子系统承载力水平,但仍然保持逐年上升趋势,这表明,经济社会的发展对安徽省土地承载力的贡献大于其对土地承载力造成的负面影响,为安徽省土地资源承载更多的人类经济活动奠定了良好的基础。②压力子系统。图 2 显示,压力子系统承载力由 2006 年的 0.732 95 下降为 2011 年的 0.141 82,下降幅度大,承载力水平也由良好等级降为低级水平。2012—2015 年,压力子系统承载力略有回升,但是幅度小,2015 年仍处于低级水平。安徽省在发展经济的同时,不可避免的对生态环境造成了不良影响,工业固体废弃物产生量、城市污水排放量、耕地化肥施用量逐年增加,这些污染物直接排放于土地、河流中,给安徽省土地承载力带来了巨大的压力。近年来,随着“大力推进生态文明建设”战略的实施,绿水青山就是金山银山的理念深入人心,压力子系统状况稍有改善,但形式仍不容乐观。③状态子系统。由图 2 可知,2006—2015 年状态子系统承载力经历了先下降后上升的变化历程,2015 年为中级水平。2006—2008 年安徽省土地承载力、驱动力子系统承载力低于状态子系统承载力,2009—2015 年,安徽省土地承载力、驱动力子系统承载力高于状态子系统承载力。这说明,2006—2008 年粗放型经济增长方式对土地造成的不良影响还未完全显现。随着粗放型经济的进一步增长,多年走“先污染后治理”的老路对安徽省土地承载力造成的不良影响加速显现。虽然提高了土地资源的利用效率,改进了节能减排技术,但人类活动对土地资源造成的破坏存量并不是一蹴而就能解决的。近些年,状态子系统承载力状况虽有好转,但仍然面临巨大的挑战。④影响子系统。由图 2 可知,影响子系统承载力波动幅度大,其承载力等级自 2007 年一直维持在中级水平以上,2011—2013 年已达良好等级,并接近优质。这主要是由于自然保护区面积的增加,扩大了区域生态空间,森林覆盖率和建成区绿化面积的增加降低了经济增长对土地资源造成的负面影响。⑤响应子系统。2006—2015 年响应子系统承载力虽显著波动,但总体呈增长态势。由 2006 年的 0.022 74 上升为 2015 年的 0.777 52,增长了 33 倍。2013 年响应子系统承载力为 0.956 22,达到优质等级。从该子系统内部看,工业固体废弃物综合利用率由 2006 年的 82% 增长为 2015 年的

88.48%；环境保护投资占 GDP 的比重由 2006 年的 0.84% 增长为 2015 年的 2%，其中，2013 年环境保护投资占 GDP 的比例为 2.66%，为研究期内最大值，这也是 2013 年响应子系统承载力达到优质水平的原因；城镇污水处理厂集中处理率由 2006 年的 57.5% 增加到 2015 年的 91.8%；生活垃圾无害化处理率由 2006 年的 31.4% 增加到 2015 年的 99.6%，这一个个成绩的取得归功于安徽省对生态建设和环境保护的重视以及各项节能工程的实施。

为了进一步考察 5 个子系统承载力的发展趋势，基于 2006—2015 年的评价结果，根据 GM(1,1) 建模方法，对安徽省 2006—2015 年的土地承载力进行建模，预测未来 5 a(2016—2020 年) 各子系统贴进度。以驱动力子系统为例，运用 GM(1,1) 建模方法构建的模型为：

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(0)}(t+1) &= \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t) = (1 - e^{-a}) \\ \left[X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} &= 0.303e^{0.0862t} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\hat{X}^{(0)}(t+1)$ ——驱动力子系统第 t 年 GM(1,1) 模型所求的贴进度预测值； $\hat{X}^{(1)}(t+1)$ ——驱动力子系统第 t 年 GM(1,1) 模型的时间响应序列； $\hat{X}^{(0)}(t)$ ——驱动力子系统初始值； t ——年份值； a ——发展系数； b ——灰色作用量。

运用模型(6)对 2006—2015 年的安徽省土地承载力贴进度进行预测，将初始值与预测值进行拟合，结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，该模型预测结果与原始值拟合效果良好，利用公式(7)计算初始值与预测值绝对误差：

$$\Delta_t = |a_t - b_t| \quad (7)$$

式中： Δ_t ——第 t 年的绝对误差； a_t ——第 t 年的初始值； b_t ——第 t 年的预测值。计算结果详见表 3，可知预测值平均绝对误差为 1.79%，故该模型预测精度可达 98.21%。

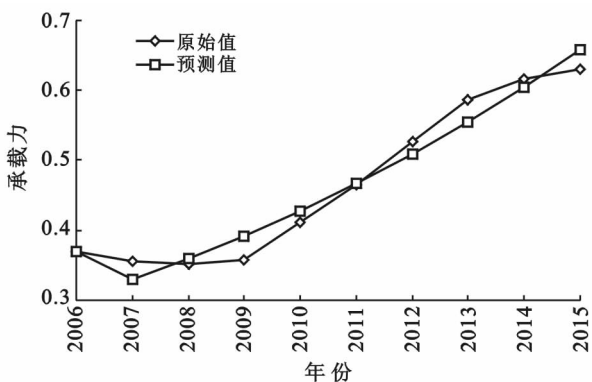


图 3 安徽省土地承载力原始值与灰色预测值拟合趋势

表 3 安徽省土地承载力原始值与灰色预测值的绝对误差

年份	绝对误差	年份	绝对误差
2006	0.000 0	2011	0.000 9
2007	0.026 3	2012	0.018 7
2008	0.008 3	2013	0.033 3
2009	0.034 1	2014	0.012 6
2010	0.016 1	2015	0.028 8

综上所述，模型符合误差和预测要求，可以运用该模型预测安徽省未来 5 a(2016—2020 年) 土地承载力。同理，可以依次建立 GM(1,1) 模型预测驱动力、压力、状态、影响、响应等子系统的承载力，具体预测值详见表 4。结合表 4 可以看出，未来 5 a 驱动力子系统、影响子系统、响应子系统承载力是逐年递增的，且都已达优质水平；压力子系统和状态子系统承载力是逐年递减的，承载力水平堪忧，但安徽省土地承载力是逐年递增的。这说明未来 5 a，虽然安徽省土地承载力个别子系统承载力欠缺，拉低了安徽省土地承载力整体水平，但总体上土地承载力水平稳中向好。安徽省在经济发展、生态建设、资源合理利用等方面取得了较大的突破与进展。未来要重点关注压力子系统和状态子系统，实现 5 大子系统协同发展。

表 4 安徽省土地承载力预测值

年份	驱动力	压力	状态	影响	响应	综合
2016	0.717 5	0.140 1	0.286 1	0.728 9	1.069 6	0.547 1
2017	0.782 1	0.120 9	0.275 4	0.747 1	1.214 4	0.574 2
2018	0.852 5	0.104 3	0.265 0	0.765 8	1.378 8	0.602 7
2019	0.929 2	0.090 0	0.255 0	0.784 9	1.565 4	0.632 6
2020	1.012 9	0.077 7	0.245 5	0.804 5	1.777 3	0.664 0

3.2 安徽省土地承载力障碍度诊断

利用已有数据，根据公式(5)，计算安徽省土地承载力各子系统的障碍度(表 5)和各项指标的障碍度(表 6)。

3.2.1 子系统障碍度 表 5 显示，2006—2015 年 5 个子系统障碍度变化趋势存在一定差异。驱动力子系统障碍度呈先小幅短暂上升，后波动下降的变化特征；压力子系统障碍度波动幅度最大，2011，2013，2014 和 2015 年障碍度分别达到 45.88%，44.84%，41.28% 和 49.60%，且有逐年增加的趋势；状态子系统障碍度基本上经历了上升—下降—上升的变化趋势；影响和响应子系统障碍度呈小幅波动下降趋势，响应子系统障碍度在 2015 年低至 2.85%。从具体数值来看，压力子系统障碍度最大，平均值达到 34.51%，后面依次是状态子系统、驱动力子系统、影响子系统和响应子系统，均值分别为 27.14%，20.22%，9.38% 和 8.76%，表明压力子系统和状态子

系统是制约安徽省土地承载力提高的主要子系统。由此可知,在经济新常态背景下,安徽省要提高土地承载力,应重点关注压力子系统和状态子系统,探索

更加节约、高效的土地利用方式和开发模式,加大生态环境保护力度,从系统论视角促进安徽省土地承载力整体水平提升。

表 5 安徽省土地承载力子系统障碍度

系统	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	%
驱动力子系统	22.56	21.62	25.38	23.03	22.74	18.69	22.82	15.85	17.63	11.86	
压力子系统	25.01	33.82	19.80	21.49	34.54	45.88	28.83	44.84	41.28	49.60	
状态子系统	24.99	25.60	32.94	30.76	23.32	20.88	30.90	29.17	25.44	27.36	
影响子系统	14.23	8.77	11.61	12.26	8.16	5.40	8.53	7.03	9.42	8.34	
响应子系统	13.21	10.19	10.27	12.45	11.24	9.16	8.92	3.10	6.23	2.85	

3.2.2 指标层障碍度 对安徽省 2006 和 2015 年土地承载力障碍度进行计算,按照大小顺序排列出前 8 位障碍因素(表 6)。结合表 6 可以看出,2006 年制约安徽省土地承载力水平的障碍因素分别集中在压力、状态、驱动力和影响子系统,具体障碍因子包括工业废水排放量、人均耕地面积、森林覆盖率、人口自然增长率和城市人口密度、人均土地资源量。而到 2015 年,制约安徽省土地承载力水平的障碍因素分别集中在压力、状态、驱动力和响应子系统,具体障碍因素包括工业废水排放量、人均土地资源量、工业固体废弃物产生量、社会消费品零售额和人均森林面积、城市污水排放量、环境保护投资占 GDP 比重和人均耕地

面积。不论是 2006 年还是 2015 年,工业废水排放量障碍度都排在第一位,结合前文,工业废水排放量指标权重最大,这说明工业废水排放量不仅始终是制约安徽省土地承载力水平提高的首要因素,且最关键。环境保护投资占 GDP 比重权重较小,但障碍度排名却靠前,这表明虽然安徽省环境保护投资逐年增加,但可能由于资金使用缺乏有效管理,投资的产出效益并未充分显现,导致对安徽省土地承载力提升作用不显著。近些年,工业固体废弃物产生量、城市污水排放量等都制约了安徽省土地承载力水平,原因可能是由于部分工业企业的逐利行为,降低了对工业污染物和城市污水的处理力度。

表 6 安徽省土地承载力主要障碍因素排序

年份	项目	指标排序							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2006	障碍因素	I_{10}	I_{14}	I_{21}	I_9	I_8	I_{16}	I_1	I_2
	障碍度/%	8.033 5	7.395 4	6.635 4	6.226 1	6.042 3	5.156 1	4.957 7	4.957 7
2015	障碍因素	I_{10}	I_{16}	I_7	I_4	I_{15}	I_{11}	I_{23}	I_{14}
	障碍度/%	28.345 5	15.538 5	12.357 8	11.861 2	11.226 8	8.892 0	8.335 9	2.851 1

4 讨论与结论

(1) 从土地承载力整体水平看,2006—2015 年安徽省土地承载力经历了先微幅下降(2006—2009 年)、后缓慢上升(2010—2015 年)的阶段历程,总体呈稳中向好态势。

(2) 从各子系统承载力看,2006—2015 年驱动力子系统承载力实现了由中级向良好等级的转变,表明安徽省经济实力在逐渐增强;压力子系统承载力呈现先大幅下降后小幅回升的变化特征,但仍处于低级水平,说明安徽省土地承载力压力形式依然严峻;状态子系统承载力经历了良好—低级—中级的历程,状态子系统承载力状况虽有好转,但仍然面临巨大挑战;影响和响应子系统承载力虽波动幅度大,但总体呈上升趋势,并于 2011 年相继达到良好或优质等级,

是安徽省土地承载力不断上升的重要支撑力。

(3) 未来 5 a(2016—2020 年)驱动力、影响和响应子系统承载力逐年递增,2020 年均达优质水平;压力和状态子系统承载力逐年递减,2020 年均降到了低级水平,承载力水平堪忧。未来需重点提高压力和状态子系统承载力,实现 5 大子系统协同发展。

(4) 工业废水排放量始终是制约安徽省土地承载力提高的首要因素,需重点关注与解决。随着经济社会的发展,工业固体废弃物产生量、人均土地资源量、城市污水排放量、环境保护投资占 GDP 比重均已成为制约安徽省土地承载力提高的新因素,在资源—环境—经济矛盾日渐凸显的压力下,转变经济发展方式,清洁生产、提高固体废弃物综合利用率、节能减排、加大环境保护投资等是提升安徽省土地承载力水平的有效途径。

研究结论表明,提高区域承载力的重点是协调各子系统之间的关系,这与文献^[8]的研究结论一致,但文献^[8]仅评价和预测了研究区的土地承载力,并未诊断制约研究区土地承载力的障碍因素。工业固体废弃物产生量、环境保护投资占 GDP 比重等已成制约土地承载力提高的新因素等研究结论与参考文献^[1,22]的研究结论一致。这也要求安徽省未来需付出更多努力提高土地承载力水平。积极实施十八届三中全会提出的健全自然资源资产产权制度和用途管制制度,划定生态保护红线,实行资源有偿使用制度和生态补偿制度,增加自然保护区和森林等资源保有量。在新常态背景下,贯彻实施供给侧结构性改革,以创新驱动经济发展,加大财政对生态环境保护的投入,拓宽环境保护融资渠道,走新型城镇化道路,建设生态城市。建立障碍因子动态管理体系,借鉴 PDCA 循环管理模式,即计划、实施、检查与改进,结合安徽省土地承载力现状,对影响安徽省土地承载力水平的障碍因子进行监督控制,并通过检查、管理实现持续改进,从而提升安徽省土地承载力水平,构建资源节约型和环境友好型社会。本文在定性分析基础上,通过定量方法综合评价了安徽省土地承载力状况,所得结论基本符合安徽省实际,对安徽省提高土地资源承载力具有一定的理论与现实意义。评价的目的在于识别差距和改善的方向。通过障碍度模型,可以有效识别制约土地承载力提高的障碍因子,为相关政策制定提供理论与实践支撑。运用 GM(1,1)模型对土地承载力的发展态势进行模拟与预测,为调控措施的制定提供方向。但受主客观条件的限制,本文仍存在一些不足,如受数据可得性与连续性影响,指标体系仍有完善空间。本文仅评价了安徽省土地承载力整体状况,并未考虑省内不同市县土地承载力的空间差异,尤其是皖北、皖中、皖南因地理环境差异,区域间土地资源状况差异较大。如何构建符合区域特色又不失一般性的土地承载力评价指标体系,以及区域间的横向对比分析等仍需进一步探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 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[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.
- [2] 曲衍波, 朱伟亚, 鄢文聚, 等. 基于压力—状态—响应模型的土地整治空间格局及障碍诊断[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 241-249.
- [3] 张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于物元分析-DPSIR 概念模型的重庆土地生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3126-3134.
- [4] 张红, 陈嘉伟, 周鹏. 基于改进生态足迹模型的海岛城市土地承载力评价: 以舟山市为例[J]. 经济地理, 2016, 36(6): 155-160, 167.
- [5] 孟庆香, 常庆瑞, 张俊华. 陕北农牧交错带土地承载力及提高途径探讨[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 108.
- [6] 王建洪, 任志远, 苏雅丽. 西安市土地承载力定量评价与动态分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 233-236.
- [7] 韩书成, 濮励杰. 江苏土地综合承载力空间分异研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 146-150.
- [8] 张晓娟, 周启刚. 基于熵权 TOPSIS 和灰色模型的土地承载力评价与预测: 以三峡库区为例[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(6): 666-671.
- [9] 修丽娜. 城市土地承载力分析: 以天津滨海新区为例[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19657-19660.
- [10] 于广华, 孙才志. 环渤海沿海地区土地承载力时空分异特征[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4860-4870.
- [11] 石岩, 于雷, 万军, 等. 基于环境安全格局的威海市土地承载力评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(S2): 213-216.
- [12] 吴一凡, 雷国平, 路昌, 等. 基于改进 TOPSIS 模型的大庆市城市土地利用绩效评价及障碍度诊断[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 85-90.
- [13] 曹琦, 陈兴鹏, 师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1591-1599.
- [14] 徐艺扬, 钱敏蕾, 李响, 等. 基于 DPSIR 的太平湖流域(黄山区)生态安全综合评估[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2015, 54(4): 407-415.
- [15] 黄志烨, 李桂君, 李玉龙, 等. 基于 DPSIR 模型的北京市可持续发展评价[J]. 城市发展研究, 2016, 23(9): 20-24.
- [16] 王静爱, 赖彦斌, 徐伟, 等. NSTEC 土地利用格局的人口密度变化驱动力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 21-28.
- [17] 郭欢欢, 李波, 侯鹰. 基于土地功能的土地资源承载力研究: 以北京市海淀区为例[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 424-427.
- [18] 张博, 韩琳琳, 韩飞. 基于 DPSIR 模型的土地生态安全评价: 基于“一带一路”沿线 18 个省份面板数据[J]. 世界农业, 2017(8): 101-105.
- [19] 李刚, 卢晓宁, 边金虎, 等. 岷江上游土地资源承载力评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 262-268, 331.
- [20] 郭显光. 熵值法及其在综合评价中的应用[J]. 财贸研究, 1994(6): 56-60.
- [21] 鲁春阳, 文枫, 杨庆媛, 等. 基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断: 以重庆市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 535-541.
- [22] 李春燕, 南灵. 陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. 中国土地科学, 2015, 29(4): 72-81.