

# 杭州市土地资源承载力评价及其协调发展

赵伟<sup>1</sup>, 姜长军<sup>2</sup>, 李贻学<sup>2</sup>

1. 杭州师范大学 经济与管理学院, 杭州 311121  
2. 山东农业大学 资源与环境学院, 泰安 271000

**摘要:** 土地资源承载力是区域协调发展的重要指标, 基于驱动力-压力-状态-响应的研究框架构建杭州市土地资源承载力的指标体系, 并运用熵权 TOSPSIS 方法对杭州市 2009—2017 年土地承载力及其各子系统水平进行评价, 同时引用障碍度模型对杭州市土地承载力的障碍因素进行诊断, 最后采用耦合协调模型对杭州市承载力子系统内部的耦合协调性进行了研究。结果表明: (1) 在 2009—2017 年杭州市土地资源承载力的评价结果呈波动上升趋势, 评价年限内土地承载力整体水平处于中级状态, 但距离优质承载力仍有一定的差距; (2) 从 2009 年到 2013 年, 障碍度因素主要集中在驱动力系统和压力系统, 2014—2017 年, 障碍度因素主要集中于状态系统和驱动力系统; (3) 在研究区间内杭州市承载力系统整体的耦合协调度较好, 但距离优质协调仍有不小的差距, 其中承载力系统耦合度总体较高, 除 2009 年处于拮抗级别外, 其他年份均处于高水平耦合级别, 并且在研究年份内各年的耦合度评价结果均高于耦合协调度评价结果, 同时评价区间内系统耦合协调度变化大致呈“初级协调到良好协调再到初级协调”的态势。

**关键词:** 土地资源承载力; 驱动力-压力-状态-响应; 障碍度模型; 耦合协调性

## Evaluation of land resources carrying capacity and its coordinated development in Hangzhou City

ZHAO Wei<sup>1</sup>, JIANG Changjun<sup>2</sup>, LI Yixue<sup>2</sup>

1. School of Economics and Management, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China  
2. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China

**Abstract: Background, aim, and scope** In general, most of the researches on the carrying capacity of land resources are related to the evaluation of the carrying capacity level of regional land resources, but there is a lack of research on the coordinated development of carrying capacity elements. Since the carrying capacity of land resources is a complex system composed of many factors and its coordinated development of internal elements plays an important role in the improvement of land carrying capacity level, in this paper, based on the construction of index system of the carrying capacity of regional land resources, the evaluation research on the coupling coordination of the level and elements of regional land carrying capacity was conducted. **Materials and methods** In this paper, based on the research framework of driving force-pressure-state-response, the index system of carrying capacity of land resource in Hangzhou city was constructed, and the entropy weight TOSPSIS

收稿日期: 2019-04-26; 录用日期: 2019-07-19; 网络出版: 2019-07-24

Received Date: 2019-04-26; Accepted Date: 2019-07-19; Online first: 2019-07-24

通信作者: 李贻学, E-mail: lyxland@163.com

Corresponding Author: LI Yixue, E-mail: lyxland@163.com

引用格式: 赵伟, 姜长军, 李贻学. 2020. 杭州市土地资源承载力评价及其协调发展 [J]. 地球环境学报, 11(3): 302–315.

Citation: Zhao W, Jiang C J, Li Y X. 2020. Evaluation of land resources carrying capacity and its coordinated development in Hangzhou City [J]. Journal of Earth Environment, 11(3): 302–315.

method, obstacle degree model pair and coupling coordination model were used to comprehensively evaluate the carrying capacity of land resources in Hangzhou city. **Results** (1) From 2009 to 2017, the evaluation results of the carrying capacity of land resources in Hangzhou city showed an upward trend of fluctuation. The overall level of the land carrying capacity within the evaluation years was in an intermediate state, but there was still a certain gap from the high quality carrying capacity. (2) From 2009 to 2013, obstacle degree factors were mainly concentrated in the driving force system and the pressure system. From 2014 to 2017, obstacle degree factors were mainly concentrated in the state subsystem and the driving force system. (3) The overall coupling coordination degree of carrying capacity system of Hangzhou city was good within the research range, but there was still a large gap from the high quality coordination. The change of the coupling coordination degree of the system in the evaluation range roughly showed a trend of “primary coordination to good coordination and then to primary coordination”. **Discussion** Although the level of carrying capacity of land resources in Hangzhou city is in the state of fluctuating growth, its carrying capacity level is still in a low state, and there is a large gap from the high quality carrying capacity, so relevant measures should be still taken for adjustment. **Conclusions** During the evaluation years, the coupling degree of the carrying capacity system of land resources in Hangzhou city was at a high level of coupling level, but there was a certain gap between the level of coupling coordination degree of carrying capacity system and the high quality coordination, which shows that the coordination and consistency among each carrying capacity element need to be improved. Therefore, it is necessary to take specific measures to improve the coordinated development between each carrying capacity system, so as to improve the regional carrying capacity. **Recommendations and perspectives** Through the comprehensive evaluation results of the carrying capacity of land resources in Hangzhou city, it can be seen that in order to improve the carrying capacity level of regional land, the coordination between each carrying capacity system should be reached first. Therefore, it is necessary to first pay attention to the regional land planning and promote the coordinated development between each carrying capacity system; control the intensity of land development, optimize the structure of land use, improve the efficiency of land use and increase the economic output of land at the meanwhile; in the current economic development under the new normal, Hangzhou city should give full play to its own characteristics and at the same time give consideration to the green development of the region, through the innovation of science and technology to improve the ecological environment, increase support of environmental protection spending for ecological protection, vigorously play land ecosystem service function, and eventually promote the constant improvement of the level of carrying capacity of the regional land resources.

**Key words:** land resource carrying capacity; driving force-pressure-state-response; obstacle degree model; coupling coordination

土地作为人类社会最重要的物质基础,承载着人类的开发建设以及生产活动。但由于近年来城市化的不断推进,人口数量的快速增长以及生态环境不断恶化,人地关系不协调等问题的出现,同时土地资源的稀缺性与社会发展的需求之间呈现失衡状态,引起了国内外学者对土地资源承载力的关注。同时我国政府也非常重视土地资源承载力的研究,2015年中共中央政治局会议审议通过的《生态文明体制改革总体方案》,明确指出“树立空间均衡的理念,把握人口、经济、资源环境的平衡点推动发展,人口规模、产业结构、增长速度不能超出当地水土资源承载能力和环境

容量”,同时指出市县“空间规划编制前应当进行资源环境承载能力评价,以评价结果作为规划的基本依据”。由此可见,资源环境承载力对于区域规划区域协调发展的重要性,其中土地资源承载力作为资源环境承载力的重要的一部分,对于区域的国土空间规划以及人口、资源、环境的协调发展具有重要的作用,因此开展土地资源承载力的研究具有重要的意义(封志明,1994)。

土地资源承载力的研究起源于国外,其中“人地关系”最早见于《通论地理》一书,它是学者沃伦·纽斯在1650年完成的著作(景跃军和陈英姿,2006)。在此之后,学者马尔萨斯根据这一主

题, 构建了人口粮食土地的研究框架, 这奠定了早期的承载力的研究方向 (Malthus, 1826)。之后许多学者在此基础上对土地承载力进行了相关的研究 (Millington and Gifford, 1973; 封志明和李鹏, 2018)。21 世纪以来, 国外学者对承载力的研究开始转向实际问题, 如 Oh et al (2005)、Johnson et al (2011)。国内的承载力研究最早借鉴于国外的“人粮关系”的研究, 其中在 1986 年中国科学院主持进行的“中国土地资源生产能力及人口承载力研究”是国内最早的承载力研究 (封志明和李鹏, 2018), 这一研究奠定了以人粮关系为基础的土地承载力研究 (刘东等, 2011; 封志明等, 2014)。现阶段随着学者们对于土地承载力研究的不断深入, 学者们开始转变了以人粮关系为基础的承载力研究, 认为这种单一的人粮关系不能够真实地反映出区域承载力的水平, 承载力的标准不仅是要通过承载的人口数量, 更要包括人类的各种经济社会活动。因此在这种理念下, 土地承载力的研究开始从单一的人粮关系转变到多因素影响的土地综合承载力研究, 如王书华和毛汉英 (2001) 认为土地承载力不仅仅是承载人口的数量, 更要包括一定时间空间以及社会经济条件下, 土地资源所能承载的人类活动的规模和强度, 并通过构建土地承载力的 REST 系统对我国东南省份的土地承载力进行了研究; 张红等 (2016) 认为土地资源承载力是在可以预见的技术、经济、社会发展水平以及物质生活水平的前提下, 不同时间维度下、不同国家或区域所拥有的土地资源能够对人口数量形成持续、稳定供养的最大规模。在多因素影响下的土地综合承载力的研究中, 学者们基于各自的研究区域展开了不同的研究, 同时研究视角也变得多样。土地资源承载力的评价方法主要有生态足迹法、系统动力学方法、粒子群投影寻踪法、综合指数法等。如祝秀芝等 (2014) 通过采用系统动力学方法模拟了上海市 2010—2020 年的社会发展状况, 预测了未来上海市土地承载力的变化状况, 张红等 (2016) 通过生态足迹法对舟山市的土地承载力进行了评价, 孙钰等 (2012) 通过采用综合指数法, 对天津市辖区的土地承载力状况进行了评价; 在土地综合承载力的研究中, 还有部分学者对土地资源承载力的时空分布状况进行了研究, 如陈珏等 (2011) 基于空间聚类方法对黑龙江省各地级市的土地综合承载力时空分布状态进行了研

究, 魏玮等 (2015) 运用 ArcGIS 对海西城市群的土地综合承载力空间差异特征进行了评价研究; 另外有部分学者对土地资源承载力的预测展开了相关的研究, 如何刚等 (2018) 基于灰色模型对安徽省的土地承载力进行了预测研究, 魏媛等 (2016) 基于 GM (1, 1) 模型对喀斯贫困山区土地资源承载力进行了预测研究; 此外, 还有少部分学者关注于土地资源承载力系统的耦合系统性, 如孙钰和李新刚 (2013a) 对山东省各地级市的土地资源承载力承压系统的耦合协调性进行了相关研究, 李新刚等 (2019) 对京津冀城市群的土地承载力与经济发展之间的耦合协调性进行了相关评价。综上所述, 纵观土地承载力的国内外研究可以发现, 土地承载力的研究大致经过了从以“人粮关系”为基础的承载力研究到现阶段的多因素的土地承载力研究, 同时大多数研究关注于评价土地资源承载力的水平, 并结合相关的研究方法来判断各自研究区域的限制因素, 只有较少部分文献关注于土地资源承载力内部系统协调发展性的研究, 同时通过查询相关土地资源承载力研究的文献, 发现对于杭州市的土地资源承载力研究少之又少, 鉴于此, 本文通过基于 DPSIR 模型构建土地承载力指标体系, 同时并结合 TOPSIS 模型、熵权法、障碍度模型以及耦合协调模型等方法对杭州市的土地承载力进行评价, 以期为提高区域土地的承载力水平提供参考对策。

## 1 区域土地资源承载力评价指标体系建立及评价模型的构建

### 1.1 评价指标体系的建立

土地资源承载力指标体系的建立是现阶段土地资源承载力研究的关键之一, 对于承载力指标体系的建立, 不同的学者看法不同, 如毛汉英和余丹林 (2001) 通过承压指标、压力指标研究体系与区际交流指标构建区域承载力研究体系; 陈珏等 (2011) 通过构建经济、社会、生态、水土资源承载力指标体系研究区域土地承载力的变化状况; 郭欢欢等 (2011) 基于土地的功能构建北京市土地承载力指标评价体系。

驱动力 - 压力 - 状态 - 响应框架 (DPSIR) 最初是研究环境问题与人类社会发展的关系问题而形成的 (蒋涤非和宋杰, 2013)。DPSIR 模型是由 PSR (压力 - 状态 - 响应) 模型演化而来, PSR 模

型最早是由加拿大统计学家提出,后被联合国相关组织用于环境保护相关问题的研究中。现在PSR模型被用以生态保护、土地可持续性利用等方面。PSR模型研究模型围绕“压力-状态-响应”研究思路框架,其中压力解释了在人类的社会经济活动下对生态环境的影响,即在人类活动的影响下发生了什么;由于人类活动与生态环境之间是动态影响的双向关系,在人类活动对生态环境发生作用后,生态环境对人类活动产生一定的反作用,故状态层解释了这种生态环境的反作用;在生态环境对人类活动产生一定的影响时,相关的政府部门会根据“状态”层所带来的挑战,预估或者对当前的危机状态采取相关措施进行调整,故响应层解释了这种政府部门的调整。PSR模型的优势在于具有完整的反馈系统,同时具有很强的因果关系,同时研究者可从自身角度去调整研究思路,从而保证研究的完整性。而DPSR模型是在PSR模型的基础上增加了D层,即驱动力层(蒋涤非和孙杰,2013),一方面DPSR模型充分保留吸收了PSR模型的优势,另一方面通过增加驱动力层,可以更加清楚地反映经济社会的发展及人类活动对于整个系统的影响,另一方面DPSR模型更加完整地反映了人类活动与生态环境之间的反馈系统,从而更加完善地反映了社会、经济之间的动态关系,从而完善了PSR模型的不足。同时土地承载力内部是一种多因素影响下的复杂系统,而驱动力-压力-状态-响应(DPSR)研究框架本身具有因果解释能力,并且能够处理现实复杂生活中多重相互作用、相互联系的因果关系网。鉴于此,本文引入此框架,借以研究区域内部复杂的承载力系统的影响因素以及变化情况。

本文基于基于驱动力-压力-状态-响应框架构建杭州市土地资源承载力评价指标体系,各子系统指标的选取,一方面依据杭州市的自然条件和社会经济发展状况,同时参考前人相关的研究成果(孙钰和李新刚,2013b;于广华和孙才志,2015;张晓娟和周启刚,2017),另一方面根据评价指标体系建立的相关原则——综合性、系统性、可获得性、科学性等来构建区域土地资源承载力的评价体系。在驱动力子系统,地均GDP、人均GDP、城镇常住居民收入等作为土地资源承载力的驱动因素,其中地均GDP是反映区域经济发展水平的重要指标,同时也可以反映区域土地

的利用效率;人均GDP是反映区域发展状态的重要指标,同时也是反映区域人民生活水平的重要指标;城镇常住居民收入反映了城镇居民的生活水平。驱动力系统一方面推动经济社会的发展,另一方面给区域土地资源带来一定压力与挑战。在压力子系统中选取人口密度、人口自然增长率、土地开发强度等指标来反映各种发展对土地利用造成的压力,其中人口密度、人口自然增长率等指标反映了区域人口的分布状况以及变化情况,而土地开发强度则直接反映了对区域土地开发的强度,该指标是反映土地资源承载力压力的重要指标,压力层指标集中反映人类活动对区域土地利用的压力;在状况子系统中通过地均工业总产值、人均粮食占有量、人均有效灌溉面积等指标来反映区域土地资源的利用与变化情况,人均粮食占有量、人均有效灌溉面积等指标集中反映了区域粮食安全状况及农业生产的条件,从而较为完整地反映了状态层系统;最后是响应子系统,在各种压力状况以及驱动力因素影响下,促使人类社会采取相关的政策规划来对土地の利用方式进行调控,因此在响应子系统下,选取城市污水厂集中处理率、生活垃圾无害处理率、建成区覆盖率等指标来作为研究指标,城市污水厂集中处理率、生活垃圾无害处理率指标反映了区域生态环境保护的力度,建成区覆盖率则反映区域绿化的面积,因此这些指标集中反映了区域有关部门对区域保护的调控,从而较为完整地表达了响应子系统。具体指标体系见表1。

## 1.2 土地资源承载力评价模型的构建

本文在基于DPSR评价指标体系的基础上对杭州市土地资源承载力进行评价研究,同时采取TOPSIS模型及熵权法综合评价法对区域土地资源承载力进行综合评价,并采用障碍度模型诊断各年份区域限制性因素,最后采用耦合协调模型对区域承载力内部系统协调发展性进行评价。

### 1.2.1 数据标准化

土地资源承载力指标体系的来源复杂多样,因此需要对原始数据进行无量纲处理,同时土地承载力评价指标体系内存在两类数据,一类是正向化指标,又称之为效益型指标,一般认为此类指标越大越好,还有一类是负向化指标,又称之为成本型指标,一般认为此类指标越小越好。两种类型数据下的标准化处理如下所示。

表 1 基于 DPSR 的杭州市土地承载力评价指标体系  
Tab.1 Evaluation index system of land carrying capacity of Hangzhou based on DPSR

子系统 Subsystem	指标名称 Indicator name	指标代码 Indicator code	权重 Weights
驱动力系统 Driving force system	人均 GDP GDP per capita	R1	0.071
	二三产业增加值占比 The proportion of the second and third industries	R2	0.070
	GDP 增长率 GDP growth rate	R3	0.081
	人均 GDP Per capita GDP	R4	0.044
	城镇常住居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban resident	R5	0.044
压力系统 Pressure system	人口密度 The population density	R6	0.045
	人口自然增长率 Natural population growth rate	R7	0.041
	万元 GDP 工业废水排放量 10,000 yuan GDP industrial waste water discharge	R8	0.042
	万元 GDP 工业二氧化硫排放量 10,000 yuan GDP industrial sulfur dioxide emissions	R9	0.042
	土地开发强度 Land development intensity	R10	0.047
状态系统 State system	地均工业总产值 Gross industrial output value	R11	0.041
	人均粮食占有量 Per capita food possession	R12	0.043
	人均水资源拥有量 Per capita water resources	R13	0.054
	人均土地资源总量 Total land resources per capita	R14	0.042
	人均有效灌溉面积 Average effective irrigation area per capita	R15	0.044
	城市人均拥有道路面积 Urban per capita Road area	R16	0.041
	城市污水厂集中处理率 Urban sewage treatment center treatment rate	R17	0.040
	生活垃圾无害化处理率 Harmless treatment rate of domestic garbage	R18	0.049
	人均公园绿地面积 Per capita park green area	R19	0.042
	建成区绿化覆盖率 Green coverage rate in built-up areas	R20	0.038
	一般工业固体废物利用率 General industrial solid waste utilization rate	R21	0.041

采用极值标准化法对数据进行处理,其中对于正向性指标(R1—R5, R11—R21),采用公式(1)进行处理:

$$r_{ij} = \frac{R_{ij} - \min(R_{ij})}{\max(R_{ij}) - \min(R_{ij})} \quad (1)$$

对于负向性指标(R6—R10),采用公式(2)进行标准化处理:

$$r_{ij} = \frac{\max(R_{ij}) - R_{ij}}{\max(R_{ij}) - \min(R_{ij})} \quad (2)$$

式中:  $R_{ij}$  表示第  $i$  个指标、第  $j$  年的原始值;  $r_{ij}$  表示第  $j$  年、第  $i$  个指标的标准化后数值。经过上述计算,得到标准化后的矩阵:  $X=(X_{ij})_{m \times m}$ , 其中,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为土地承载力评价指标数;  $j=1,$

$2, \dots, m$ ,  $m$  为年份数。

### 1.2.2 熵权法

土地资源承载力的权重测算方法主要分为主观测算以及客观测算,为保证承载力评价的科学性,本文采用客观测算方法——熵权法确定土地承载力指标评价体系的权重。熵权法确定的基本原理是,设有  $n$  个评价对象,  $m$  个待评价年度,则第  $i$  个评价对象的熵的定义为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}, \quad f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}} \quad (3)$$

式(3)中:  $H_i$  为信息熵,  $f_{ij}$  是第  $i$  个评价对象在第  $j$  个指标上的得分相对于所有待评价对象在该指标上

得分的占比。信息熵的意义在于系统越有序,熵值越低;系统越混乱或者分散其相应的熵值就越高。

$$W_i = \frac{1-H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为土地资源承载力各评价指标的权重。

### 1.2.3 TOPSIS 模型

TOPSIS 法是根据有限个评价对象与最优目标值的接近程度,对不同目标进行优劣排序的一种方法,该方法是多目标决策中常用的方法,鉴于此,本文引用此方法评价杭州市土地的承载力,其主要原理是通过模型计算的正负理想解的偏离程度,来表征杭州市不同年份承载力的实际状况,从而全面客观地反映区域承载力的变化(雷勋平和邱广华,2016)。

正负理想值的确定:通过矩阵  $Y$  的最大值和最小值来求解。

矩阵  $Y$  是由各承载力指标标准化后的矩阵  $X$  加权后得到的,其中加权后处理的过程为  $Y=X \cdot W_i$ ,其标准化矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1j} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nj} \end{bmatrix}$$

正理想解:  $Y^+ = [\max y_{ij}]$ , 负理想解:  $Y^- = [\min y_{ij}]$ 。

然后采用欧氏距离算法分别计算各指标到正理想解  $d^+$  和负理想解  $d^-$ ,具体公式如下。

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^+ - y_{ij})^2}, \quad d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^- - y_{ij})^2} \quad (5)$$

最后是贴近度的算法:以贴近度数值的大小来代表土地承载力的水平,基于公式(5)计算得出的到正理想解  $d^+$  及到负理想解  $d^-$  来求解。

$$C_j = \frac{d^-}{d^+ + d^-} \quad (6)$$

在式(6)中:  $C_j$  代表贴近度,用来反映杭州市土地承载力的水平,其取值范围为  $[0, 1]$ 。  $C_j$  取值越接近于 1,表明土地承载力的水平越高,反之则表明土地承载力的水平越低。关于土地资源承载力等级划分,不同的学者划分的方法不同,主要分为三种类型:一种是根据  $[0, 1]$  进行等分划分土地资源承载力的级别,如郭欢欢等(2011)对北京市的土地资源承载力研究;第二种是根据土地资源承载力的评价价值结合聚类方法的划分,如于广华和孙才志(2015)

对环渤海地区土地资源承载力的评价研究;第三种是通过实际值与理想值的比较,划分满载、超载、可载状态,如魏玮等(2015)对海西城市群承载力评价研究。基于上述学者的研究,本文采用一种类型的划分,并在相关原理的基础上进行适当调整改动。具体的划分级别见表 2。本文参考相关的研究(鲁春阳等,2011;高洁芝等,2018),将土地承载力划分为表中的几个标准。

表 2 土地承载力等级评判标准  
Tab.2 Evaluation criteria for land carrying capacity

贴近度 Closeness	等级 Grade
0—0.30	低级 Low level
0.31—0.60	中级 Intermediate
0.61—0.80	良好 Good
0.81—1.00	优质 High quality

### 1.2.4 障碍度模型

引入障碍度模型来对杭州市的土地资源承载力进行评价,可以诊断出各个年份影响杭州市土地资源承载力的主要限制性因素,进而提出针对性的解决措施,从而便于积极整合土地资源进而提高区域土地的承载力水平。障碍度因素诊断的主要方法是通过对指标偏离度、因子贡献度和障碍度指标的测算来完成的。具体的计算公式为:

$$O_j = \frac{I_j F_j}{\sum_{j=1}^{21} I_j F_j}, \quad F_j = r_j W_i, \quad I_j = 1 - r_j \quad (7)$$

式中:  $F_j$  是因子的贡献度,  $I_j$  是指标的偏离度,  $O_j$  则为障碍度,  $r_j$  为指标标准化后的数值。

### 1.2.5 耦合协调模型

耦合度是物理学中容量耦合系数的模型,它可以反映两个或者两个以上系统相互作用的协调发展程度,通过它可以较为清楚地观察到系统内部各个子系统相互作用以及协调的程度(盖美等,2018)。因为土地承载力系统是一个多因素相互作用的复杂系统,因此可以通过耦合模型用以反映土地承载力子系统之间的相互协调作用,同时在结合相关研究基础之上(熊建新等,2014),构建本文的耦合模型,计算公式为:

$$C = \left\{ \frac{[f(x) \times g(x) \times h(x) \times m(x)]}{\left[ \frac{f(x) + g(x) + h(x) + m(x)}{4} \right]^4} \right\}^{1/4} \quad (8)$$

式(8)中:  $f(x)$ 、 $g(x)$ 、 $h(x)$  以及  $m(x)$  分别为驱动力、压力、状态以及响应子系统的承载力水平。

$C$  为承载力子系统的耦合度, 其取值为  $[0, 1]$ , 其取值越接近于 1, 说明承载力内部各系统的耦合越好, 反之当其取值越接近于 0, 表明各子系统的相关作用性越差, 系统朝无序发展。

由于耦合度模型只能说明承载力内部子系统的相互作用的大小, 无法反映内部系统协调发展的程度, 因此在耦合模型的基础上继续引入耦合协调模型, 耦合协调度可以衡量内部系统或内部各要素协调性状况, 因此可以通过该模型研究承载力内部系统要素的协调一致性, 其相关公式为:

$$D = \sqrt{C \times T}, T = \partial f(x) + \beta g(x) + \lambda h(x) + \varphi m(x) \quad (9)$$

式 (9) 中:  $D$  为耦合协调度;  $f(x)$ 、 $g(x)$ 、 $h(x)$  以及  $m(x)$  分别为驱动力、压力、状态以及响应子系统;  $\partial$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 、 $\varphi$  为待定系数, 通过查找相关文献发现, 对于模型中各待定系数值的确定通常都是认为耦合的各个方面是同等重要, 如孙钰和李新刚 (2013b) 在研究山东省土地承载力系统耦合协调时, 将承压系统看作同等重要并取值 1/2, 如卫思夷等 (2018) 对于沈阳经济区的研究, 将土地开发强度与资源环境承载力的系数取值 1/2。因此, 本文遵循相关学者的观点, 将各承载力子系统中每个系统视为同等重要, 因此每个待定系数的取值就是 0.25。

同时参考相关的文献 (段佩利等, 2018; 卫思夷等, 2018), 将土地承载力子系统的耦合协调度划分为表 3 和表 4 中的几种情况。

## 2 实证研究

### 2.1 研究区域概况

杭州位于中国东南沿海、钱塘江的下游、京杭大运河南端, 是浙江省的政治、经济、文化、教育、交通和金融中心, 长江三角洲城市群中心城市之一、长三角宁杭生态经济带节点城市。截至 2017 年, 杭州下辖 10 个区、2 个县, 代管 1 个县级市, 总面积 16596 km<sup>2</sup>, 常住人口为 918.8 万人, 城镇化率 76.2%。此外, 杭州市作为我国重要的电子商务中心之一, 也是我国新一线城市, 开展对杭州市土地承载力的研究不仅可以了解杭州市土地承载力的变化, 同时也可研究其他新一线城市的土地承载力研究提供参考。

### 2.2 数据来源

以杭州市为研究对象, 数据主要来自于《杭州市统计年鉴》(2010—2018)、杭州市社会经济发展公告 (2010—2018)、政府部门的相关网

站等, 其中部分数据经过二次运算得到。

表 3 耦合度分级  
Tab.3 Coupling degree classification

等级	Grade	取值	Value
低水平耦合	Low-level coupling	0—0.30	
拮抗	Antagonistic	0.31—0.50	
磨合	Run-in	0.51—0.80	
高水平耦合	High level coupling	0.81—1.00	

表 4 耦合协调度分级  
Tab.4 Coupling coordination degree classification

等级	Grade	取值	Value
极度失调	Extreme imbalance	0—0.09	
严重失调	Serious disorder	0.10—0.19	
中度失调	Moderate imbalance	0.20—0.29	
轻度失调	Mild disorder	0.30—0.39	
濒临失调	On the verge of disorder	0.40—0.49	
勉强协调	Reluctant coordination	0.50—0.59	
初级协调	Primary coordination	0.60—0.69	
中级协调	Intermediate coordination	0.70—0.79	
良好协调	Good coordination	0.80—0.89	
优质协调	Quality coordination	0.90—1.00	

### 2.3 评价的基本过程

第一, 承载力指标权重的计算及土地承载力得分的计算。首先, 对原始数据采用数据标准化公式进行标准化处理, 对正向指标与负向指标运用不同的公式进行标准化处理。然后基于标准化后的数据, 带入熵权法的相关公式中, 求得各指标的相关权重, 最后将加权后的数据带入 TOPSIS 模型中进行相关计算, 从而得出杭州市各年份土地资源承载力总得分以及各子系统承载力的评价水平。

第二, 杭州市各年份障碍度因素的诊断。使用加权后的数据进行障碍度诊断, 将各加权后数据带入障碍度模型公式中, 得出各评价年份内障碍度因素的排名及各准则层的障碍度影响, 最后基于障碍度的评价结果, 诊断出各年份杭州市土地承载力的主要限制性因素。

第三, 杭州市评价年份内土地承载力子系统耦合协调性的计算。该部分是基于各年份杭州市各子系统的承载力数值来进行计算, 首先将各子系统承载力评价结果带入耦合度协调模型的计算公式中, 求得各年份杭州市的系统耦合度结果及耦合协调度结果, 根据评价结果分析得到各年份杭州市承载力系统的耦合协调变化情况, 各评价模型的结果见图 1、图 2、表 5、表 6。

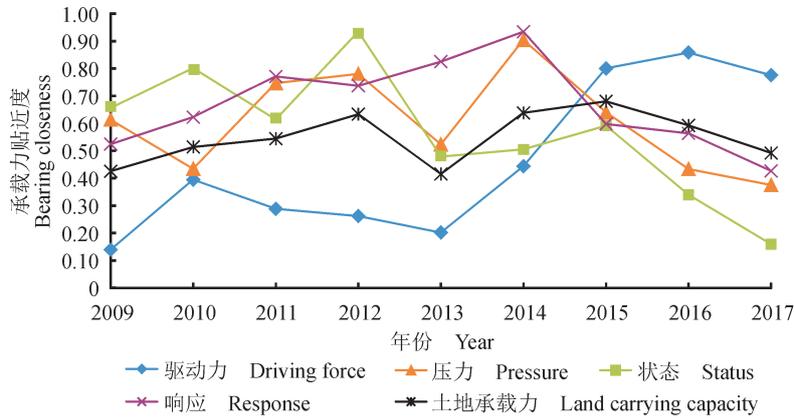


图1 杭州市各年份土地资源承载力评价结果变化

Fig.1 Change in the evaluation results of land resource carrying capacity in various years in Hangzhou

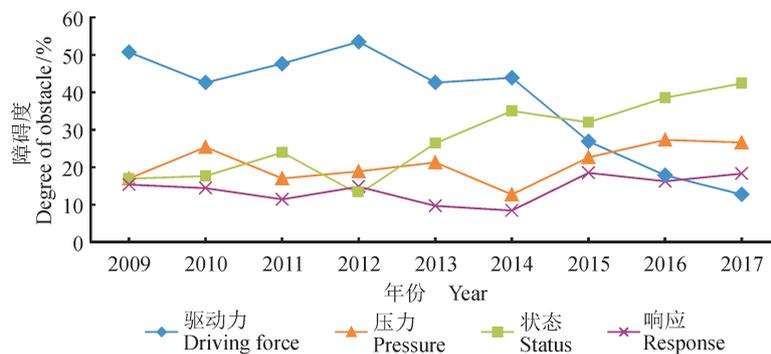


图2 杭州市各年土地资源承载力准则层障碍度因素变化

Fig.2 Changes in the factors of the obstacles in the criteria for the bearing capacity of land resources in Hangzhou

年份 Year	项目 Project	指标排序 Index ranking				
		1	2	3	4	5
2009	障碍度 Obstacle	13.8	13.6	9.1	8.6	8.5
	指标 Index	R1	R2	R13	R5	R4
2010	障碍度 Obstacle	13.4	12.2	8.6	8.5	8.1
	指标 Index	R1	R2	R5	R4	R20
2011	障碍度 Obstacle	12.6	12.5	11.8	8.3	7.9
	指标 Index	R13	R1	R2	R5	R4
2012	障碍度 Obstacle	13.1	12.4	12.1	8.9	8.3
	指标 Index	R3	R1	R2	R20	R5
2013	障碍度 Obstacle	16.6	10.6	8.2	8.1	7.0
	指标 Index	R3	R13	R1	R2	R6
2014	障碍度 Obstacle	17.0	11.1	8.9	8.8	8.5
	指标 Index	R3	R13	R1	R12	R15
2015	障碍度 Obstacle	11.4	9.4	9.3	8.4	7.9
	指标 Index	R10	R15	R19	R12	R3
2016	障碍度 Obstacle	10.5	9.8	9.6	9.3	8.9
	指标 Index	R10	R19	R16	R6	R3
2017	障碍度 Obstacle	12.7	10.7	9.4	8.9	8.8
	指标 Index	R3	R13	R10	R6	R1

表 6 杭州市各年份土地资源承载力系统耦合协调结果  
Tab.6 Coupling and coordination results of land resource carrying capacity system in Hangzhou

年份 Year	耦合度 Coupling	协调度 Coordination degree	耦合级别 Coupling level		协调程度 Degree of coordination	
2009	0.8561	0.6431	磨合	Run-in	初级协调	Primary coordination
2010	0.9600	0.7353	高水平耦合	High level coupling	中级协调	Intermediate coordination
2011	0.9339	0.7517	高水平耦合	High level coupling	中级协调	Intermediate coordination
2012	0.9030	0.7827	高水平耦合	High level coupling	中级协调	Intermediate coordination
2013	0.8909	0.6722	高水平耦合	High level coupling	初级协调	Primary coordination
2014	0.9466	0.8120	高水平耦合	High level coupling	良好协调	Good coordination
2015	0.9923	0.8077	高水平耦合	High level coupling	良好协调	Good coordination

## 2.4 土地资源承载力及子系统评价结果分析

(1) 杭州市土地资源承载力的发展水平及各子系统的承载力变化情况分析。首先从土地资源承载力总体评价结果来看, 2009—2017 年杭州市土地承载力波动变化, 但整体的趋势处于增长状态, 并且土地承载力整体处于中级状态, 但距离优质承载力仍有一定的差距。具体来看, 从 2009 年到 2012 年杭州市土地承载力处于上升阶段, 并且在 2012 年杭州市土地承载力的结果为 0.634, 达到了良好承载力的状态, 深入分析其原因, 一方面由于 2009—2012 年杭州市加强了对于生态环境的保护, 具体表现在城市污水厂集中处理率增长了 4.5%, 万元 GDP 工业废水排放量和万元 GDP 工业 SO<sub>2</sub> 分别减少 10% 和 7.1%, 建成区的绿化面积以及人均公园绿地面积也有了一定比例的提高, 另一方面杭州市重视经济发展, 具体反映在地均 GDP 从 0.31 亿元·km<sup>-2</sup> 增长到 0.47 亿元·km<sup>-2</sup>, 另外二三产业的比重以及城镇居民的收入都有一定的提高, 因此在此阶段杭州市的土地承载力有着一定幅度的提高。但在 2012—2013 年杭州市的土地承载力有着较为明显的下降, 分析其原因, 第一, 土地开发强度的增加导致人地关系的不协调性, 另外 GDP 增长率同比上一年处于降低状态; 第二, 人均绿化面积、人均土地资源数量等指标的下降导致此阶段土地的承载力有着较为明显的降低。2014—2017 年杭州市土地承载力又处于下降趋势, 主要是由于人口密度的增加、土地开发强度的持续增加、一般工业固体废物的利用率降低, 这些因素导致杭州市的土地承载力趋于降低状态。

(2) 杭州市土地资源承载力各子系统的变化分析。①驱动力系统的变化分析。由土地资源承载力各子系统的变化趋势图(图 1)可以看出, 驱动力系统的变化呈先缓慢下降、后大幅度升高的

态势, 其中在 2010—2014 年驱动力系统承载力从 0.494 降低到 0.202, 在此后的 2014—2017 年驱动力系统承载力又从 0.443 快速增长到 0.776, 实现了从中级到良好的转变。这表明杭州市的经济实力正在逐步增强, 从宏观层面上来说, 近年来杭州市作为电子商务代表城市之一, 其科学技术的发展, 在一定程度上推动了杭州市城市经济的发展, 这也符合杭州市近年来作为新一线城市的称号, 从微观层面上来讲, 2009—2017 年杭州市的地均 GDP 增长幅度超过 147%, 同时人均 GDP 涨幅 112%, 城镇居民的人均收入也有了大幅度的增加。但随着经济的发展, 也耗用了大量的土地资源, 同时对生态环境造成了一定的损害。因此随着社会经济不断发展, 在节能减排推行绿色发展的时代, 必然要提供最先进的技术以提高对资源的利用率, 这也是驱动力系统承载力有着大幅度增加的原因。②压力系统承载力变化分析。从图 1 可以看出, 压力子系统呈波动降低的变化态势, 2009—2017 年压力承载力系统评价值从 0.613 降低到 0.375, 降幅较为明显, 其中: 2009—2012 年压力系统评价值从 0.613 增长到 0.78, 此阶段土地承载力的水平从 0.425 增长到 0.634, 承载力级别也从中级转变到良好, 2014—2017 年土地承载力的水平从良好变化到中级, 这是由于压力子系统承载力的升高。因此, 杭州市在大力推进经济发展的同时, 要注重对生态环境的保护, 避免工业废水、工业 SO<sub>2</sub> 等直接排放到大气以及河流中, 避免对杭州市的土地承载力造成极大的压力。③状态系统承载力的分析。由图 1 可以看出, 状态系统变化趋势大致经历了先升高后降低的过程, 其中在 2009—2012 年大致处于增长状态, 从 0.656 增加至 0.934, 2013—2017 年呈现明显的降低趋势, 从 0.505 降低到 0.159。具体来看, 2009—2012 年

状态系统承载力高于土地承载力与压力承载力系统,但2013—2017年状态系统逐年下降,主要是由于杭州市推动经济发展,加之城市化的推进吸引大量的外来人员,迫使杭州市加大对土地的开发强度,增加了土地承载的压力,从微观层面上来讲,人均土地资源、人均粮食数量以及人均道路面积等指标都有着一定幅度的下降,而地均工业产值增加,这些变化说明杭州市在推动经济发展的同时,应注重采取相关的人口政策与措施,从而控制人口的流动,进而提高杭州市状态层系统的承载力,最终促进杭州市土地承载力水平的提高。④响应子系统承载力的分析。从响应子系统的整体变化趋势来看,2009—2017年杭州市响应系统承载力处于下降趋势,其中2009—2014年响应承载力系统处于增长状态,从0.524增加到0.934,但2014—2017年响应承载力系统减幅较为明显,减幅超过50%。从该承载力系统内部来看,2009—2017年杭州市一般工业固体废物利用率从95.43%降低到77.06%,人均绿化面积以及建成区绿化覆盖率都有着一定幅度的降低,因此整体来看,现阶段随着杭州市经济的进一步发展,势必需要加强保护生态环境的力度,但从目前的情形来看,相关的措施以及环保力度仍然缺乏力度。

## 2.5 杭州市土地资源承载力障碍因素诊断

由杭州市各承载力子系统的障碍度取值变化趋势(图2)可以看出,驱动力系统承载的障碍度逐年降低,压力承载力系统以及状态承载力系统都是呈逐年提高的趋势。2009—2014年驱动力系统的障碍度占主要影响,障碍度平均值在40%以上,其次是状态承载力系统、压力承载力系统以及响应承载力系统,说明在此阶段杭州市的发展主要受限于社会经济的制约,即驱动力系统的影响。具体来看,此阶段地均GDP及城镇居民的收入反映出的驱动力系统,在经济发展受制约的同时,人类活动对于生态环境系统的压力影响较小,因此压力承载力系统的障碍度因素较小。但2014—2017年状态承载力障碍度开始逐渐上升并且在承载力系统中处于首位,其次是驱动力、压力和响应承载力系统,说明此阶段随着经济的不断发展,由于未能制定相关的生态环境保护措施,因此导致在经济发展的同时,人类各种经济社会活动的增加对生态环境的影响程度增加,此阶段

状态承载力的障碍度影响不断增加。因此,要想提高杭州市土地承载力水平,必须从状况承载力系统以及驱动力系统着手,同时兼顾其他两个系统,在保证经济发展的同时,做好经济-社会-生态的协调发展,促进区域的协调发展。

由杭州市各年土地承载力指标障碍度的变化(图2)可以看出,从2009年到2013年,障碍因素主要集中在驱动力系统和压力承载力系统。障碍度较大的因素主要有:地均GDP、二三产业增加值占GDP比重、GDP增长率、人均GDP、建成区绿化覆盖面积、万元GDP、工业SO<sub>2</sub>排放量等指标,此阶段杭州市的承载力主要受制于驱动力系统及状态系统,其中驱动力系统中地均GDP、二三产业增加值占GDP比重的平均障碍度分别达到了11.66%和11.84%,说明在此阶段杭州市应注重发展质量的提高,同时应注重第一产业到二三产业的转型化发展,并加强对区域生态环境的保护力度。2014—2017年障碍因素主要集中于状态承载力系统和驱动力承载力系统。障碍度较大的因素有:GDP增长率、人均有效灌溉面积、土地开发强度、人均土地资源总量、人口自然增长率等,此阶段由于人口数量的增加及城市化的推进,导致土地开发强度增大及人均土地资源总量降低,导致压力层障碍度集聚增加,这与上述分析一致。因此,此阶段应采取相关措施控制人口增加以及流动,同时在城市化推进过程中合理开发城市土地,控制城乡用地规模,从而提高其短板要素,进而促进城市的可持续发展。研究期前段,地均GDP和二三产业比重指标障碍度居高不下,研究期后段,土地开发强度和人均水资源占有量指标障碍度逐渐提升,尤其是土地开发强度。由于近年来杭州市大力推进城市化进程,拆迁安置较多,对土地的开发强度较大,同时吸引了大量外来人员,对区域土地承载力产生了不小压力。因此杭州市必须在保持经济发展的同时,控制土地开发强度,提高土地经济价值,同时加大对生态环境的保护力度。

## 2.6 杭州市土地资源承载力系统耦合协调性分析

在杭州市各系统承载力计算的基础上,由耦合协调模型计算出了杭州市2009—2017年耦合协调的数据,同时参考相关的定级标准对各评价结果进行了分类汇总。由表6可以发现,2009—2017年,杭州市承载力系统整体的耦合协调度较

好,但距离优质协调仍有不小的差距。首先,2009—2017年,从总体上来看杭州市承载力系统耦合度较高,除了2009年处于拮抗外,其他年份都处于高水平耦合,对比表格中的耦合度及耦合协调度评价结果可以发现,耦合度的评价结果远高于耦合协调度的评价结果,说明杭州市承载力系统内部各要素趋于相互作用,内部系统朝有序方向发展。第二,从杭州市各年间的耦合协调度来看,2009—2012年耦合协调程度评价状态从初级协调转变到良好协调,2013—2016年又从良好协调变化到初级协调状态,具体来看,2009—2014年杭州市承载力系统耦合协调度从0.6431增加至0.812,在此阶段,耦合协调度呈“初级协调—中级协调—良好协调”的态势,其中2015年协调度达到了研究阶段的最大值(0.812),说明土地承载力各子系统之间相互作用良好,内部各要素较一致,进而达到承载力系统内部的协调一致性发展。从2015年到2017年,承载力系统内部耦合协调度逐年降低,具体数值从0.8077降低到0.6122,降幅较为明显,虽然此阶段的耦合度评价数值较高,但各承载力系统内部要素之间协调性变差,故引起系统之间的耦合协调度降低。综上所述,杭州市土地承载力系统耦合度变化呈波动升高状态,而协调度呈波动降低状态,说明当下随着杭州市经济的不断发展、人均收入的不断增加,驱动力对土地承载力的冲击增强,因此促使各承载力系统之间的互动作用增强。但协调度的降低反映了杭州市未能处理好各系统之间的协调发展。当下随着杭州城市化进程的不断推进,城市人口的数量不断增加,同时人口自然增长率不断升高,对杭州市的土地承载带来一定的挑战,同时人类各种活动的增强对生态环境带来了一定的压力,因此要想提高杭州市的承载力水平,必须处理好各系统之间的协调发展。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

基于“驱动力-压力-状态-响应”构建杭州市土地资源承载力评价指标体系,同时结合熵权TOPSIS模型、障碍度模型以及耦合协调性模型对杭州市2009—2017年土地资源承载力进行了综合评价,研究结论如下:(1)通过熵权TOPSIS模型运算结果可以发现,2009—2017年杭州市土地

承载力呈波动增长的变化态势,从整体上来看,土地资源承载力水平处于中级状态,离优质土地承载力状况仍有一定距离,因此仍需采取相关措施提高区域土地的承载力水平;各子系统承载力的变化呈现出不同的态势,2009—2017年驱动力承载力系统呈先缓慢降低、后大幅度增长的变化态势,压力承载力系统和响应承载力都呈波动降低的变化趋势,而状态承载力的变化趋势是先升高后降低。(2)基于TOPSIS评价结果,采用障碍度模型对土地承载力各子系统以及指标进行诊断,结果表明,在2009—2013年杭州市承载力系统障碍度主要集中于驱动力子系统和压力子系统,其中障碍度较大的因素主要有地均GDP、二三产业增加值占GDP比重等,而在2014—2017年障碍度则主要集中于状态承载力系统和驱动力承载力系统,障碍度较大的因素有GDP增长率、人均有效灌溉面积、土地开发强度等,鉴于此,有关部门应该针对性地采取措施,以便提高杭州市的土地承载力水平。(3)采用耦合协调模型,对2009—2017年杭州市各承载力系统的耦合度以及耦合协调度进行了评价,结果表明在2009—2017年,杭州市承载力系统整体耦合协调度较好,但距离优质协调仍有一定的距离。其中2009—2017年杭州市承载力系统耦合度总体较高,除了2009年外,其他年份都处于高水平耦合,年际间耦合度评价结果均高于耦合协调度评价结果,并且杭州市各年间的耦合协调度的变化大致呈“初级协调到良好协调再到初级协调”的态势。

#### 3.2 建议

通过对杭州市土地承载力的评价、障碍因素的诊断及耦合协调性的分析可知,提高杭州市土地承载力的关键在于主要障碍度指标,同时应该协调好各承载力子系统的协调发展。第一,根据杭州市耦合协调的评价结果,近年来杭州市各承载力系统之间协调性较差,因此要想提高区域土地承载力水平,首先要解决好各承载力系统之间的协调性,必须首抓区域的各项规划,区域土地利用规划作为地区发展的重要基础,必须加强杭州市土地的科学合理规划,促进各系统之间的协调一致性,促进经济-社会-生态的协调发展。第二,根据杭州市障碍因素的诊断结果,近年来杭州市伴随着城市化的推进,对土地的开发强度增大,导致压力层的障碍度逐步增大,这也影响了杭州

市承载力水平的进一步突破,因此必须加强对土地的规划,防止城市的盲目扩张,优化土地利用结构,同时提高土地利用效率并提高土地经济产出,保护耕地红线,严格控制土地的数量。第三,针对杭州城市化带来的人口数量增加,从而导致承载力系统的压力增大,应采取相关的人口政策和发展政策,控制人口数量增长以缓解土地承载的压力,实现人口、社会、经济和资源的协调发展。最后,基于状态层的障碍度影响逐渐增大的趋势,杭州市有关部门应加强对生态环境保护的力度,尤其是在当前经济发展新常态下,杭州市作为新一线城市,应在发挥自身特色的同时兼顾区域的绿色发展,通过科技创新带动生态环境的改善,加大财政支出支持生态保护,同时杭州作为特色旅游城市,应大力发挥土地的生态服务功能,重点建设生态保护区域,加快生态城市的建设,进一步贯彻“绿水青山就是金山银山”的理念,大力发展绿色经济,从而促进经济-社会-生态的协调可持续发展。

### 参考文献

- 陈珏,雷国平,王元辉. 2011. 黑龙江省土地综合承载力空间差异研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 21(S1): 267-270. [Chen J, Lei G P, Wang Y H. 2011. Spatial differentiation of comprehensive land carrying capacity in Heilongjiang Province [J]. *China Population, Resources and Environment*, 21(S1): 267-270.]
- 段佩利,刘曙光,尹鹏. 2018. 区域开发强度与资源环境承载力耦合协调分析——以中国沿海城市群为例[J]. *资源开发与市场*, 34(7): 930-934, 1009. [Duan P L, Liu S G, Yin P. 2018. Analysis on coupling coordination between development strength and resource environmental bearing capacity—a case study of coastal urban agglomeration in China [J]. *Resource Development & Market*, 34(7): 930-934, 1009.]
- 封志明,李鹏. 2018. 承载力概念的源起与发展:基于资源环境视角的讨论[J]. *自然资源学报*, 33(9): 1475-1489. [Feng Z M, Li P. 2018. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: a view of natural resources and environment [J]. *Journal of Natural Resources*, 33(9): 1475-1489.]
- 封志明,杨艳昭,游珍. 2014. 中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究[J]. *地理研究*, 33(8): 1395-1405. [Feng Z M, Yang Y Z, You Z. 2014. Research on land resources restriction on population distribution in China, 2000—2010 [J]. *Geographical Research*, 33(8): 1395-1405.]
- 封志明. 1994. 土地承载力研究的过去、现在与未来[J]. *中国土地科学*, 8(3): 1-9. [Feng Z M. 1994. Past, present and future of land carrying capacity research [J]. *China Land Science*, 8(3): 1-9.]
- 盖美,聂晨,柯丽娜. 2018. 环渤海地区经济—资源—环境系统承载力及协调发展[J]. *经济地理*, 38(7): 163-172. [Gai M, Nie C, Ke L N. 2018. Carrying capacity and coordinated development of ERE system in the coastal area of Bohai Sea [J]. *Economic Geography*, 38(7): 163-172.]
- 高洁芝,郑华伟,刘友兆. 2018. 基于熵权TOPSIS模型的土地利用多功能性诊断[J]. *长江流域资源与环境*, 27(11): 2496-2504. [Gao J Z, Zheng H W, Liu Y Z. 2018. Diagnosis of the multi-functionality of land use based on an entropy weight TOPSIS model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(11): 2496-2504.]
- 郭欢欢,李波,侯鹰. 2011. 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)*, 47(4): 424-427. [Guo H H, Li B, Hou Y. 2011. Research on the capacity of land resources based on land function: Haidian as an example [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 47(4): 424-427.]
- 何刚,夏业领,朱艳娜,等. 2018. 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*, 38(2): 127-134. [He G, Xia Y L, Zhu Y N, et al. 2018. Evaluation and prediction of land carrying capacity in Anhui Province based on DPSIR-TOPSIS model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(2): 127-134.]
- 蒋涤非,宋杰. 2013. 基于包容性增长的健康城市化支持系统研究[J]. *人文地理*, 28(2): 79-83. [Jiang D F, Song J. 2013. Research on support system of healthy urbanization based on inclusive growth [J]. *Human Geography*, 28(2): 79-83.]
- 景跃军,陈英姿. 2006. 关于资源承载力的研究综述及思考[J]. *中国人口·资源与环境*, 16(5): 11-14. [Jing Y J, Chen Y Z. 2006. Review and thinking on the research of the resources carrying capacity [J]. *China Population, Resources and Environment*, 16(5): 11-14.]
- 雷勋平,邱广华. 2016. 基于熵权TOPSIS模型的区域资源

- 环境承载力评价实证研究[J]. *环境科学学报*, 36(1): 314–323. [Lei X P, Qiu G H. 2016. Empirical study about the carrying capacity evaluation of regional resources and environment based on entropy-weight TOPSIS model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(1): 314–323.]
- 李新刚, 王双进, 孙 钰. 2019. 基于 PVAR 模型的城市土地综合承载力动态冲击效应——以京津冀城市群为例[J]. *城市发展研究*, 26(1): 26–32. [Li X G, Wang S J, Sun Y. 2019. Research on the dynamic effect of urban land comprehensive carrying capacity based on PVAR model: taking Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as an example [J]. *Urban Development Studies*, 26(1): 26–32.]
- 刘 东, 封志明, 杨艳昭, 等. 2011. 中国粮食生产发展特征及土地资源承载力空间格局现状[J]. *农业工程学报*, 27(7): 1–6, 398. [Liu D, Feng Z M, Yang Y Z, et al. 2011. Characteristics of grain production and spatial pattern of land carrying capacity of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(7): 1–6, 398.]
- 鲁春阳, 文 枫, 杨庆媛, 等. 2011. 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*, 33(3): 535–541. [Lu C Y, Wen F, Yang Q Y, et al. 2011. An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: a case study of Chongqing [J]. *Resources Science*, 33(3): 535–541.]
- 毛汉英, 余丹林. 2001. 区域承载力定量研究方法探讨[J]. *地球科学进展*, 16(4): 549–555. [Mao H Y, Yu D L. 2001. A study on the quantitative research of regional carrying capacity [J]. *Advance in Earth Sciences*, 16(4): 549–555.]
- 孙 钰, 李新刚, 姚晓东. 2012. 天津市辖区土地综合承载力研究[J]. *城市发展研究*, 19(9): 106–113. [Sun Y, Li X G, Yao X D. 2012. The research of Tianjin urban land comprehensive carrying capacity [J]. *Urban Development Studies*, 19(9): 106–113.]
- 孙 钰, 李新刚. 2013a. 山东省土地综合承载力协调发展度分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 23(11): 123–129. [Sun Y, Li X G. 2013a. The research on the coordinated development degree of urban land comprehensive carrying capacity system in Shandong Province [J]. *China Population, Resources and Environment*, 23(11): 123–129.]
- 孙 钰, 李新刚. 2013b. 基于空间回归分析的城市土地综合承载力研究——以环渤海地区城市群为例[J]. *地域研究与开发*, 32(5): 128–132, 137. [Sun Y, Li X G. 2013b. The research of urban land comprehensive carrying capacity based on spatial regression analysis: taking the Bohai Rim urban agglomeration as example [J]. *Areal Research and Development*, 32(5): 128–132, 137.]
- 王书华, 毛汉英. 2001. 土地综合承载力指标体系设计及评价——中国东部沿海地区案例研究[J]. *自然资源学报*, 16(3): 248–254. [Wang S H, Mao H Y. 2001. Design and evaluation on the indicator system of land comprehensive carrying capacity [J]. *Journal of Natural Resources*, 16(3): 248–254.]
- 卫思夷, 居 祥, 荀文会. 2018. 区域国土开发强度与资源环境承载力时空耦合关系研究——以沈阳经济区为例[J]. *中国土地科学*, 32(7): 58–65. [Wei S Y, Ju X, Xun W H. 2018. Spatial-temporal coupling relationship between land development intensity and carrying capacity of regional resources and environment: a case study in Shenyang economic region [J]. *China Land Science*, 32(7): 58–65.]
- 魏 玮, 伍博炜, 王 强, 等. 2015. 基于生物免疫学原理的海西城市群土地综合承载力研究[J]. *资源科学*, 37(10): 2018–2029. [Wei W, Wu B W, Wang Q, et al. 2015. Land resources carrying capacity of urban agglomeration of the western Coast of Taiwan Strait based on biological immunology [J]. *Resources Science*, 37(10): 2018–2029.]
- 魏 媛, 吴长勇, 曾 昉, 等. 2016. 喀斯特贫困山区土地资源承载力动态分析与预测[J]. *水土保持研究*, 23(6): 322–326. [Wei Y, Wu C Y, Zeng F, et al. 2016. Analysis and prediction of land resources carrying capacity in karst mountainous areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(6): 322–326.]
- 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 2014. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. *地理科学*, 34(9): 1108–1116. [Xiong J X, Chen D L, Peng B F, et al. 2014. Spatio-temporal difference of coupling coordinative degree of ecological carrying capacity in the Dongting Lake region [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 34(9): 1108–1116.]
- 于广华, 孙才志. 2015. 环渤海沿海地区土地承载力时空分异特征[J]. *生态学报*, 35(14): 4860–4870. [Yu G H, Sun C Z. 2015. Land carrying capacity spatiotemporal

- differentiation in the Bohai Sea coastal areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(14): 4860–4870.]
- 张红, 陈嘉伟, 周鹏. 2016. 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*, 36(6): 155–160, 167. [Zhang H, Chen J W, Zhou P. 2016. A modified ecological footprint model to evaluate the land carrying capacity of island cities: take Zhoushan City as example [J]. *Economic Geography*, 36(6): 155–160, 167.]
- 张晓娟, 周启刚. 2017. 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*, 33(6): 666–671. [Zhang X J, Zhou Q G. 2017. Evaluation and prediction on land carrying capacity based on entropy-weight TOPSIS and grey model— taking Three Gorges Reservoir area as an example [J]. *Resource Development & Market*, 33(6): 666–671.]
- 祝秀芝, 李宪文, 贾克敬, 等. 2014. 上海市土地综合承载力的系统动力学研究 [J]. *中国土地科学*, 28(2): 90–96. [Zhu X Z, Li X W, Jia K J, et al. 2014. A study on system dynamics of land comprehensive carrying capacity in Shanghai City [J]. *China Land Science*, 28(2): 90–96.]
- Johnson S, Wang G X, Howard H, et al. 2011. Identification of superfluous roads in terms of sustainable military land carrying capacity and environment [J]. *Journal of Terramechanics*, 48(2): 97–104.
- Malthus T R. 1826. *Essay on the principle of Population* [M]. London: Penguin.
- Millington R, Gifford R. 1973. *Energy and how we live* [M]. Australian UNESCO Seminar Committee for Man and Biosphere.
- Oh K, Jeong Y, Lee D, et al. 2005. Determining development density using the Urban Carrying Capacity Assessment System [J]. *Landscape and Urban Planning*, 73(1): 1–15.