

基于 ESDA-GIS 的广东省耕地生态承压能力 时空特征研究

陈士银¹, 宾津佑^{1,2}, 蔡世煜¹

(1.广东海洋大学 管理学院, 广东 湛江 524088; 2.广东沿海经济带发展研究院, 广东 湛江 524088)

摘 要:为保障粮食安全和耕地生态安全可持续发展,以粮食调入、人口迁入大省,同时也是全国耕地面积减少幅度最大的区域——广东省为例,运用“国家 hm²”概念下的生态足迹模型以及 ESDA-GIS 分析方法,对传统模型中的产量因子进行修正,探究了 2008—2017 年广东省耕地生态承压能力的时空变化特征。结果表明:(1) 2008—2017 年广东省耕地生态足迹、耕地生态承载力在研究期内总体呈“雁行”波动下降趋势,耕地生态供给出现持续赤字,广东省耕地承压能力指数介于 0.500~0.520,处于弱不可持续的状态。(2) 研究期间内广东省各地级市耕地生态承压能力指数介于 0.440~0.600,耕地生态承压类型均以弱不可持续和弱可持续类型为主,耕地生态承压能力负荷严重。(3) 广东省各地级市耕地生态承压能力呈不均衡分布,且在空间分布上存在着显著正向空间自相关性,但空间集聚态势有所减弱;Moran 散点图表明广东省各地级市耕地生态承压能力在空间分布上存在高一高或低一低集聚现象。总之,广东省耕地生态承载能力不容乐观,且耕地资源区域禀赋差异明显,因地制宜、分区管控、高效利用是其主要发展方向。

关键词:耕地生态承压能力;生态足迹;时空特征;ESDA-GIS;广东省

中图分类号:F301.21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0358-08

Study on Spatiotemporal Characteristics of Cultivated Land Ecological Pressure-Bearing Capacity in Guangdong Province Based on ESDA-GIS

CHEN Shiyin¹, BIN Jinyou^{1,2}, CAI Shiyu¹

(1.College of Management, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;

2.Guangdong Coastal Economic Belt Development Research Institute, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

Abstract: In order to guarantee food security and sustainable development of ecological security of cultivated land, taking Guangdong Province with large introduction of grain food and population as an example, which is also the region with the largest reduction in cultivated land area in China, we used ESDA-GIS analysis method and ecological footprint model under the concept of ‘national hectare’ to revise the yield factors in the traditional model, and explored the spatiotemporal variation characteristics of cultivated land ecological pressure-bearing capacity in Guangdong Province from 2008 to 2017. The results show that: (1) during the study period, the ecological footprint and ecological carrying capacity of cultivated land in Guangdong Province generally showed the downward trend with the flying geese-type fluctuation, and the ecological supply of cultivated land showed the continuous deficit; the index of cultivated land pressure capacity in Guangdong Province was between 0.500 and 0.520, which was in a weak and unsustainable state; (2) from 2008 to 2017, the indexes of cultivated land ecological pressure capacity of all prefecture-level cities in Guangdong Province ranged from 0.440 to 0.600; the types of cultivated land ecological pressure were mainly ‘weakly unsustainable’ and ‘weakly sustainable’, and the load of cultivated land ecological pressure capacity was serious; (3) the ecological bearing capacities of cultivated land in all prefecture-level cities in Guangdong Province unevenly distributed, and there was significant positive spatial autocorrelation in spatial distribution, but the spatial agglomeration

收稿日期:2020-07-01

修回日期:2020-09-04

资助项目:广东省教育科学规划课题(2019GXJK080);广东省哲学社会科学规划项目(GD19YYJ03);广东沿海经济带发展研究院 2020 年专项课题(YJY202002)

第一作者:陈士银(1967—),男,湖北仙桃人,博士,教授,硕士生导师,主要从事土地利用规划与评价研究。E-mail:13828247596@139.com

通信作者:宾津佑(1992—),女,湖南衡山人,硕士,助教,主要从事土地利用规划与管理研究。E-mail:yours_bin@163.com

tendency was somewhat weakened; Moran scatter diagram showed that each district city of Guangdong Province farmland ecological pressure presented the spatial distribution of the high—high or low—low agglomeration phenomenon. In a word, the ecological carrying capacity of cultivated land in Guangdong Province is not optimistic and the regional endowment of cultivated land resources is obviously different. Therefore, the main development direction of the cultivated land in Guangdong Province is to adapt to local conditions, manage and control the cultivated lands in different regions and make efficient use of the cultivated lands.

Keywords: ecological pressure-bearing capacity of cultivated land; ecological footprint; spatiotemporal characteristics; ESDA-GIS; Guangdong Province

耕地作为具备多功能的物质基础生产资料,同时也是稀缺的土地资源。耕地生态承压状况则关乎国家粮食安全、社会稳定乃至国计民生之大计。随着我国工业化、城镇化快速推进,耕地面积锐减、污染负荷加重、耕地质量下降等一系列问题日益严重,耕地生态安全问题日渐突显。自 1998 年起,《中华人民共和国土地管理法》及其修正法陆续颁布实施,均对耕地保护做出了严格要求,也为耕地保护提供了法律依据^[1]。耕地生态安全已成为国内外学术界关注的焦点,学者们基于不同研究尺度、不同领域开始关注耕地生态安全等相关问题的研究,生态足迹和生态承载力被广泛应用于识别耕地生态环境问题和测度耕地可持续性评价,并取得了一系列丰硕的研究成果^[2-6]。

目前学术界关于耕地生态的研究主要集中在耕地生态的内涵界定^[7]、耕地生态安全评价^[8-9]、耕地生态可持续性^[10-11]、耕地生态脆弱性^[12]、耕地生态格局演变及其影响因素等^[13-17]方面。近年来,状态空间模型^[9]、能值分析^[10]、PSR 模型^[8,15]、熵权集对分析法^[18]、灰色预测模型^[19]、生态足迹模型及其改进模型等^[12-13,16-17,20]量化方法被引入耕地生态安全评价及测度,为耕地生态可持续研究提供了可借鉴的量化技术手段。从研究视角来看,多基于粮食安全视角对粮食主产区耕地生态承载力进行定量研究和定性分析^[14,21-22],并侧重于探究耕地与经济、人口、城镇化等因素的相互作用关系^[23-27]。现有针对广东省耕地的相关研究主要集中在耕地多功能评价^[28]、耕地地力和质量评价^[29-30]、耕地肥力的时空变异性^[31]、耕地与经济增长、新型城镇化的关系研究等^[32-33]方面,鲜少涉及广东省耕地生态承压能力的相关研究,基于时间、空间尺度探讨耕地生态空间格局更为少见。

广东作为粮食调入、人口迁入大省,同时也是全国耕地面积减少幅度最大的区域,耕地生态资源需求与供给之间矛盾突出。鉴于此,本文选取经济最为发达的典型省份广东省作为研究对象,通过运用耕地生态足迹模型、ESDA-GIS 分析方法,对广东省 2008—2017 年耕地生态足迹、耕地生态承载力以及耕地生

态承压能力指数进行定量测算,分析广东省及各地市耕地生态承压状态类型,并对耕地生态承压能力的时空格局进行空间可视化,探究其时空分布格局及其规律,以期合理开发利用耕地资源,实现耕地资源可持续发展和高效利用,缓解区域经济发展与耕地保护之间的矛盾,推进区域经济高质量以及区域协调发展提供科学依据和借鉴参考。

1 研究区概况与数据来源

广东省位于 20°13′—25°31′N,109°39′—117°19′E,自东向西依次与福建省、江西省、湖南省、广西省接壤,南与香港和澳门特别行政区毗邻,西南方向与海南省隔琼州海峡相望。广东省所辖面积为 17.977 万 km²,下辖 21 个地级市行政单位,123 个县级建制行政单位,地理分区上划分为珠江三角洲(含广州市、深圳市、佛山市、珠海市、东莞市、江门市、惠州市、中山市、肇庆市)、粤东(含汕头市、汕尾市、揭阳市、潮州市)、粤西(湛江市、茂名市、阳江市)和粤北山区(云浮市、韶关市、梅州市、清远市、河源市)四大区域。广东省为亚热带季风气候,高温多雨,地形以丘陵平原为主,土壤包括红壤、赤红壤、砖红壤等地带性土壤类型,面积分别占全省土壤面积的 37.96%,24.8%,5.15%。截至 2017 年底,广东省常住人口 11 169.00 万人,耕地面积 259.97 万 hm²,人均耕地面积仅为 0.028 hm²,耕地面积人均占有率低,且远低于我国 2017 年人均耕地 0.097 hm²的平均水平以及联合国粮农组织划定的警戒线标准(0.053 hm²),同时广东省也是我国最大的粮食调入大省,很大一部分粮食缺口依靠省外采购和国外进口。改革开放以来,随着广东省经济的迅速发展,工业化、城镇化进程纵深推进,大量外来人口迁入,农业、生态空间被挤占,耕地面积、人均耕地、耕地保有量及粮食播种面积均呈缩减趋势,粮食安全供给压力不断增大,人多地少的矛盾依然严峻。广东省耕地质量地区分布差异大,其中优等质量耕地主要分布在粤西沿海区和粤西北山区,高等质量耕地主要分布在粤西北山区,中等质量耕地主要分布

在粤西北山区^[30]。近年来耕地开发利用存在粗放、无序、低效利用现象,耕地质量下降、耕地生态系统退化,区域经济发展与人口、资源不协调,耕地开发利用与生态环境保护的矛盾依然突出。

研究期内人口数据主要来源于 2009—2018 年广东省各地级市的统计年鉴;稻谷、小麦、甘蔗、花生、麻类、烟叶等耕地作物产量及种植面积数据分别来源于《广东农村统计年鉴》(2009—2018 年)和《中国统计年鉴》(2009—2018 年)。2008—2017 年广东省土地利用现状分类数据来源于广东省自然资源厅官方网站。全国矢量数据来源于国家基础地理信息中心,在此基础上提取广东省地级市行政边界矢量数据,并采用 2018 年的广东省县(区)域行政边界数据进行整合。

2 研究方法

2.1 耕地生态足迹模型及耕地生态承载力计算

耕地生态足迹^[12,34]是指生产各类作物和吸收各类作物被消费所产生的废弃物所需要的耕地面积,其中,耕地主要消费项目包括稻谷、薯类、花生、甘蔗等。而耕地生态承载力^[12,34]是指某个区域内生态系统能够给人类提供的生物生产性能力的耕地面积总和。计算公式为:

$$ef = \frac{EF}{N} = \sum_{i=1}^n (r \cdot C_i / P_i) / N \quad (1)$$

$$ec = \frac{EC}{N} = \sum_{i=1}^n (A \cdot r \cdot y) / N \quad (2)$$

式中:ef,ec 分别为区域耕地人均生态足迹、区域耕地人均生态承载能力;EF,EC 分别为区域耕地生态足迹、区域耕地生态承载力;N 为区域人口数量;n 为耕地消费项目类别数;r 为耕地均衡因子; C_i 为第 i 类耕地消费项目生产量; P_i 为第 i 类耕地消费项目的全国平均生产量;A 为广东省区域耕地类型的生产性土地面积;y 为广东省区域耕地的产量因子。

由于“国家 hm^2 ”概念下的耕地均衡因子计算较为困难,且耕地均衡因子年际变化较小,故引用 2011 年“国家 hm^2 (nhm^2)”^[35]生态足迹模型的耕地均衡因子值 4.687^[36]作为本研究的均衡因子。其次,由于不同地域具有差异性,故需要对“国家 hm^2 ”概念下的生态足迹模型下耕地产量因子需做出相应调整和修正,在搜集广东省及全国的各耕地主要消费项目的产量和种植面积的基础上,通过单位热量值表将各类产品的消费量转化为相应的热值,计算出广东省的耕地平均生产能力与全国耕地平均生产能力的比值,从而得到广东省各年耕地产量因子,与此同时,在计算广东省的耕地生态承载力时参考 WCED(世界环境与

发展委员会)的建议,扣除广东省耕地生态承载力总值的 12%,作为生物多样性保护用地所需(图 1)。

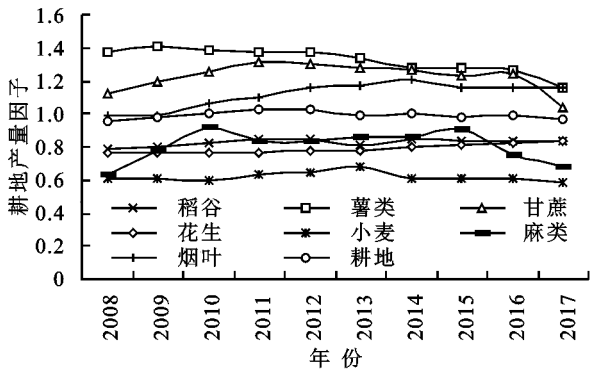


图 1 2008—2017 年广东省耕地产量因子计算结果

2.2 耕地生态承载力供需平衡模型

在计算耕地生态足迹模型和耕地生态承载力的基础之上,引用耕地生态承载力供需平衡模型测度耕地生态盈余,以反映耕地生态资源需求与供给之间的相互作用关系。计算公式为:

$$EI = EF - EC = (ef - ec) \cdot N \quad (3)$$

式中:EI 为耕地生态赤字或盈余。当 EI 值大于 0 时,表示研究区内耕地生态赤字;当 EI 值小于 0 时,则表明研究区耕地生态盈余;当 EI 值等于 0 时,表示研究区内耕地生态服务处于均衡状态。

2.3 耕地生态承压能力指数

耕地生态承压能力用以反映某一区域生态可持续供给能够承载满足人类活动生态需求的强度及可持续能力。计算公式为:

$$CLI = \frac{EF}{EF + EC} \quad (4)$$

式中:CLI 为耕地生态承压能力指数,界于 0~1;CLI 值越大,耕地生态消费需求超过耕地生态供给的值越大,即耕地生态承压状态欠佳,生态可持续性越弱;反之,CLI 值越小,耕地生态承压状态愈佳,即生态可持续性越强。参考相关文献^[37-38],结合广东省耕地生态足迹和耕地生态承载力的实际情况,将广东省耕地生态承压能力指数(CLI)划分为:强可持续、弱可持续、弱不可持续、强不可持续 4 种不同的耕地生态承压状态类型(表 1)。

表 1 耕地生态承压能力指数分级评价标准

等级	生态承压能力指数	耕地生态承压状态
1	(0,0.3]	强可持续
2	(0.3,0.5)	弱可持续
3	0.5	处于生态平衡,持续与不可持续的临界点
4	(0.5,0.7)	弱不可持续
5	[0.7,1)	强不可持续

2.4 ESDA 方法

ESDA(Exploratory Spatial Data Analysis)^[20,37]

是对空间自相关性进行测度,分为全局空间自相关和局部空间自相关,表明各研究因子之间的空间关联特征和相互作用机制。

2.4.1 空间权重矩阵 空间自相关分析的前提是构建空间权重矩阵,定义空间权重矩阵的方法主要有:距离规则、相邻规则和最近 K 点 3 类。本文采用基于相邻规则,即:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: n 为空间单元的个数;当 $W_{ij}=1$ 时,空间单元 i 和空间单元 j 相邻;当 $W_{ij}=0$ 时,空间单元 i 和空间单元 j 不相邻。

2.4.2 全局空间自相关 采用 Moran's I 指数测度广东省耕地生态承压能力的全局自相关性,以分析研究区域内耕地生态承压能力在空间集聚态势^[20,37],其值域为 $[-1,1]$,若 Moran's $I>0$,表明变量在空间分布上呈正向空间自相关;若 Moran's $I<0$,则表明存在空间负相关;当 Moran's $I=0$ 时,说明不存在空间相关性,观测值在空间上呈现随机分布,计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; n 为地区总数; x_i, x_j 为空间单元 i, j 的观测值; W_{ij} 为空间权重矩阵。采用其标准化统计量 Z 对 Moran's I 的显著性水平进行检验:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (7)$$

式中: $E(I)$ 和 $\text{var}(I)$ 分别为 Moran's I 的期望值和方差。当 Z 值为正且显著时,表明存在正的空间自相关,相似的观测值趋于空间聚集;当 Z 值为负且显著时,表明存在负的空间自相关,相似的观察值趋于空间离散分布; Z 值为 0 时,观察值呈独立的随机分布状态。

2.4.3 局部空间自相关 局部 Moran's I 用于揭示局部区域相邻的空间区域单元之间的相关性^[20,37],以揭示研究区域内耕地生态承压能力在空间分布上的异质特性,常用 Moran 散点图测度,其计算公式为:

$$I^* = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}), \quad i \neq j \quad (8)$$

式中: $S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n$; $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$; x_i, x_j 为空间单元 i, j 的观测值; n 为地区总数; W_{ij} 为空间权重矩阵。局部 Moran's I 指数的 Moran 散点图有 4 种空

间关联模式:H—H 型,即第一象限代表观测值高于平均值的区域被观测值高于均值的邻域包围;L—H 型,即第二象限代表低于平均值区域被高于平均值的邻域包围;L—L 型,即第三象限代表低于平均值区域被低于平均值邻域包围;H—L 型,即第四象限代表高于平均值区域被低于均值的邻域包围。

3 结果与分析

3.1 广东省耕地生态承压能力时序变化特征分析

根据公式(1)—(3),分别计算 2008—2017 年广东省耕地生态足迹、耕地生态承载力、耕地生态盈亏(图 2),并分别计算相应的人均耕地生态足迹总量、人均耕地生态承载力总量、人均耕地生态赤字(表 2)。

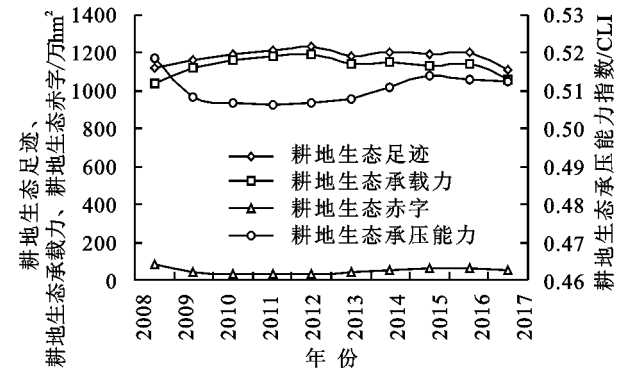


图 2 2008—2017 年广东省耕地生态足迹、生态承载力、生态赤字及生态承压能力变化曲线

表 2 2008—2017 年广东省人均耕地生态足迹、生态承载力及生态赤字计算结果

年份	人均耕地生态 足迹/nhm²	人均耕地生态 承载力/nhm²	人均耕地生态 赤字/nhm²	人口 数量/人
2008	0.1152	0.1068	0.0084	97660222
2009	0.1155	0.1118	0.0037	100486516
2010	0.1143	0.1113	0.0030	104547731
2011	0.1154	0.1126	0.0028	105193504
2012	0.1162	0.1130	0.0032	105910965
2013	0.1116	0.1080	0.0035	106210400
2014	0.1128	0.1080	0.0048	107001275
2015	0.1106	0.1045	0.0061	108323217
2016	0.1092	0.1036	0.0056	109801770
2017	0.0997	0.0949	0.0048	111457558

由图 2 可知,2008—2017 年广东省耕地生态足迹变化总体呈“雁行”波动下降趋势。大致可划分为两个阶段:第一阶段为 2008—2012 年,耕地生态足迹连续小幅度上升,但增长幅度呈逐年下降的趋势;第二阶段为 2013—2017 年,期间耕地生态足迹波动下降,并在 2013 年出现波谷,2016—2017 年的降幅相对较大。其次,广东省的耕地生态承载力的总体变化趋势与耕地生态足迹相似。2008—2011 年期间,耕

地生态承载力以单调递减的增幅上升,但其变化幅度略大于同期的耕地生态足迹;2012—2017年期间耕地生态承载力于呈现波动下降,该阶段的波峰出现在2014年。此外,研究期内广东省的耕地生态承载力供需平衡一直处于生态赤字状态。耕地生态赤字额在2008—2015年呈现先减后增的趋势,并在2011年达到研究期间的最低值为299 250.660 7 hm^2 ,耕地生态赤字于2015年停止增长且由增转降;10 a间,广东省的耕地生态赤字总量减少了133 663.090 9 hm^2 ,降幅约为1.19%,表明农业生产活动超出了耕地生态承载力范围,人地矛盾紧张仍是困扰耕地生态系统不可持续性的重要原因。

根据公式(4),计算耕地承压能力指数,并绘制耕地承压能力指数变化曲线(图2),研究结果表明,研究期内广东省耕地承压能力指数介于0.500~0.520,说明广东省耕地生态承压能力在研究期内均处于弱不可持续状态。2008—2017年广东省耕地承压能力呈先降后升再降的整体发展态势。其中,2008—2011年耕地承压能力指数呈递减趋势并达到研究期最小值,说明该期间广东省耕地生态承压能力逐渐增强;2012—2015年期间耕地承压能力指数单调递增,生态可持续能力不断下降;2016—2017年的耕地承压能力指数变化显示广东省的耕地生态承压能力有所改善,且该不可持续状态呈进一步减弱态势。

作为生态消费需求来源的人口是影响耕地承压能力的重要因素。由表2可知,广东省由于人口基数大,导致人均耕地生态足迹、人均耕地生态承载力均低于国家(0.52, 0.38 ghm^2/cap)和世界(0.59, 0.57 ghm^2/cap)的平均水平^[37]。2008—2017年广东省人均耕地生态足迹、人均耕地生态承载力、人均耕地生态赤字均呈下降趋势,表明近年来广东省人口负荷对耕地生态的影响有所缓解。其次,通过对比2008—2017年期间广东省年常住人口变动与广东省耕地承压能力指数曲线的情况,发现两者同期的变化趋势大体上一致。在2008—2012年期间,为满足因人口增长等因素引起的耕地生态供给需求增加,广东省包括粮食作物在内的等多种耕地作物相应增加了播种面积从而提高生产量;而2012—2017年期间在耕地面积和耕地作物播种面积减少的情况下,2017年的耕地生态承载力较2008年略有上升,说明广东省耕地的单位生产能力有所提升。2008年广东省的耕地面积约为2 830 732.00 hm^2 ,2017年下降至2 601 135.14 hm^2 ,耕地减少的面积相当于2008年广东省耕地面积的8.11%,即耕地面积平均每年减少了约22 959.69 hm^2 。而城市、建制镇、村庄用地面积在10 a间分别

增加了53 866.67, 105 733.33, 42 866.67 hm^2 ,增长率分别为18.52%, 36.19%, 5.44%。2011—2014年,广东省建设用地占用耕地约2.51万 hm^2 ,其中,24.70%为优等质量耕地,73.31%为高等质量耕地,1.99%为中等质量耕地。可见,广东省耕地生态赤字的实质一定程度上是耕地生态承载力不足。一方面需要正确处理经济发展、城镇化与耕地保护之间的关系,保证基本农田面积不减少、耕地质量不下降;另一方面需要提高耕地承载能力,由耕地产量因子的计算结果可知,稻谷、薯类、甘蔗、花生、小麦、麻类、烟叶的平均年产量因子分别为0.829 0, 1.323 8, 1.224 9, 0.789 1, 0.616 8, 0.805 7, 1.114 5,其中稻谷、花生、小麦的产量因子水平偏低,而小麦在广东的种植面积极小,稻谷、花生分别为广东省主要的粮食作物和油料作物,因此,可以通过改造中低产耕地、高标准农田建设、提高农业科学技术水平等方式提高耕地的综合生产能力。

3.2 广东省耕地生态承压能力空间变化特征分析

根据公式(1)—(3)分别计算2008年、2012年、2017年广东省21个地级市耕地生态承压能力指数,其中,考虑到新成立的深汕合作区,原位于汕尾市陆丰县的深汕合作区与深圳市在地理上并不接壤,故将深汕合作区2017年的统计数据合并到汕尾市2017年的统计数据中进行计算。由计算结果可知,3个时间节点广东省各地级市耕地生态承压能力指数的取值范围均处于0.440~0.600,对照表1可知,广东省各地级市的耕地生态承压能力指数均属于弱可持续和弱不可持续两大类型。2008—2017年耕地生态承压能力为弱不可持续类型的地级市数量占比较大,由2008年的14个减少到2012年的11个,2017年则增加到15个,表明广东省各地级市的耕地生态承压能力状态有待提升,耕地生态可持续发展呈现退化态势。

为探知广东省耕地生态承压能力的空间分布状况,借助ArcGIS 10.2软件,运用自然断裂点法将2008年、2012年、2017年广东省各地级市耕地生态承压能力指数由小到大依次划分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ共5个等级(图3)。由图3可知,广东省耕地生态承压能力分布年际间存在差异,但各地级市的耕地生态承压能力指数变动幅度较小,整体空间格局维持相对稳定。从各类型分布数量及分布区域来看,Ⅰ级类型区由2008年的清远市、江门市、阳江市3个区域减少至2012年的清远市、江门市2市,2017年增至清远市、江门市、阳江市、惠州市、汕尾市5市,分布区域逐渐扩大;Ⅱ级类型区主要分布在珠三角地区,由原来的佛山市、广州市、惠州市、汕尾市4个区域减少至仅

佛山 1 个区域;Ⅲ级类型区域分布范围较广,主要分布在茂名市、云浮市、肇庆市、韶关市、河源市、梅州市等区域;耕地生态承压能力较大的Ⅳ级、Ⅴ级类型区域则于粤东的潮州、汕头、揭阳三市稳定分布。

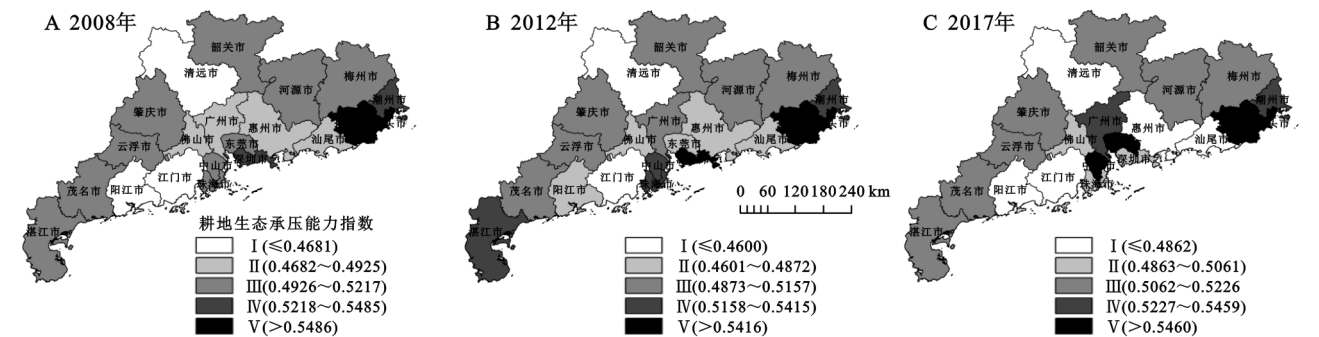


图 3 2008—2017 年广东省各地级市耕地生态承压能力空间分布格局

究其原因,汕头市、揭阳市因耕地生态环境质量、耕地亩产水平、人均耕地面积较高使得耕地生态承压能力一直处于广东省前列。而地处珠三角地区的广州市、中山市、珠海市、东莞市、深圳市耕地生态承压能力明显有所下降。生态足迹来源于人口生态消费需求,人口的增加及人类活动的影响形成巨额的生态足迹,相应地需要占用更多面积的土地作为耕地。珠三角地区作为广东省经济最为发达、人口基数大、人口密度高的地区,珠三角城市群的城镇化水平在广东省乃至全国名列全茅,以第二产业、第三产业为经济支柱,主要土地利用类型为建设用地,非农用地比重大,耕地面积占比低、总量小。以深圳市、中山市为例,深圳市、中山市两个地级市的人均耕地面积都远低于同期的省平均水平,但中山市的耕地生态承压能力有所下降,而深圳市的耕地生态状况则相对改善。通过对比可知,深圳市常住人口数量仅次于广州,而耕地面积为全省最少,2008 年深圳市的耕地面积为 4 078.00 hm²,而常住人口总量为 954.27 万人;截至 2017 年,深圳市的耕地面积为 3 742.06 hm²,常住人口数量为 1 245.27 万人;人均耕地面积由 2008 年的 4.17 hm²/万人降至 2017 年的 3.00 hm²/万人。另一方面,深圳市耕地生态环境的相对改善一定程度上得益于新行政区建立带来的面积扩张及低于全省平均水平的耕地面积减少率。而中山市的耕地生态承压指数上升与其耕地面积的减少有较大关系。中山市的耕地面积在 10 a 内减少了约 66.33%,耕地面积减少的绝对数量和减少比例均为全省第一并远超其他地级市。在人口数量方面,深圳市 10 a 间人口增加了 291 万人,增长率约为 29.25%,而中山的人口增加数量和增长率分别为 44.05 万人和 14.86%,在绝对数量和增加比例方面远低于深圳市,这也是二者存在差异的原因。因此,受人口增加、城镇化进程加快、耕地面积增减、机械化水平、农药化肥施用等各种人类活动因素的影响,对耕地生态产生着或多或少的负荷,加之人类本身对耕地生态环境保护的力度不够,

使得耕地生态承压能力处于低水平状态,人类活动监管及耕地生态可持续性有待进一步加强。

3.3 广东省耕地生态承压能力空间自相关分析

3.3.1 广东省耕地生态承压能力全局自相关分析
运用 ArcGIS 10.2 对研究期内广东省耕地生态承压能力指数(CLI)的全局 Moran's *I* 指数及 *Z* 值进行计算(表 3),3 个时间节点广东省耕地承压能力指数的全局 Moran's *I* 指数均为正值,分别通过 5%,10%的显著性检验,说明 2008—2017 年广东省耕地生态承压能力在空间上存在显著的正相关性,空间聚集分布现象较为明显,即耕地生态承压能力指数较高及较低的地级市在地理空间上显著聚集,但随着时间推移 Moran's *I* 值不断减小,广东省耕地生态承压能力在地理空间上的集聚现象有所减弱。

表 3 广东省耕地生态足迹全局 Moran's *I* 指数分析结果

年份	Moran's <i>I</i> 值	<i>Z</i> 值	<i>p</i> -value
2008	0.3580500	2.7695	0.003
2012	0.3102250	2.4250	0.006
2017	0.1407680	1.3258	0.098

3.3.2 广东省耕地生态承压能力局部自相关分析
全局自相关分析仅能测度研究区域内耕地生态承压能力的整体空间集聚现象,无法测度研究区域内耕地生态承压能力的局部空间异质性。鉴于此,借助 GeoDa 软件,绘制生成 Moran 散点图,以揭示分析广东省耕地生态承压能力的局部空间异质性。

由图 4 可知,2008 年、2012 年的散点图点分布较为相似,主要集中分布在第一象限和第三象限,表明耕地生态承压能力在地理空间上趋于局部高值或低值集聚分布。2017 年的 Moran 散点图则主要集中分布在第二、三象限,空间集聚态势有所减弱。从 Moran 散点图的 4 种空间关联模式分布类型来看(表 4),潮州市、揭阳市、汕头市 3 个区域一直处于 H—H 型集聚区,潮州、揭阳、汕尾 3 市的人均耕地面积、耕地产品生产总量及耕地作物单位产量均位于全省较

高水平,在地理空间上形成了耕地生态承压能力的高值集聚区;L—L 型由 2008 年的 9 个区域减少至 2017 年的 7 个区域,地处珠三角地区的佛山、广州、惠州、东莞、江门、肇庆等区域城镇化水平相对较高,人口密集,建设用地需求激增,人地矛盾加剧,耕地生态供给压力相对较大,而河源市、阳江市、茂名市、清远市等区域主要是通过粗放型农业生产实现粮食增

产,人口密度相对较低,农药化肥的施用加之生态环境的脆弱性易对耕地生态造成负面效应,耕地生产效益较低,使得耕地生态承压能力处于较低水平;L—H 型呈分散分布,由 2008 年的汕尾市 1 个区域增加至 2017 年的汕尾市、梅州市、惠州市、清远市、珠海市、深圳市 7 个区域;H—L 型则由 2008 年的 7 个区域减少至云浮市、韶关市、东莞市、中山市 4 个区域。

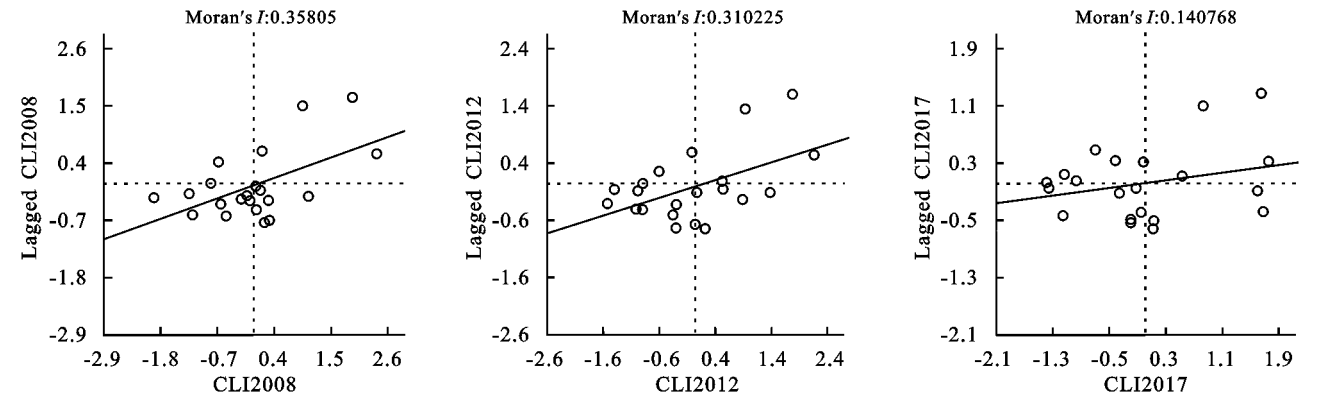


图 4 2008—2017 年广东省耕地生态承压能力的 Moran 散点图

表 4 广东省耕地生态承压能力指数的 Moran 散点图类型分布状况

类型	2008 年	2012 年	2017 年
第一象限(H—H 型)	潮州市、汕头市、揭阳市、梅州市	潮州市、汕头市、揭阳市、湛江市	潮州市、汕头市、揭阳市、湛江市
第二象限(L—H 型)	汕尾市	汕尾市、梅州市	汕尾市、梅州市、惠州市、清远市、珠海市、深圳市
第三象限(L—L 型)	河源市、阳江市、茂名市、清远市、江门市、佛山市、广州市、惠州市、中山市	河源市、阳江市、清远市、江门市、佛山市、广州市、惠州市、东莞市、肇庆市	河源市、阳江市、茂名市、江门市、佛山市、广州市、肇庆市
第四象限(H—L 型)	珠海市、深圳市、云浮市、韶关市、湛江市、东莞市、肇庆市	珠海市、深圳市、云浮市、韶关市、茂名市、中山市	云浮市、韶关市、东莞市、中山市

4 结论与建议

运用“国家 hm^2 ”概念下的生态足迹模型以及 ESDA-GIS 分析方法,对 2008—2017 年广东省耕地生态承压能力的时空格局特征及其空间自相关特性进行了分析,试图为广东省乃至类似地区耕地生态安全保障和耕地可持续利用提供科学依据与借鉴参考,得出的主要结论如下:

(1) 从时序变化来看,2008—2017 年广东省耕地生态足迹、耕地生态承载力在研究期内总体呈“雁型”波动下降趋势,耕地生态供给出现持续赤字,耕地承压能力指数介于 0.500~0.520,表明农业生产活动超出了耕地生态承载力范围,且处于弱不可持续的状态;研究期内广东省各地级市耕地生态承压能力指数介于 0.440~0.600,耕地生态承压类型均以弱不可持续和弱可持续类型为主,耕地生态承压能力负荷严重,且这种不可持续性有进一步增强的趋势,耕地生态安全形势不容乐观。

(2) 从空间格局来看,研究期间内广东省各地级

市耕地生态承压能力呈不均衡分布,且在空间分布上存在着显著正向空间自相关性,但空间集聚态势有所减弱;Moran 散点图表明广东省各地级市耕地生态承压能力在空间分布上存在高一高或低—低集聚现象,其中,H—H 型稳定分布于粤东的汕尾、潮州、揭阳、汕尾等区域,L—L 型主要分布在经济发展水平较高、耕地比重小、耕地资源需求较大的珠三角及其周围区域。

结合广东省耕地生态承压现状及发展趋势,现提出以下几点建议:

(1) 广东省及各地级市耕地承压状态以弱不可持续和弱可持续类型为主,耕地生态承压能力负荷形势严峻,一方面需要提高耕地承载力,提高农民耕地保护意识,改善农田基础设施建设,推进高标准农田建设,挖掘耕地资源潜力,提升耕地产出效益;另一方面要建立耕地生态安全机制预警,加强耕地资源可持续利用动态监测,防止耕地生态持续退化。

(2) 耕地生态赤字持续稳定存在,表明农业经济生产活动仍是建立在牺牲资源环境为代价的基础之

上,因此,需要制定严格的耕地保护政策,加大耕地生态补偿力度,完善耕地资源有偿使用制度,建立健全耕地保护奖惩机制,加强土地执法督察,坚持生态环境保护优先,合理开发利用耕地,引导耕地开发利用由粗放、低效向绿色、高效、集约节约转变。

(3) 广东省各地区耕地生态承压能力的区域差异明显,空间分布不均衡,应依据各地区的发展特色和资源禀赋优势,优化农业主体功能和空间布局规划,因地制宜,实施专门化、差异化、多元化耕地管控举措,实施耕地保护补偿的跨区域财政转移和耕地节余指标有偿调剂,有效控制建设占用耕地尤其是优质耕地,协调区域经济发展与生态保护、国土空间供给的关系,构建科学的农业生产、经济发展、生态保护新格局。

本文仅基于时间、空间视角对广东省耕地生态承压能力的时序演变和空间分布规律进行探讨,对于广东省耕地生态承压能力的时空格局演变成因及其驱动力尚未深入剖析,以及如何处理“区域经济增长”与“坚守耕地红线”二者的关系、耕地资源开发利用与生态环境保护的关系、以及耕地占补平衡和区域协调发展间的关系等仍是今后需进一步深化研究的方向。

参考文献:

- [1] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国土地管理法[M].北京:中国法制出版社,2020.
- [2] 郑沃林,殷梅华,吴剑辉.中国耕地保护研究的回顾与进展[J].世界地理研究,2016,25(5):69-80.
- [3] 欧名豪,王坤鹏,郭杰.耕地保护生态补偿机制研究进展[J].农业现代化研究,2019,40(3):357-365.
- [4] 闻熠,高峻,黄丽萍,等.长三角城市群生态足迹时空动态及自然资本利用效率分析[J].水土保持研究,2020,27(4):225-231,238,2.
- [5] 洪顺发,郭青海,李达维.基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态[J].资源科学,2020,42(5):980-990.
- [6] 王锦,郝晋珉,陈爱琪,等.中国省域耕地生态承载力供需平衡状况[J].中国农业大学学报,2019,24(7):146-155.
- [7] 吴大放,刘艳艳,刘毅华,等.耕地生态安全评价研究展望.中国生态农业学报[J].2015,23(3):257-267.
- [8] 袁零,杨庆媛.基于PSR框架的甘肃省环县耕地生态安全评价[J].西南师范大学学报:自然科学版,2019,44(6):60-68.
- [9] 郑媛媛,余敦,孙聪康,等.基于状态空间模型的耕地生态安全评价:以江西省鄱阳县为例[J].水土保持研究,2020,27(3):218-224,237.
- [10] 孙奇,孙鹏媛,高永生,等.基于能值分析的河南省耕地生态经济系统可持续利用研究[J].中国农业资源与区划,2010,31(3):37-42.
- [11] 金丹,卞正富.徐州耕地生态经济系统结构、功能及可持续性评价[J].中国土地科学,2010,24(2):38-44.
- [12] 曹文亚,潘洪义,巫泽倩,等.基于生态足迹模型的耕地脆弱性分布差异研究:以德阳市为例[J].四川师范大学学报:自然科学版,2020,43(3):393-402.
- [13] 贾书楠,孙睿,夏显力,等.西安市耕地生态安全测度及影响因素分析[J].水土保持研究,2016,23(3):164-169.
- [14] 陈先鹏,方恺,吴次芳,等.2009—2015年中国耕地资源利用时空格局变化研究:基于粮食安全与生态安全双重视角[J].水土保持通报,2019,39(3):291-296.
- [15] 赵柯,李伟芳,毛菁旭,等.基于PSR模型的耕地生态安全评价及时空格局演变[J].生态科学,2019,38(1):186-193.
- [16] 李丹,田沛佩,罗红英,等.西藏“一江两河”耕地生态安全时空格局与障碍诊断[J].农业机械学报,2020,51(10):213-222.
- [17] Chao Z H, Zhang P D, Wang X F. Impacts of urbanization on the net primary productivity and cultivated land change in Shandong Province, China[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018,46(5):809-819.
- [18] 刘锐,李涛.基于熵权集对分析的西北地区耕地生态安全水平差异比较[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):274-282.
- [19] 韩磊,潘玉君,高庆彦,等.基于PSR和无偏GM(1,1)模型的云南省耕地生态安全评价与预测[J].生态经济,2019,35(2):148-154.
- [20] Zhou H, Huang J J, Yuan Y B. Analysis of the spatial characteristics of the water usage patterns based on ESDA-GIS: an example of Hubei Province, China[J]. Water Resour Manage, 2017,31:1503-1516.
- [21] Yang Q Y, Yang R H, Wang Y H, et al. Does fallowing cultivated land threaten food security: Empirical evidence from Chinese Pilot Provinces[J]. Sustainability, 2019,11(10).DOI:10.3390/su1102836.
- [22] 罗海平,朱勤勤,罗逸伦,等.耕地生态足迹与生态承载力研究:基于中国粮食主产区2007—2016年面板数据[J].华东经济管理,2019,33(5):68-75.
- [23] 施园园,赵华甫,郎文聚,等.北京市耕地多功能空间分异及其社会经济协调模式解释[J].资源科学,2015,37(2):247-257.
- [24] 许恒周,吴冠琴,郭玉燕.耕地非农化与中国经济增长质量的库兹涅茨曲线假说及验证:基于空间计量经济模型的实证分析[J].中国土地科学,2014,28(1):75-81.
- [25] 穆怀中,张文晓.中国耕地资源人口生存系数研究[J].人口研究,2014,38(3):14-27.
- [26] 陈相利,赵华甫,冯喆,等.基于粮食—城镇化—生态多维压力体系的河南省耕地利用分区管控研究[J].河南农业大学学报,2019,53(2):307-315.