

长三角沿海地区土地承载力测度与耦合分析

王曼曼^{1,2}, 张宏艳^{3*}, 张有广¹, 林明森¹, 官 鹏²

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084;
3. 北京工商大学经济学院, 北京 100048)

摘 要: 客观准确把握长三角沿海地区土地承载力发展状态及其区际演化差异, 是开展土地资源优化配置与可持续发展的基础。该研究从支撑方-施压方维度构建了沿海地区土地承载力评价指标体系, 借助遥感影像解译数据与社会经济统计数据, 运用熵值法、耦合协调分析法及土地承载力指数法, 对 2000、2010 及 2018 年长三角 11 个沿海地区的土地承载力时空分异特征及支撑-施压耦合协调关系进行了综合研究, 结果表明: 1) 长三角沿海区域各年份综合施压力均高于支撑力, 始终处于超载状态, 且支撑力指数与施压力指数分别呈现波动式上升、波动式下降趋势; 2) 在各时期共计 33 个沿海地区样本中, 有 9 个区域土地承载力指数大于 1, 沿海地区盈余状态占比 27.3%。其中, 上海市和杭州市在各时期的支撑力与施压力水平均未发生变化, 其余地区在支撑力与施压力水平上则呈现出等级的持续上升、持续下降或升降交替变化趋势; 3) 长三角沿海地区耦合度介于 0.9~1.0 之间的区域占比为 97%, 其均处于协调耦合期; 土地支撑-施压协调度涵盖中度失调型、基本协调型、中度协调型、高度协调型 4 种类型, 其中, 江苏省以中度失调型居多, 浙江省以基本协调型居多, 形成“北低南高”的空间格局, 并呈现由南北两侧逐渐向上海市进行高值汇聚的态势; 4) 长三角沿海区域整体承载力水平始终处于超载但超载程度趋于减弱, 且各时期均存在土地超载与盈余并存的区域发展状态; 空间上呈现出江苏省“南北超载中部盈余”、上海市“全域盈余”以及浙江省“北部盈余南部超载”的格局特征。

关键词: 沿海地区; 土地承载力; 耦合度; 协调度; 长三角

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.033

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0281-12

王曼曼, 张宏艳, 张有广, 林明森, 官 鹏. 长三角沿海地区土地承载力测度与耦合分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 281—292. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.033 <http://www.tcsae.org>

Wang Manman, Zhang Hongyan, Zhang Youguang, Lin Mingsen, Gong Peng. Measurement and coupling analysis of land carrying capacity of coastal areas in the Yangtze River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 281—292. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.033 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

沿海地区是全球变化与人类活动剧烈相互作用的典型区域^[1], 其土地生态系统受陆海交叉的复合作用影响, 呈现脆弱性、动态性和多因素性等特征。自 21 世纪以来, 随着人口不断向沿海地区集聚, 城镇化建设、临港工业、滨海旅游、围海造田、滩涂围垦等迅速发展, 土地利用结构变化急剧且开发强度亦不断加剧^[2], 与此同时, 面临海平面上升、极端气候事件、环境污染、海岸侵蚀等生态环境问题^[1], 致使人地关系日趋紧张, 土地资源退化问题凸显^[3]。土地资源作为人类最重要的资源之一, 对其承载力的研究可追溯至 20 世纪初, 在百年发展历程中, 土地资源承载力对全球和区域发展曾发挥了前瞻性和战略性的意义^[2], 目前已成为 21 世纪用于描述地区发展限制的重要工具以及衡量区域可持续发展的重要判据^[4], 作为

摸清“家底”的基础性工作, 该项研究占据众多“+承载力”命题中的重要地位。客观认识土地承载力并准确把握其区际差异及协同演化方向, 有助于优化国土空间开发格局^[5], 引导合理的人口流向、产业布局、城镇规划和区域协调等工作^[6], 以保证土地资源的动态平衡与可持续的生产力^[7]。

自 1798 年 Malthus 发表了著名的《人口原理》^[8]以来, 承载力的内涵和外延不断拓展完善, 逐渐与人口学、生物学、生态学、资源环境科学等领域结合^[9-10], 20 世纪中后期, 由联合国粮农组织 FAO 和联合国教科文组织 UNESCO 主持的承载力相关研究中, 提出了系列承载力定义和量化方法^[11-12], 为全球和区域社会经济规划及可持续发展做出了积极贡献。随着全球性人口膨胀、资源耗竭及环境恶化等问题的爆发, 推动了承载力研究向纵深方向发展, 逐渐扩展至资源、环境和生态承载力范畴。土地承载力 (land carrying capacity) 作为中国开展最早且应用最为广泛的承载力研究领域^[13], 是衡量人类社会经济活动与土地生态系统间相互协调关系的定量化表征, 可将其归纳为土地利用和人类活动两大子系统^[6], 体现在一定时期和空间区域下, 土地所能承载人类活动规模和强度的阈值^[2], 相关研究方法可归纳为限制因子法^[14]、多

收稿日期: 2019-12-01 修订日期: 2019-01-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0502800; 2017YFB0502805)

作者简介: 王曼曼, 博士, 主要从事海岸带土地利用模式优化研究。

Email: wang_manman@qq.com

*通信作者: 张宏艳, 博士, 副教授, 主要从事环境经济学研究。

Email: zhybgs@163.com

因素综合评价法^[2,6,15-16]、参照区法^[17]、生态足迹法^[18]、投影寻踪模型法^[19]等,研究尺度涵盖国家、流域、省、市、县等大中小尺度,研究区域多集中在内陆地区。与此同时,针对沿海地区土地承载力也开展了大量研究,沿海地区的临海性是其区别于内陆地区最突出的特征^[7],在进行土地承载力测度时需考虑海洋相关要素的介入^[20],目前已在海岸带承载力评价指标体系构建^[2,21]、人海关系地域系统协同演化^[7]、开发强度与承载力时空耦合关系^[22]、海域承载力时空分异分析^[3,23]、长江经济带临近海域滩涂承载力评估^[24]等方面取得了丰富成果。其中,借助指标体系来评价土地承载力的相对性测度视角应用较广,且在指标完善、评价模型优化、目标效应拓展等方面不断呈现多元面相,但在指标构建思路上都大都将载体与承载物视作统一整体,较少分别刻画支撑方与施压方两系统之间的相对独立性及其耦合作用关系,且指标要素中对海洋灾害相关影响因子测度较少,同时,结合研究区域来看,目前针对整个长三角沿海地区视角的土地承载力测度及演变形态研究也尚不多见。

长三角沿海地区以其毗邻海洋的区位优势、强大的内陆经济腹地、国家政策及宏观战略导向,成为人口高度密集、经济活动最活跃及开放程度最高的地带之一,临海产业和城镇化快速发展的同时也使人口、资源、环境等问题日趋激化,正确认识其土地资源承载力状态及演化方向成为当地谋求可持续发展的必然要求。故借鉴已有研究成果,本文从支撑方(载体)所能承载施压方(承载物)的限度视角出发,综合考虑土地资源本底支撑、发展建设投入支撑、政策调控支撑、土地利用干扰压力、社会经济发展压力、沿海灾害破坏压力等的影响构建了基于支撑方-施压方的土地承载力评价指标体系,借助遥感影像及社会经济统计数据,对 2000、2010 及 2018 年共 3 个时间断面的长三角 11 个沿海地区土地承载力进行评估,分析各时期土地支撑力、施压力、支撑-施压耦合关系以及承载力水平的空间分异特征与演变规律,为促进长三角宏观尺度上的资源优化配置与可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

依据国务院 2010 年批准实施的《长江三角洲地区区域规划》,其明确将江浙沪划定为长三角范围,故本文选取连云港、盐城、南通、嘉兴、杭州、绍兴、宁波、舟山、台州、温州以及上海共计 11 个沿海城市作为研究对象(图 1),基于城市级尺度的研究不仅适应中国当前以行政区划为单元的管理特点,在社会、经济、灾害等方面亦有可靠的数据来源,辅助本研究的信息汇聚与分析评估。长三角沿海地区空间作为《长江三角洲城市群发展规划》中的沿海经济发展带,在土地开发利用逐渐深化和国家海洋战略、长江经济带发展战略、“一带一路”战略等政策助推下,已成为经济发展与生态保护的矛盾热点区^[25]。土地开发利用模式因各城市土地资源禀赋、地理区位、产业定位等不同而各异,在工业化和城镇化热点区重点趋于临港产业、工业园区建设、滨海新城建设、

沿海旅游开发等高经济效益发展方式,土地开发空间逐渐由陆缘向海洋拓展,在农业发展热点区主要通过滩涂围垦、湿地养殖、近岸捕捞等实现陆海空间利用。

研究区境内地势低平,类型以平原、丘陵和山地为主,海岸大部分属于淤泥质平原海岸,拥有广阔的滩涂。因地处中国东部沿海,拥有面向国际、连接南北、辐射中西部的密集交通网络和现代化港口群,经济腹地广阔,对长江流域乃至全国发展具有重要带动作用。依托发达的经济发展水平、便捷的交通运输条件和便利的公共服务设施,长三角沿海地区成为人口集聚高地,“虹吸效应”突出,一定程度上使得“大城市病”问题凸显,与资源环境承载力的矛盾加剧^[22],同时,受气候变化、海平面持续上升及人类不合理开发活动累计效应的影响,江苏、上海和浙江沿海地区的风暴潮、洪涝、海岸侵蚀、海水入侵和土壤盐渍化等灾害频发,致使沿海地区土地资源遭受严重破坏。

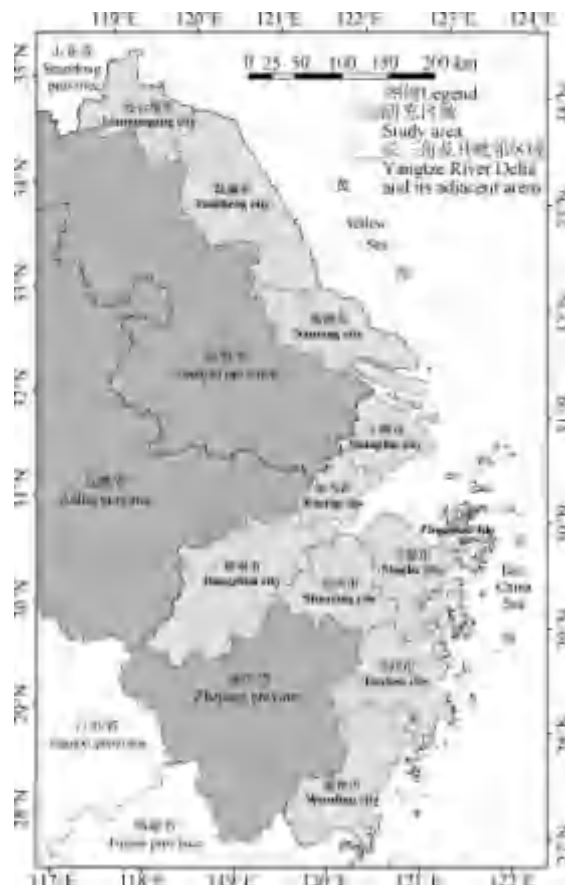


图 1 研究区地理区位图

Fig.1 Geographical location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文数据来源包含空间数据和统计数据两部分,研究时间节点为 2000、2010 及 2018 年。其中,空间数据主要为长三角沿海地区土地利用遥感监测数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>) 1:10 万比例尺全国陆域 LUCC 遥感监测数据库,空间分辨率为 30 m×30 m,基于该数据集进行 3 个时期土地开发

利用强度、土地利用多样性及土地景观破碎度指标因子的测度,表征人类活动对土地资源开发利用的干扰程度。其余数据均采用社会经济统计数据,其中,基于各城市的《城市统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》《环境状况公报》《浙江自然资源与环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》来获取研究对象在土地资源与社会经济发展方面的相关指标状态值,包含人口、经济、科技、教育、港口运输、工业污染等因子;在海洋灾害方面,重点选取海平面上升、热带气旋、风暴潮三种典型灾害进行评估,基于《中国海洋统计年鉴》《中国海洋灾害公报》及《中国海平面公报》来获取沿海风暴潮灾害影响程度及海平面上升幅度量(相对于常年平均海平面),同时,基于中国气象局热带气旋资料中心^[26](tcdata.typhoon.org.cn)统计各沿海地区累计热带气旋登陆次数。

2.2 研究方法

2.2.1 沿海地区土地承载力内涵及其指标体系构建

本研究秉持相对承载力视角,对长三角11个沿海地区土地承载力进行定量化测度,从土地生态系统“支撑方”具备的支撑力及面临外界环境“施压方”产生的施压力出发考虑。其中,支撑方能够提供人类生存所必要的生产、生活和生态空间,载体是指土地生态系统,并结合城市发展建设投入及政策调控等外部正向力量,共同提供对人类可持续发展的支撑力;施压方主要通过土地资源开发利用以满足生存发展需求,并叠加外界自然灾害的破坏风险,共同构成对土地资源的压力作用。将土地承载力水平视做支撑方能够支撑施压方的限度,当施压力接近于支撑力极限时,人类会调整并优化土地利用方式及借助科学技术等手段来提升支撑方的承载能力,以避免潜在“超载灾难”的发生,支撑方与施压方之间的耦合与联动共同影响土地承载力水平^[6]。同时,由于人类活动(生产生活的内容、方式及规模等)、技术发展(科技水平、环境治理水平、组织管理水平等)及土地资源载体自身始终都处在持续变化中,导致土地生态系统的承载弹性呈现出明显的动态特征。通过分别构建“支撑”类指标(S)和“施压”类指标(P),以刻画沿海地区土地支撑方与施压方之间的耦合关系,并通过支撑力指数与施压力指数的比值表征土地承载力大小(BCI),进一步依据承载力指数确定当前土地生态系统所处的超载/盈余/平衡状态及近些年的承载力变化趋势。

长三角沿海地区的临海特性使其响应海洋灾害扰动灵敏,对由全球气候变暖引起的海平面持续上升表现出极强的脆弱性。基于全球潮汐和浪涌再分析数据集以及海平面上升风险暴露度模型开展的中国大陆沿海省市海平面上升风险评估结果表明^[27],长三角及苏北沿海是海平面上升风险可能淹没范围的重点集中区,属高暴露等级区域,且江苏、上海等长三角地区可能淹没范围最大。同时,叠加热带气旋引起的强风暴潮影响,使得海岸侵蚀加强,大片滨海湿地丧失、耕地淹没及其他土地资源也将遭受严重程度的破坏。基于上述对研究区面临环境

灾害风险的分析,结合研究区概况中的地域及社会经济特征,借鉴已有研究成果,遵循系统性、典型性、数据可获得性和可比性等原则,从支撑方和施压方两方面构建评价指标体系(表1),以期实现对研究区土地承载力的科学测度。

支撑力主要从土地资源本底支撑、发展建设投入支撑、政策调控支撑3个维度来刻画,其中,政策调控支撑对区域发展定位具有重要的导向作用,将其也视做一种正向支撑力,为便于量化且切近实际发展现状,采用城市行政等级和城市规模等级2个指标来量化各城市获取国家优惠政策的多寡^[28]。施压力主要从土地利用干扰压力、社会经济发展压力、沿海灾害破坏压力3个维度共4项指标来刻画,其中,前3项指标测度主要源于《中国海洋统计年鉴》《中国海洋灾害公报》及《中国海平面公报》,因相关统计资料均是基于沿海省份和直辖市尺度进行的数据统计,故针对此类指标将同一省份的统计值分别赋予下辖的沿海地区,虽不能充分体现各城市间实际灾害差异,但在一定程度上能够厘清不同时间和空间维度上的省际灾害压力差异。针对较常年平均海平面上升幅度指标,受限于统计资料时间范围,本文将2003—2010年、2011—2018年期间的累计统计年均值作为2010年和2018年的指标测度原始值,并将期间的常年平均海平面统一归至1975—1993年的平均海平面高度;同时,基于《2010年中国海平面公报》中针对江苏、上海和浙江年代际差异变化分析,推算出1991—2000年期间的累计均值作为2000年测度值;针对风暴潮灾害导致农田受灾面积、风暴潮灾害导致直接经济损失两项指标值,分别将1991—2000年、2001—2010年、2011—2018年近十年的累计状态值作为2000年、2010年和2018年的指标测度值;同理,依据中国气象局热带气旋资料中心各沿海地区在1991—2018年期间的热带气旋登陆次数数据,包含热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风共6种热带气旋等级,参照风暴潮灾害导致农田受灾面积指标的累计统计方法进行原始数据测度。

2.2.2 土地利用干扰压力测度模型

基于土地利用斑块的结构组成、形态变化及空间配置等景观格局信息,通过定量测度来综合表征人类活动对土地生态系统的干扰施压程度,该研究采用土地利用强度指数、土地利用多样性指数及景观形状破碎度指数进行测算。

土地利用强度主要借鉴庄大方等^[29-30]提出的土地利用程度测度模型,将土地利用强度分级为^[31]:未利用级(用“未利用地”地类表征)、自然可再生级(用“林地”“草地”“水域”地类表征)、人工可再生级(用“耕地”表征)、难再利用级(用“建设用地”表征),分别将4种级别指数依次赋值为1、2、3、4,计算公式如下:

$$L=100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (1)$$

式中 n 表示土地利用强度分级数, A_i 表示研究区第 i 级土地利用强度分级面积百分比, C_i 表示第 i 级土地利用强度分级指数。

表 1 长三角沿海地区土地承载力评价指标体系

Table 1 Land carrying capacity evaluation index system in coastal area of the Yangtze River Delta

维度层 Dimension layer	要素层 Factor layer	指标层 Index layer	指标解释 Indicator description	权重 Weight
土地系统 综合支撑力 Comprehensive support from land ecosystem	土地资源本底支撑力	S_1 耕地面积/ km^2	反映农业综合生产能力	0.027
		S_2 建成区面积/ km^2	反映建成区建设规模	0.078
		S_3 建成区绿化覆盖率/%	反映建成区绿色发展水平	0.022
		S_4 城市道路面积/ km^2	反映基础设施建设水平	0.071
	发展建设投入支撑力	S_5 第三产业占 GDP 比例/%	反映产业结构高级化程度	0.047
		S_6 城市居民人均可支配收入/元	反映城市居民的平均收入水平	0.021
		S_7 农村居民人均可支配收入/元	反映农村居民的平均收入水平	0.017
		S_8 实际利用外资/(10^4 美元)	反映沿海地区对外开放程度	0.088
		S_9 教育支出/(10^4 元)	反映对教育方面的资金投入水平	0.051
		S_{10} 科学技术支出/(10^4 元)	反映对科技方面的资金投入水平	0.124
		S_{11} 专利授权量/件	反映沿海地区创新发展水平	0.088
		S_{12} 港口码头万吨级泊位数/个	反映沿海港口对外货运流通支撑水平	0.033
		S_{13} 工业废弃物综合利用率/%	反映生态环境治理响应能力	0.093
		S_{14} 沿海海滨观测台站分布/个	反映对滨海海区潮汐变化规律的监测水平	0.015
	政策调控支撑力	S_{15} 城市行政等级 ^①	侧面反映国家优惠政策倾斜水平	0.180
		S_{16} 城市规模等级 ^②		0.045
外界环境 综合施压力 Comprehensive pressure from external environment	土地利用干扰压力	P_1 土地利用强度	反映人类活动对土地资源的综合利用程度	0.036
		P_2 土地利用多样性	反映土地利用类型的复杂程度和有序程度	0.025
		P_3 土地景观破碎度	反映土地景观格局中的斑块形状复杂程度	0.030
	社会经济发展压力	P_4 人口密度/(人· km^2)	反映沿海地区人口聚集程度	0.085
		P_5 年末常住人口/ 10^4 人	反映沿海地区人口规模	0.031
		P_6 城镇化水平/%	反映地区产业经济发达水平, 城镇化水平越高, 土地经济需求压力越大	0.046
		P_7 地区生产总值/ 10^8 元	反映沿海地区整体经济实力	0.058
		P_8 货运总量/(10^4 t)	反映沿海地区经济发展活力	0.074
		P_9 客运总量/(10^4 人次)	反映沿海地区经济活动规模	0.056
		P_{10} 沿海港口货物吞吐量/(10^4 t)	反映沿海地区对外贸易规模	0.073
		P_{11} 外贸出口总额/(10^8 美元)	反映沿海地区生态环境污染力度	0.146
		P_{12} 工业固体废弃物产生量/(10^4 t)	反映海平面变化水平	0.074
		P_{13} 较常年平均海平面上升幅度/(10^{-3} m)	反映风暴潮灾害对农田的直接影响范围	0.071
	沿海灾害破坏压力	P_{14} 风暴潮灾害导致农田受灾面积/ km^2	反映风暴潮灾害的综合影响程度	0.122
		P_{15} 风暴潮灾害导致直接经济损失/(10^8 元)	反映台风灾害发生频度	0.037
		P_{16} 登陆热带气旋次数/次		

注：①沿海地区行政等级划分为直辖市、副省级城市、一般省会城市和地级市共 4 个级别，分别赋值为 10、5、3、1；②沿海地区规模等级按城区常住人口划分为超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市，分别赋值 5、3、1、1、1，并认为大城市规模及以下在政策倾斜上无差别。
Note: ①The administrative levels of the coastal areas are divided into four levels: municipalities, sub-provincial cities, general provincial capital cities, and prefecture-level cities, with values of 10, 5, 3, and 1 are assigned respectively; ②The scale levels of the coastal areas are divided into super cities, mega cities, large cities, medium cities and small cities according to the permanent population of the urban area, with values of 5, 3, 1, 1 and 1 are assigned respectively. And which think that there is no difference in policy tilt between large cities and below.

土地利用多样性指数主要借鉴 Shannon-Winter 指数^[32]，测度长三角沿海地区土地生态系统的有序程度，是用于判断土地系统结构变化或土地系统稳定性的指标，计算公式如下：

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \tag{2}$$

式中 i 为各土地利用类型； n 为土地利用类型数量； p_i 为各地类面积占总面积的比例。

土地景观破碎度反映人类开发行为对土地景观的干扰程度^[33]，指数值越大，表示斑块形状越不规整，形状越长，计算公式如下：

$$LSI = 0.25C/\sqrt{A} \tag{3}$$

式中 C 为景观中所有地类斑块的周长总和， km^2 ； A 为土地景观总面积， km^2 。

3. 2. 3 支撑力与施压力耦合协调度模型

通过对各指标进行标准化、权重确定、线性加权综合等计算获取各沿海地区的支撑力指数、施压力指数。其中，指标标准化采用极差变换法消除各原始数据在数量级及量纲上的差异，由于支撑力指标相对于支撑方而言是正向指标，施压力指标相对于施压方而言也是正向指标，故本文均采用正向指标标准化法实现对 2000 年、2010 年和 2018 年 11 个沿海地区 32 项指标，共计 1056 项原始数据的无量纲化处理，取值范围[0,1]；权重确定方面，为保证数据客观性，本研究运用熵权法分别确定支撑方和施压方各指标在 3 个年份的权重值，将其均值作为各指标的综合权重，熵权法可有效避免评价要素间信息杂糅与主观性人为判断的影响，计算结果具有较高的可信度，已被广泛应用与地理学、经济学及社会学等领

域研究中,其具体计算步骤详见参考文献^[34-35];进一步基于各方标准化值及相应权重采用线性加权法获取支撑力与施压力指数,计算公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n^s} S_{ij}' \times w_j^s \quad (4)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{n^p} P_{ij}' \times w_j^p \quad (5)$$

式中 S_i 、 P_i 分别表示第 i 个沿海地区的支撑力指数、施压力指数; S_{ij}' 、 w_j^s 、 P_{ij}' 、 w_j^p 分别表示第 i 个沿海地区在支撑方与施压方的第 j 项指标的标准化值及权重; n^s 、 n^p 表示支撑方和施压方的指标个数。

长三角沿海地区土地承载力是支撑方与施压方各要素之间相互配合、相互制约和相互支持的耦合互动的综合表征,其中,支撑方决定着相互作用的上限阈值,是沿海地区发展的空间载体,施压方主导着作用规模与强度,是沿海地区发展的核心,同时也为支撑方提供正向提升与调控的作用力,支撑方与施压方之间存在密切的耦合作用,由此借鉴耦合协调度模型^[36-38]测度两者之间的耦合程度与协调程度高低,计算公式如下:

$$C_i = 2 \times \frac{\sqrt{S_i \times P_i}}{(S_i + P_i)^2} \quad (6)$$

$$D_i = \sqrt{C_i \times T_i}, \quad T_i = \alpha S_i + \beta P_i \quad (7)$$

式中 C_i 、 D_i 分别表示第 i 个沿海地区支撑力与施压力的耦合度、协调度,且 $C_i \in [0,1]$ 、 $D_i \in [0,1]$; T_i 表示综合协调系数,反映支撑力与施压力对协调度的贡献, α 和 β 为待定系数,且 $\alpha + \beta = 1$,本研究认为支撑力和施压力同等重要,故取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 C_i 越高表征耦合度越佳, D_i 越高表征协调性越佳,借鉴相关研究成果并结合本研究区域实际,将耦合度类型划分为:①当 $C_i \in [0,0.3]$ 时,处于低耦合期,两者发展开始进行博弈,整体耦合水平较低,且当 $C_i = 0$ 时,支撑方与施压方之间处于不相关状态且向无序模式发展;②当 $C_i \in (0.3,0.5]$ 时,处于拮抗期,两者之间相互关联加强;③当 $C_i \in (0.5,0.8]$ 时,处于磨合期,两者间开始相互制衡、配合,呈良性耦合特征;④当 $C_i \in (0.8,1]$ 时,处于协调耦合期,两者间良性耦合特征强化并朝向有序方向发展,且当 $C_i = 1$ 时,呈良性共振耦合特征,且逐渐趋向新的有序结构。同时,将协调度类型划分为:①当 $D_i \in [0,0.2]$ 时,属严重失调型;②当 $D_i \in (0.2,0.4]$ 时,属中度失调型;③当 $D_i \in (0.4,0.6]$ 时,属基本协调型;④当 $D_i \in (0.6,0.8]$ 时,属中度协调型;⑤当 $D_i \in (0.8,1]$ 时,属高度协调型。

2.2.4 土地承载力指数及其分区模型

进一步将支撑力指数与施压力指数的比值作为土地承载力指数 (BCI_i), 计算公式如下:

$$BCI_i = \frac{S_i}{P_i} \quad (8)$$

承载力水平的不断提升也反映出两方从低级共生向高级耦合协调转变的过程,除理论上的 $BCI_i < 1$ 、 $BCI_i = 1$

和 $BCI_i > 1$ 三种状态 (分别表征超载、平衡和盈余) 外,为进一步厘清超载或盈余程度,借鉴已有研究成果^[6]中对承载临界值的划分,将土地承载力定义为 $[0,P)$ 、 $[P,1)$ 、 $(1,P^{1/2})$ 、 $[P^{1/2},P^1)$, 分别表示超载高值区、超载低值区、盈余低值区、盈余高值区。 BCI_i 取值越大,土地承载状态愈好,当处于超载高值区时应予以及时预警。

3 结果与分析

3.1 长三角沿海地区土地支撑力、施压力分异特征

3.1.1 支撑力与施压力时序变化特征

基于对 2000 年、2010 年和 2018 年 11 个沿海地区各要素评价结果的加权综合,获取对应年份长三角沿海区域总体的 6 类评价要素、支撑力及施压力指数测度值,如图 2 所示:1) 长三角沿海区域各年份的土地施压力均高于支撑力,始终处于超载状态。其中,支撑力指数呈现先增后降的波动式上升趋势,近 19 a 累计提升 0.48,于 2010 年支撑水平达到最高,为 2.90;施压力指数呈现先降后增的波动式下降趋势,研究时段内累计下降 0.15,于 2010 年施压水平达到最低,为 3.16。2) 在支撑力方面,发展建设投入支撑力明显高于土地资源本底支撑力与政策调控支撑力,且后两者除 2010 年土地资源本底支撑力指数值为 0.61 外,其余指数测度值均介于 0.40~0.50 之间。3) 在施压力方面,3 类要素存在明显差异,测度均值由低到高依次表现为土地利用干扰压力、沿海灾害破坏压力与社会经济压力。其中,土地利用干扰压力指数整体表现最低且呈微弱波动上升趋势;沿海灾害破坏压力指数表现次之,经历先降后增的波动式下降趋势,2000 年至 2010 年下降幅度为 0.56,2010 年至 2018 年提升幅度为 0.35;社会经济发展压力指数整体呈现较高水平,总体增长 0.04。

长三角 11 个沿海地区各要素测度结果见表 2:1) 在评价要素差异方面,6 类要素测度值范围均介于 0~0.60 之间,其中,由于上海市表现出较高的发展建设投入力以及社会经济施压力,其测度均值为 0.57,故整体最大边界值扩展至 0.60,除此之外,其他评价要素最高值仅为 0.30;土地资源本底支撑力、发展建设投入支撑力、政策调控支撑力、土地利用干扰压力、社会经济发展压力和沿海灾害破坏力各要素在 3 个年份各地区的综合均值分别为 0.05、0.16、0.04、0.04、0.14、0.12,其中,发展建设投入支撑力与社会经济发展压力分别居支撑方与施压方的首位。2) 在城市间对比差异方面,上海市各要素指数值明显高于其他城市,尤其体现在发展建设投入支撑力、政策调控支撑力和社会经济发展压力 3 方面,这与上海市自身地处长三角城市群龙头与核心地位有关,其在产业结构优化、吸引外资、科技教育支出、港口码头建设以及国家政策导向支持等方面均呈现较强优势作用,与此同时,也伴随较高的人口规模、城镇化水平、地区生产总值、港口货物吞吐量及外贸出口总额等压力作用;各地区针对同类评价要素,在土地利用干扰压力指数上表现出较强的一致性,政策调控支撑力指数次之,其余要素波动范围较为分散。3) 在时序差异方面,各要素波动趋势各异,其中,政策调控支撑力与土地利

用干扰压力指数波动甚微, 11 个地区在各年份基本维持同一水平; 其次表现为土地资源本底支撑力与社会经济发展压力指数, 仅嘉兴、杭州、宁波与台州在各年份存

在微弱浮动, 其余地区指数值基本保持一致; 发展建设投入支撑与沿海灾害破坏压力指数处于无序状态, 在各年份波动较强, 尚无明显规律。

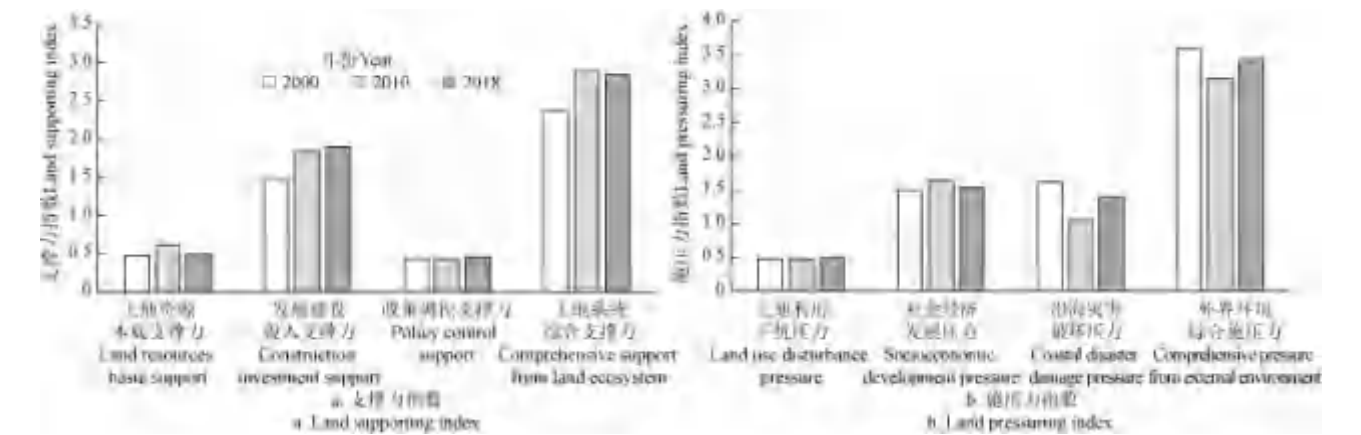


图2 长三角沿海地区土地承载力评价要素、支撑力与施压力指数

Fig.2 Evaluation factors, supporting and pressuring index of land carrying capacity in coastal area of the Yangtze River Delta

表2 2000—2018 年长三角沿海地区各类土地承载力评价要素

Table 2 Evaluation factors of land carrying capacity in coastal area of the Yangtze River Delta from 2000 to 2018

城市 City	土地资源本底支撑力 Land resources basic support			发展建设投入支撑力 Construction investment support			政策调控支撑力 Policy control support			土地利用干扰压力 Land use disturbance pressure			社会经济发展压力 Socioeconomic development pressure			沿海灾害破坏压力 Coastal disaster damage pressure		
	2000	2010	2018	2000	2010	2018	2000	2010	2018	2000	2010	2018	2000	2010	2018	2000	2010	2018
连云港	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06	0.07	0	0	0	0.06	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.50	0.11	0.05
盐城	0.04	0.05	0.05	0.06	0.14	0.17	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.06	0.05	0.07	0.09	0.07	0.03
南通	0.02	0.02	0.02	0.05	0.08	0.08	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.10	0.12	0.11	0.13	0.07	0.00
上海	0.17	0.18	0.16	0.56	0.56	0.57	0.23	0.23	0.23	0.04	0.05	0.05	0.52	0.60	0.58	0.10	0.01	0.12
嘉兴	0.02	0.04	0.01	0.11	0.18	0.11	0	0	0	0.05	0.06	0.02	0.05	0.06	0.04	0.07	0.09	0.14
杭州	0.06	0.09	0.08	0.12	0.20	0.21	0.10	0.10	0.10	0.05	0.04	0.05	0.16	0.18	0.15	0.07	0.09	0.17
绍兴	0.03	0.03	0.03	0.07	0.12	0.10	0.00	0.00	0.02	0.05	0.05	0.05	0.07	0.06	0.04	0.07	0.09	0.14
宁波	0.04	0.06	0.04	0.15	0.18	0.24	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.06	0.30	0.25	0.22	0.11	0.09	0.24
舟山	0.02	0.02	0.01	0.09	0.11	0.12	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.07	0.11	0.09	0.17
台州	0.02	0.05	0.03	0.09	0.11	0.09	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.06	0.09	0.07	0.20	0.14	0.17
温州	0.03	0.03	0.03	0.12	0.12	0.13	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.10	0.09	0.11	0.15	0.21	0.14

长三角 11 个沿海地区支撑力、施压力评价结果见表 3: 1) 在支撑力方面, 上海、杭州和宁波支撑力水平明显高于其他城市, 且不同城市呈现不同变化趋势, 其中, 连云港、盐城、绍兴、宁波和温州呈持续上升趋势; 南通、杭州和台州呈先增后降的波动式上升趋势; 上海与嘉兴总体呈下降趋势。2) 在施压力方面, 上海和宁波、杭州施压力程度明显高于其他城市, 且不同城市变化趋势各异, 其中, 连云港、盐城、南通施压力呈持续减弱趋势, 其余城市呈现持续式或波动式压力增强趋势。综合来看, 长三角 11 个沿海地区中, 仅上海和杭州在各年份的支撑力均大于施压力, 盐城和嘉兴部分年份的支撑力大于施压力之外, 其余城市在各年份的支撑力均小于施压力, 经进一步统计, 在 2000 年、2010 年和 2018 年的累计 33 个沿海地区样本中, 仅有 9 个地区的土地承载力指数大于 1, 即研究区整体土地支撑-施压系统呈现为 27.3% 的盈余状态, 长三角土地资源系统长期处于高压发展状态。

表3 2000—2018 年长三角沿海地区土地支撑力与施压力指数

Table 3 Land supporting and pressuring index in coastal area of the Yangtze River Delta from 2000 to 2018

城市 City	土地系统综合支撑力 Comprehensive support from land ecosystem			外界环境综合施压力 Comprehensive pressure from external environment		
	2000 年	2010 年	2018 年	2000 年	2010 年	2018 年
连云港	0.08	0.10	0.10	0.60	0.23	0.17
盐城	0.12	0.22	0.24	0.19	0.15	0.14
南通	0.10	0.13	0.12	0.24	0.20	0.13
上海	0.95	0.96	0.95	0.66	0.65	0.75
嘉兴	0.13	0.22	0.12	0.18	0.21	0.21
杭州	0.28	0.40	0.39	0.28	0.31	0.38
绍兴	0.09	0.15	0.16	0.19	0.20	0.24
宁波	0.21	0.25	0.31	0.47	0.40	0.52
舟山	0.11	0.13	0.13	0.19	0.19	0.29
台州	0.13	0.18	0.15	0.29	0.27	0.30
温州	0.17	0.17	0.18	0.29	0.34	0.30

3.1.2 支撑力与施压力空间变化特征

将支撑力与施压力测算结果通过 ArcGIS10.5 软件与矢量行政区划进行空间链接, 形成对应年份长三角沿海地区土地支撑力与施压力空间分布图 (图 3)。1) 支撑

力空间分布方面,各年份最大测度值基本一致,分别为0.95、0.96、0.95。其中,上海、杭州及宁波分别始终处于各年份最高值区、次高值区及第三高值区,连云港市和南通市始终均处于最低值区,台州市始终处于次低值区,其余5座城市在3个年份发生了区间改变,表现为低-高-高、低-高-低、高-低-低3种演变类型。2)施压力空间分布方面,各年份最大测度值呈现由略微减弱向快速增强方向转变,分别为0.66、0.65、0.75。其中,上海

和杭州分别始终处于各年份最高值区、次高值区,杭州、台州和温州始终均处于各年份的第三高值区,盐城市始终处于最低值区,其余5座城市在3个年份发生了区间改变,表现为低-高-高、高-低-低、高-高-低3种演变类型。综合来看,上海市和杭州市在各时期的支撑力与施压力水平均未发生变化,其余城市在支撑力与施压力水平上则呈现出等级的持续上升、持续下降或升降交替变化趋势。

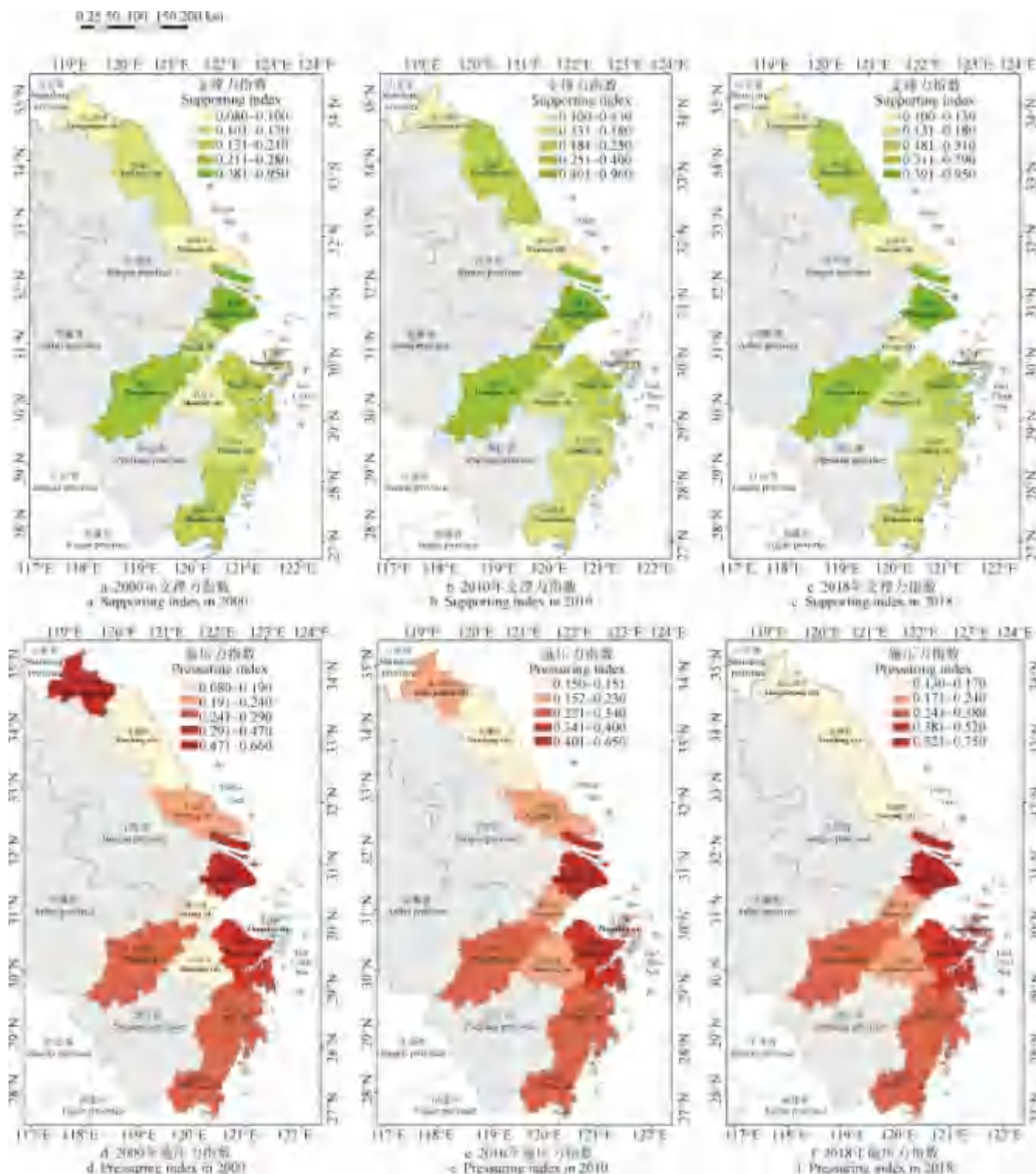


图3 长三角沿海地区土地支撑力与施压力时空分布

Fig.3 Spatial-temporal distribution of land supporting and pressing in coastal area of the Yangtze River Delta

3.2 长三角沿海地区土地支撑-施压耦合协调关系分异特征

3.2.1 支撑-施压耦合协调度时序变化特征

基于公式(6)和(7)测算出的长三角沿海地区土地支撑-施压耦合度、协调度结果见表4。

表4 长三角沿海地区土地支撑-施压耦合度及协调度时序变化
Table 4 Temporal variation of land coupling degree and coordination degree in coastal area of the Yangtze River Delta

城市 City	土地耦合度 Land coupling degree			土地协调度 Land coordination degree		
	2000年	2010年	2018年	2000年	2010年	2018年
连云港	0.64	0.91	0.97	0.47	0.39	0.37
盐城	0.98	0.99	0.96	0.39	0.43	0.43
南通	0.90	0.97	1.00	0.39	0.40	0.35
上海	0.98	0.98	0.99	0.89	0.89	0.92
嘉兴	0.99	1.00	0.97	0.39	0.46	0.40
杭州	1.00	0.99	1.00	0.53	0.59	0.62
绍兴	0.94	0.99	0.98	0.36	0.42	0.44
宁波	0.92	0.98	0.96	0.56	0.56	0.63
舟山	0.96	0.98	0.93	0.38	0.39	0.44
台州	0.92	0.98	0.94	0.44	0.47	0.46
温州	0.96	0.94	0.97	0.47	0.49	0.49

耦合度方面,除2000年连云港市耦合度表现为0.64以外,其余城市均介于0.90~1.00之间,各城市间变化较为稳定,且各年份间波动较弱。参照对耦合度C的类型分区,土地支撑-施压耦合度介于0.90~1.00之间的沿海地区总体占比为97%,其均处于协调耦合期,表现为支撑方和施压方两系统间的良性耦合关系且逐渐朝向有

序状态演化。协调度方面,与耦合度变化特征差异显著,其测度值均低于同期耦合度值,除上海市表现出较高的协调水平外,其均值达0.90,其余城市协调度主要维持在0.30~0.60范围之内,整体表现为各城市间曲线变化幅度较大,且各年份间振幅较耦合度更加明显。

3.2.2 支撑-施压耦合协调度空间变化特征

因长三角各沿海地区的土地支撑-施压耦合状态基本全部处于协调耦合期,空间差异特征不明显,故此处仅将协调度测算结果通过ArcGIS10.5软件与矢量行政区划进行空间链接,形成对应年份长三角沿海地区土地支撑-施压协调度空间分布图(图4)。参照对协调度D的类型分区,本研究结果主要涵盖中度失调型、基本协调型、中度协调型、高度协调型4种类型,分别标记为D₁、D₂、D₃、D₄。其中,长三角沿海区域整体始终处于基本协调型,但协调度D均值呈现持续上升趋势,由0.480提升到0.504。各城市间变化趋势各异,上海市始终属于高度协调型D₄,杭州和宁波分别由基本协调型D₂演变为中度协调型D₃,台州和温州始终处于基本协调型D₂,南通始终处于中度失调性D₁,连云港、盐城、嘉兴、绍兴、舟山分别经历了D₂-D₁-D₁、D₁-D₂-D₂、D₁-D₂-D₁、D₁-D₂-D₂、D₁-D₁-D₂的4种演变模式。从省际差异上看,江苏省以中度失调型居多,浙江省以基本协调型居多,可归纳为“北低南高”的空间格局,并呈现由南北两侧逐渐向上海市进行高值汇聚的态势。

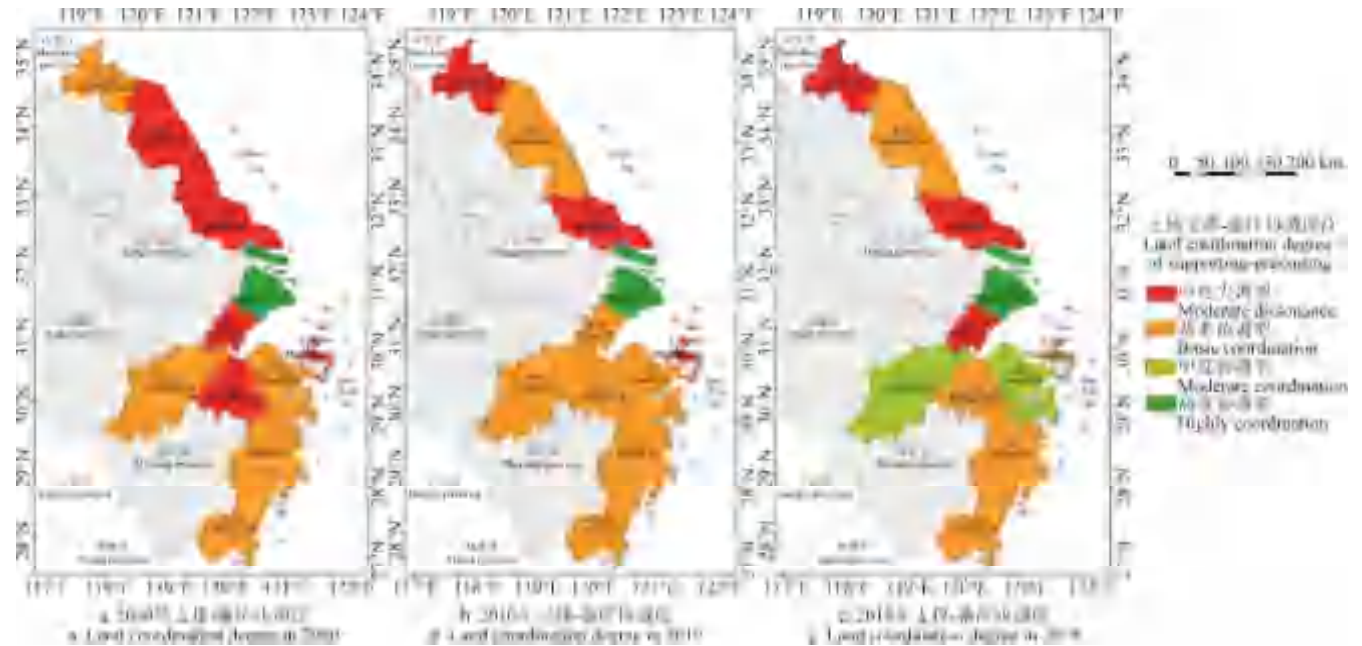


图4 长三角沿海地区土地支撑-施压协调度时空分布
Fig.4 Spatial-temporal distribution of land coordination degree in coastal area of the Yangtze River Delta

3.3 长三角沿海地区土地承载力分异特征与演变规律

基于公式(8)测算的土地承载力结果如图5所示:长三角沿海区域整体土地承载力指数经历了由0.66到0.83的波动式上升趋势,但始终小于1,且各时期沿海地区土地承载力取值范围均介于0~1.80之间,表明长三角沿海区域整体承载力水平始终处于超载但超载程

度趋于减弱,且各时期均存在土地超载与盈余并存的地区发展状态。各地区土地承载水平特征各异,其中,仅上海市和杭州市承载力指数始终大于1,嘉兴于2010年以及盐城市于2010年和2018年的承载力指数大于1之外,其余地区在各时期均小于1,即多数地区处于超载状态。

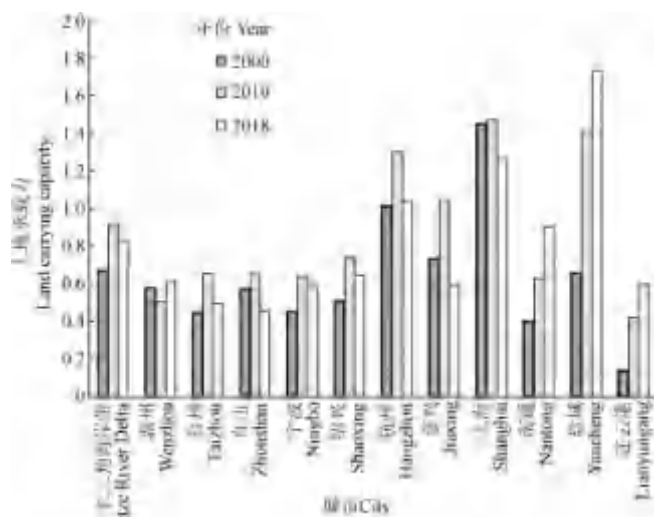


图5 长三角沿海地区土地承载力时序变化

Fig.5 Temporal variation of land carrying capacity in coastal area of the Yangtze River Delta

进一步将土地承载力测算结果通过 ArcGIS10.5 软件与矢量行政区划进行空间链接, 参照公式 (8) 中对具体承载临界值及承载力分区的定义, 形成对应年份长三角沿海地区土地承载空间分布图 (图 6)。1) 时间维度上, 2000 年土地承载力分区包含盈余高值区、盈余低值区、超载低值区和超载高值区 4 种状态, 分别标记为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 , 而 2010 年与 2018 年仅包含 B_1 、 B_2 、 B_3 3 种状态。2) 空间维度上, 连云港和宁波由显著的 B_4 状态转变为 B_3 状态, 承载力水平在一定程度上实现稳步提升, 但仍未脱离超载状态; 上海和杭州在 3 个年份始终分别处于 B_1 、 B_2 状态; 盐城承载力水平明显提升, 已摆脱超载状态, 且目前处于稳定的 B_2 状态; 南通、绍兴、舟山、台州、温州始终处于 B_3 状态。3) 综合分析, 长三角沿海区域整体主要经历了 B_4 - B_3 - B_3 、 B_3 - B_2 - B_2 、 B_3 - B_2 - B_3 的三种演变模式, 且空间上表现为江苏省“南北超载中部盈余”、上海市“全域盈余”以及浙江省“北部盈余南部超载”的格局特征。

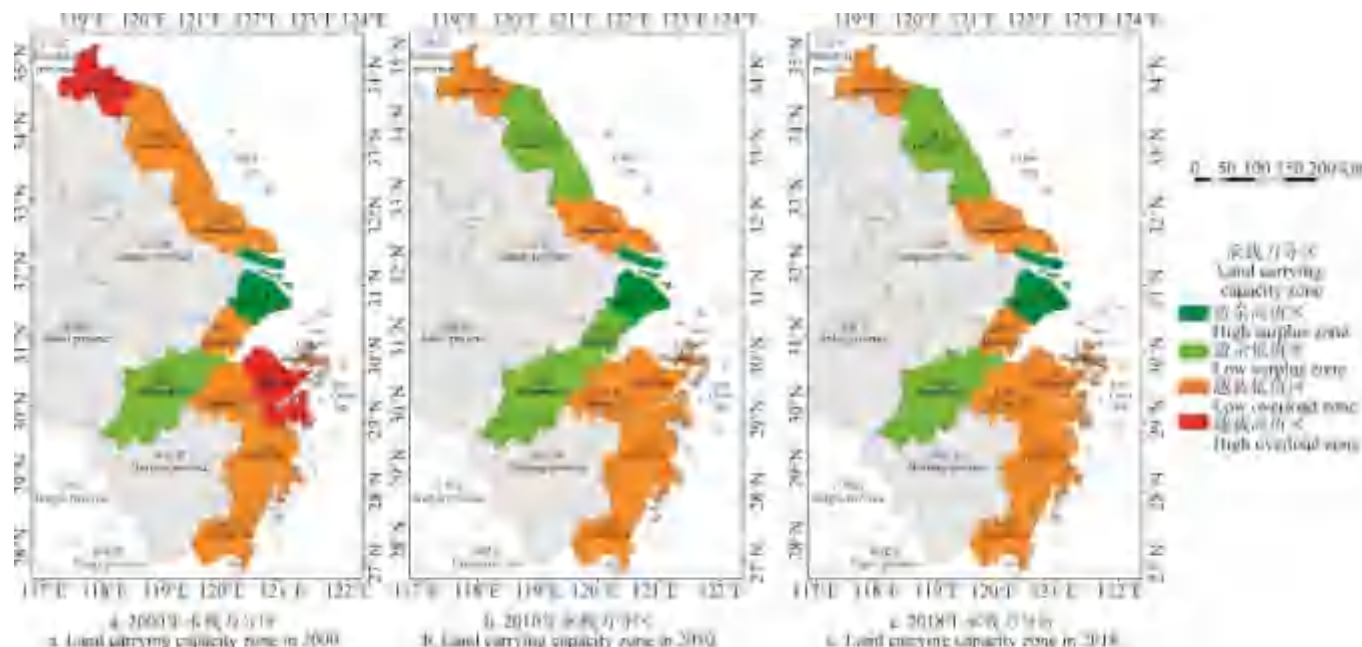


图6 长三角沿海地区土地承载力时空分布

Fig.6 Spatial-temporal distribution of land carrying capacity in coastal area of the Yangtze River Delta

4 结论与讨论

以长三角 11 个沿海地区作为研究对象, 从支撑方和施压方 2 个维度构建沿海地区土地承载力评价指标体系, 借助遥感影像解译数据及社会经济统计数据, 运用熵值法、耦合协调度模型与土地承载力指数模型, 探讨了长三角沿海地区在 2000 年、2010 年及 2018 年土地承载力水平的时空演变特征, 进一步剖析了支撑-施压耦合协调关系, 研究结果表明:

1) 长三角沿海区域各年份综合施压力均高于支撑力, 始终处于超载状态, 且支撑力指数与施压力指数分别呈现波动式上升、波动式下降趋势。在支撑类评价要素上, 发展建设投入支撑力明显高于土地资源本底支撑

力与政策调控支撑力; 在施压类评价要素上, 测度均值由低到高依次表现为土地利用干扰压力、沿海灾害破坏压力与社会经济发展压力。

2) 在各时期共计 33 个沿海地区样本中, 有 9 个地区土地承载力指数大于 1, 沿海地区盈余状态占比 27.3%。其中, 上海市和杭州市在各时期的支撑力与施压力水平均未发生变化, 其余地区在支撑力与施压力水平上则呈现出等级的持续上升、持续下降或升降交替变化趋势。

3) 长三角沿海地区耦合度介于 0.9~1.0 之间的区域占比为 97%, 其均处于协调耦合期; 土地支撑-施压协调度涵盖中度失调型、基本协调型、中度协调型、高度协调型 4 种类型, 其中, 江苏省以中度失调型居多, 浙江省以基本协调型居多, 形成“北低南高”的空间格局, 并

呈现由南北两侧逐渐向上海市进行高值汇聚的态势。

4) 长三角沿海区域整体承载力水平始终处于超载但超载程度趋于减弱, 且各时期均存在土地超载与盈余并存的地区发展状态; 空间上呈现出江苏省“南北超载中部盈余”、上海“全域盈余”以及浙江省“北部盈余南部超载”的格局特征。

本文构建的基于支撑方-施压方视角的沿海地区土地承载力评价指标体系可作为对当前已有评价类研究成果的一种探索性补充, 尤其在当前长江三角洲城市群发展格局定位背景下, 加深对长三角沿海发展带土地承载力变化过程的全面认识。本文综合考虑沿海地区区别于内陆地区的沿海性、开放性、脆弱性等特征, 从土地资源本底、发展建设投入、政策调控、人类开发活动、沿海灾害破坏等因素进行时空探测, 由于各地区资源禀赋存在区域差异且相关指标数量众多复杂, 故选取的量化指标还有待进一步完善与补充, 如可将远程贸易、人类行为轨迹、旅游开发等因素纳入统筹考虑。进一步可构建沿海地区土地承载力融合画像评价平台, 通过对多源异构数据进行汇聚整合活化, 实现对长时间序列沿海地区土地承载力画像的动态追踪、关联分析与规律挖掘, 基于数字化与系统的平台运行, 可辅助对沿海地区发展过程中薄弱环节的自主检测, 满足实用化与业务化的发展建设需求, 并为土地资源优化配置提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 朱诚, 姜逢清, 吴立, 等. 对全球变化背景下长三角地区城镇化发展科学问题的思考[J]. 地理学报, 2017, 72(4): 633—645.
Zhu Cheng, Jiang Fengqing, Wu Li, et al. On the problems of urbanization in the Yangtze River Delta under the background of global change[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(4): 633—645. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王书华, 毛汉英, 赵明华. 略论土地综合承载力评价指标体系的设计思路: 我国沿海地区案例分析[J]. 人文地理, 2001, 16(4): 57—61.
Wang Shuhua, Mao Hanying, Zhao Minghua. Thinking on the index system design to the land comprehensive carrying capacity: A case study of coastal region of China[J]. Human Geography, 2001, 16(4): 57—61. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
Yu Guanghua, Sun Caizhi. Land carrying capacity spatiotemporal differentiation in the Bohai Sea Coastal Areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4860—4870. (in Chinese with English abstract)
- [4] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379—395.
Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: From theory to practice[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379—395. (in Chinese with English abstract)
- [5] 叶菁, 谢巧巧, 谭宁焱. 基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 262—271.
Ye Jing, Xie Qiaoqiao, Tan Ningyan. National land spatial pattern distribution method based on ecological carrying capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 262—271. (in Chinese with English abstract)
- [6] 靳亚亚, 靳相木, 李陈. 基于承压施压耦合曲线的城市土地承载力评价: 以浙江省 32 个城市为例[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1087—1099.
Jin Yaya, Jin Xiangmu, Li Chen. Applying supporting-pressure coupling curve to the evaluation of urban land carrying capacity: The case study of 32 cities in Zhejiang province[J]. Geographical Research, 2018, 37(6): 1087—1099. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙才志, 张坤领, 邹玮, 等. 中国沿海地区人海关系地域系统评价及协同演化研究[J]. 地理研究, 2015, 34(10): 1824—1838.
Sun Caizhi, Zhang Kunling, Zou Wei, et al. Study on regional system of man-sea relationship and its synergetic development in the coastal regions of China[J]. Geographical Research, 2015, 34(10): 1824—1838. (in Chinese with English abstract)
- [8] Malthus T R. An Essay on the Principle of Population[M]. London: St. Paul's Church-Yard, 1798.
- [9] Bernard F E, Thom D J. Population pressure and human carrying capacity in selected locations of Machakos and Kitui Districts[J]. The Journal of Developing Areas, 1981, 15(3): 381—406.
- [10] Park R F, Burgess E W. Introduction to the Science of Sociology[M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1921.
- [11] FAO. Potential Population Supporting Capacities of Lands in the Developing World[M]. Rome: FAO, 1982: 23—27.
- [12] UNESCO & FAO. Carrying Capacity Assessment with A Pilot Study of Kenya: A Resource Accounting Methodology for Exploring National Options for Sustainable Development[M]. Paris and Rome: UNESCO & FAO, 1985.
- [13] 靳相木, 李陈. 土地承载力研究范式的变迁、分化及其综论[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 526—540.
Jin Xiangmu, Li Chen. Paradigm shift in the study of land carrying capacity: An overview[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 526—540. (in Chinese with English abstract)
- [14] 高晓路, 陈田, 樊杰. 汶川地震灾后重建地区的人口容量分析[J]. 地理学报, 2010, 65(2): 164—176.
Gao Xiaolu, Chen Tian, Fan Jie. Population capacity in the Wenchuan earthquake reconstruction areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(2): 164—176. (in Chinese with English abstract)
- [15] 任守德, 付强, 王凯. 基于宏微观尺度的三江平原区域农业水土资源承载力[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 8—14.
Ren Shoude, Fu Qiang, Wang Kai. Regional agricultural water and soil resources carrying capacity based on macro-micro scale in Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 8—14. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王亮, 刘慧. 基于 PS-DR-DP 理论模型的区域资源环境承载力综合评价[J]. 地理学报, 2019, 74(2): 340—352.

- Wang Liang, Liu Hui. The comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(2): 340—352. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘兆德, 虞孝感. 长江流域相对资源承载力与可持续发展研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(1): 10—15.
- Liu Zhaode, Yu Xiaogan. Carrying capacity of resources and problems of sustainable development in Yangtze Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(1): 10—15. (in Chinese with English abstract)
- [18] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441—469.
- [19] 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[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 319—324.
- Jiang Qiuxiang, Fu Qiang, Wang Zilong. Comprehensive evaluation of regional land resources carrying capacity based on projection pursuit model optimized by particle swarm optimization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(11): 319—324. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘桂春, 韩增林. 在海陆复合生态系统理论框架下: 浅谈人地关系系统中海洋功能的介入[J]. *人文地理*, 2007, 22(3): 51—55.
- Liu Guichun, Han Zenglin. In the theory framework of the sea-land compound ecosystem: On the interposition of marine function into the sea-land system[J]. *Human Geography*, 2007, 22(3): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等. 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[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5893—5904.
- Wei Chao, Ye Shufeng, Guo Zhongyang, et al. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: A case in Nantong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5893—5904. (in Chinese with English abstract)
- [22] 段佩利, 刘曙光, 尹鹏, 等. 中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系[J]. *经济地理*, 2018, 38(5): 60—67.
- Duan Peili, Liu Shuguang, Yin Peng, et al. Spatial-temporal coupling coordination relationship between development strength and resource environmental bearing capacity of coastal cities in China[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(5): 60—67. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杜元伟, 周雯, 秦曼, 等. 基于网络分析法的海洋生态承载力评价及贡献因素研究[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(6): 899—906.
- Du Yuanwei, Zhou Wen, Qin Man, et al. Carrying capacity evaluation and contribution factor research for marine ecology based on analytic network process[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(6): 899—906. (in Chinese with English abstract)
- [24] 苏岫, 索安宁, 宋德瑞, 等. 基于遥感的长江经济带邻近海域滩涂生态承载力评估[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(4): 528—536.
- Su Xiu, Suo Anning, Song Derui, et al. Ecological carrying capacity assessment of tidal flat in the Yangtze River Economic Belt by remote sensing[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4): 528—536. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李伟芳, 陈阳, 马仁峰, 等. 发展潜力视角的海岸带土地利用模式: 以杭州湾南岸为例[J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1061—1073.
- Li Weifang, Chen Yang, Ma Renfeng, et al. Land-use pattern in coastal zone from the perspective of development potentiality: A case study of the southern bank of Hangzhou Bay[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1061—1073. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287—301.
- [27] 高超, 汪丽, 陈财, 等. 海平面上升风险中国大陆沿海地区人口与经济暴露度[J]. *地理学报*, 2019, 74(8): 1590—1604.
- Gao Chao, Wang Li, Chen Cai, et al. Population and economic risk exposure in coastal region of China under sea level rise[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1590—1604. (in Chinese with English abstract)
- [28] 狄乾斌, 韩帅帅, 韩增林. 中国地级以上城市经济承载力的空间格局[J]. *地理研究*, 2016, 35(2): 337—352.
- Di Qianbin, Han Shuaishuai, Han Zenglin. Spatial pattern of economic carrying capacity of cities at prefecture level and above in China[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 337—352. (in Chinese with English abstract)
- [29] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 105—111.
- Zhuang Dafang, Liu Jiyan. Study on regional differentiation model of land use level in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 105—111. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2173—2187.
- Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of ecoenvironmental effect of land use change in China[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2173—2187. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈万旭, 李江风, 冉端. 长江中游城市群土地利用转型和城镇化之间的空间关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1036—1048.
- Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Ran Duan. On the spatial relationship between land use transition and urbanization in the middle Yangtze River Urban Cluster[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1036—1048. (in Chinese with English abstract)
- [32] Trinci K, Pham T, Turner S. Mapping mountain diversity: Ethnic minorities and land use land cover change in Vietnam's borderlands[J]. *Land Use Policy*, 2014, 41: 484—497.
- [33] 王曼曼, 吴秀芹, 吴斌, 等. 盐池北部风沙区乡村聚落空间格局演变分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 260—271.
- Wang Manman, Wu Xiuqin, Wu Bin, et al. Evolution analysis of spatial pattern of rural settlements in sandy area of northern Yanchi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(8): 260—271. (in Chinese with English abstract)

- [34] 高强, 刘韬, 王妍, 等. 海洋生态经济系统协调发展评价研究: 以海南省为例[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(4): 568—574.
Gao Qiang, Liu Tao, Wang Yan, et al. Research on coordinated development of marine ecological-economic system-taking Hainan province as an example[J]. Marine Environmental Science. 2019, 38(4): 568—574. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王晓青, 史文娇, 孙晓芳, 等. 黄淮海高标准农田建设项目综合效益评价及区域差异[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 238—248.
Wang Xiaoqing, Shi Wenjiao, Sun Xiaofang, et al. Comprehensive benefit evaluation and regional differences of construction projects of well-facilitated farmland in Huang-Huai-Hai region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 238—248. (in Chinese with English abstract)
- [36] 马聪, 刘黎明, 任国平, 等. 快速城镇化地区农户生计策略与土地利用行为耦合协调度分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 249—256.
Ma Cong, Liu Liming, Ren Guoping, et al. Analysis of coupling coordination degree between livelihood strategies and land use behavior of farmers in rapid urbanization area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 249—256. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张慧, 苏航, 薛睿, 等. 省域土地人口经济多维协调格局及分区发展策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 262—270.
Zhang Hui, Su Hang, Xue Rui, et al. Multidimensional coordination pattern of provincial land population economy and its zoning development strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(21): 262—270. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张引, 杨庆媛, 闵婕. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 817—828.
Zhang Yin, Yang Qingyuan, Min Jie. An analysis of coupling between the bearing capacity of the ecological environment and the quality of new urbanization in Chongqing[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 817—828. (in Chinese with English abstract)

Measurement and coupling analysis of land carrying capacity of coastal areas in the Yangtze River Delta

Wang Manman^{1,2}, Zhang Hongyan^{3*}, Zhang Youguang¹, Lin Mingsen¹, Gong Peng²

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Economics, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Understanding the difference in land carrying capacity and its evolution in coastal areas in the Yangtze River Delta is important for optimally allocating its land resources and sustaining its social and economic development. This paper presents an evaluation index system for calculating the land carrying capacity of these areas using the support-pressure concept. We analyzed the spatiotemporal change in land carrying capacity of 11 coastal areas in the delta in 2000, 2010 and 2018, using a combination of the entropy model, the coupling coordination-degree model and the land capacity carry model. The data used in the models were obtained from remote sensing image interpretation and the national socioeconomic statistics database. The evaluation index system could be used to complement the existing evaluation research results, especially in the context of the development model of the Yangtze River Delta urban agglomeration. It could further improve our understanding of the evolutionary change in land carrying capacity in the coastal areas. Our results indicated that: 1) The coastal areas were overloaded in all three years, with the stress imposed to the lands more than what the lands could support. The supporting force index had been wavyly increased while the pressure index had been in decline over the three years. In terms of support evaluation factors, the “construction investment support” was significantly higher than the “land resources basic support” and “policy control support”. In terms of evaluation factors for pressure, the mean measurement values were ranked in “land use disturbance pressure” < “coastal disaster damage pressure” < “socioeconomic development pressure”. 2) Among the total 33 coastal areas sampled in each of the three years, nine areas had a land carrying capacity index > 1, indicating that the surplus status of the coastal areas accounted for 27.3%. The support and pressure levels remained unchanged for Shanghai and Hangzhou, but for other areas they showed continuous rise, decline, or alternate rise and fall. 3) Areas with coupling degree between 0.9 and 1.0 accounted for 97% of the total areas, all incoordinated coupling period. The land support-pressure coordination degree had four types: moderately imbalanced, basically coordinated, moderately coordinated and highly coordinated. Spatially, most coordination types in Jiangsu were moderately imbalanced, and Zhejiang were dominated by basically coordinated with a spatial pattern of “low in north and high in south”. The coastal areas had formed a spatial pattern that converged toward Shanghai in all directions. 4) The land carrying capacity of all coastal areas in the Yangtze River Delta was overloaded, but the degree of the overload appeared to have been weakening. The studied areas in each of the three years were in a state with overload and surplus coexisting. The capacity showed a spatial pattern of “overload in south-north and surplus in center” in Jiangsu province, “global surplus” in Shanghai, and “surplus in north and overload in south” in Zhejiang province. The spatial variation of land carrying capacity in the coastal areas in the Yangtze River Delta showed that the capacity in 2000 could be divided into four states: high surplus, low surplus, low overload and high overload, while in 2010 and 2018 there were only three states.

Keywords: coastal area; land carrying capacity; coupling degree; coordination degree; Yangtze River Delta