

李嘉仪, 董玉祥. 2019. 珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度分析. 热带地理, 39(3):
Li Jiayi and Dong Yuxiang. 2019. Coupling Coordinative Degree Analysis of Cultivated Land Multifunctionality and Its Security at Town Scale in Zhuhai. *Tropical Geography*, 39(3):

珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度分析

李嘉仪¹, 董玉祥^{1,2}

(1. 中山大学 地理科学与规划学院//广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275; 2. 中山大学 新华学院, 广州 510520)

摘要:以土地利用数据和社会经济统计数据为基础, 集成综合指数模型、耦合协调模型和地理探测器, 从镇域尺度探讨了1990—2015年珠海市耕地多功能性与安全耦合协调度的时空变化及其影响因子。结果表明: 1) 珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的演变在1990—2000年间相对平缓; 而在2000—2015年间相对剧烈, 总体上全市耦合协调度均值由1990年的0.65降为2015年的0.59。2) 珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度下降区域主要分布在东部, 上升区域主要分布在西部, 整体呈西部耦合协调度高于中部和东部的分布格局。3) 根据地理探测器的结果可知: 不同因子对珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度演变的影响程度存在差异, 其中土地垦殖率、种植业占GDP比重、各类作物产量和化肥农药施用量等是珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度演变的主导影响因子。

关键词:耕地多功能性; 耕地安全; 耦合协调度; 地理探测器; 珠海市

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号:

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003130

随着社会经济的快速发展, 人类需求呈现多样性。耕地作为人类和自然共同作用的土地利用系统, 已不再局限于满足人类对食物需求所形成的作物生产功能, 还因人类对经济、社会、生态等方面的需求而具备经济贡献、社会保障和生态保育等多项功能 (Song et al., 2015)。与此同时, 耕地也是一种稀缺资源, 其数量、质量和生态等方面处于安全状态是耕地多功能性可持续发展的基本保障 (彭保发等, 2018)。耕地多功能需求强度不断逼近甚至超越其安全阈限而诱发土壤退化、农田生态系统破坏等问题, 反过来又成为制约耕地多功能性可持续发展的重要原因 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; 宋小青等, 2012a)。因此, 在人类需求多样性与耕地资源稀缺性矛盾愈发激烈的背景下, 科学辨析并协调耕地多功能性与安全间关系, 对深化以耕地多功能性发展为导向、以耕地安全维护为抓手的耕地合理利用和有效保护新模式具有重要意义。

近年来, 耕地多功能性与安全的耦合关系研究得到学术界的高度关注。在基本概念上, 耕地多功能性是指耕地提供满足人类生存和发展所需多种商

品和服务的整体能力特性 (宋小青等, 2012a; 彭建等, 2016), 耕地安全是指耕地保持相对稳定数量、相对良好质量和相对健康生态环境以保障人类生存和发展的自身复合状态 (Chen et al., 2018)。在研究内容上, 学者们就耕地安全变化对耕地多功能性发展的影响作用进行探讨 (徐珊等, 2012; Deng et al., 2017; 张英男等, 2018; Zheng et al., 2018), 如Deng等 (2017) 测算了山东省2000—2010年耕地变化与粮食产量变化的相关性, 结果表明足量且高质量的耕地能促进粮食产量的增加; 张英男等 (2018) 利用空间计量回归分析方法发现, 黄淮海平原水源状况、地形条件等耕地本底因素对耕地多功能性发展具有驱动作用。此外, 耕地多功能性对耕地安全的影响效应也备受关注 (张冰洁等, 2012; Bommarco et al., 2013; 赵宏波等, 2014; Chen et al., 2018), 如赵宏波等 (2014) 在分析吉林省耕地生态安全时空格局及障碍因子的基础上, 就提高耕地产出水平、保障农民收入等方面探讨了如何发挥耕地多功能对耕地安全维护的积极作用; 再者, 部分学者从耕地多功能管理的视角探索了耕地安全的

收稿日期: 2018-11-29; 修回日期: 2019-03-06

作者简介: 李嘉仪 (1993—), 女, 广东广州人, 硕士研究生, 主要从事土地资源开发利用与保护, (E-mail) lijy199310@163.com。

维护策略 (Tschardt et al., 2012; Verhagen et al., 2018)。在研究方法上, 相关研究常用障碍度模型、灰色关联模型、空间计量回归模型和耦合协调模型等技术手段测度耕地多功能性与安全的耦合关联程度 (王枫 等, 2015a; Zhou et al., 2017; 张英男 等, 2018)。综上所述, 已有研究在耕地多功能性与安全之间相互制约又相互促进的耦合关系及关联程度测算方法上取得了显著成果, 但对这一耦合关系协调程度演变及其影响因子的探索尚显不足, 特别是以耕地利用复杂的中国东南沿海经济快速发展城市为案例的实证研究仍较为缺乏。

珠海市作为经济特区、粮食主销区和国家级生态示范区, 20世纪90年代以来居民对作物生产、经济贡献、社会保障和生态保育等耕地功能的需求日渐凸显 (杜继丰 等, 2015), 同时全市耕地非农化、耕地质量降低和耕地形态破碎等耕地安全问题突出 (吴大放 等, 2009; 叶云 等, 2018), 是中国东南沿海经济快速发展、耕地多功能性与安全耦合协调度演变复杂的典型代表性区域。基于此, 以珠海市为研究区, 通过构建耕地多功能性与安全评价指标体系, 运用综合指数模型、耦合协调模型, 从镇域尺度探讨1990—2015年珠海市耕地多功能性与安全耦合协调度的时空变化, 并结合地理探测器探测相关因子对耦合协调度演变的影响程度, 以期为今后统筹珠海市耕地多功能性与安全耦合协调发展提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

珠海市地处珠江口西岸 (21°48'—22°33' N、113°03'—114°19' E), 是粤港澳大湾区核心城市之一。全市土地总面积为1 732.33 km², 现辖香洲、斗门和金湾3个行政区, 共15个镇和9个街道。气候属亚热带季风性海洋气候, 年均温约23℃, 年均降雨量约2 046 mm。总体地势平缓, 西部以平原、丘陵为主, 东部以丘陵、台地为主。境内河流众多, 属典型的三角洲河网区。1990—2015年珠海市户籍人口数由50.2万人增为112万人, GDP由41.4亿元增为2 030亿元, 但农业对GDP的贡献率由13.86%减为2.39%。期间大量耕地转换为水域和建设用地, 全市耕地面积由1995年的66 840.29 hm²减为2015年的40 492.16 hm²。截止至2015年, 珠海市耕地利用以水田为主, 面积为25 836.44 hm²; 旱地为次, 面积为14 655.72 hm²; 耕地自然质量等别以低等为主,

利用等别以中等为主, 经济等别以优等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 评价指标体系的构建 根据耕地多功能性和耕地安全的基本概念 (宋小青 等, 2012a; Chen et al., 2018), 选取多维度指标构建珠海市耕地多功能性与安全评价指标体系。对于耕地多功能性评价指标, 参照已有研究 (叶晓琪 等, 2017; 范业婷 等, 2018; 王成 等, 2018), 基于珠海市耕地作物生产、经济贡献、社会保障和生态保育的多功能整体特性及其对耕地安全的影响, 考虑数据的可获取性, 根据层次分析思想和相关性检验, 从作物生产功能、经济贡献功能、社会保障功能和生态保育功能4个方面选取了11个指标 (表1)。作物生产功能评价指标考虑了耕地对粮食作物 (包括稻谷、旱粮、薯类和大豆)、经济作物 (包括花生、木薯和甘蔗) 和蔬果类作物 (包括蔬菜和果用瓜) 的生产能力。经济贡献功能评价指标考虑了耕地利用对国民经济发展的贡献能力及其生产效益水平。社会保障功能评价指标考虑了耕地对居民就业支持和粮食保障的能力。生态保育功能评价指标考虑了农作物种植结构的多样性和耕地生态系统提供大气调节、水文调节、废物处理、土壤形成、生物多样性保持等服务的能力, 其中作物多样性指数采用辛普森多样性指数来刻画 (范业婷 等, 2018), 耕地生态服务价值参照中国生态系统单位面积生态服务价值当量因子进行估价 (谢高地 等, 2003)。

表1 珠海市耕地多功能性与安全评价指标体系

Tab.1 Evaluation indicator system of cultivated land multifunctionality and its security in Zhuhai

系统层	准则层 (权重)	指标层/单位 (权重)
耕地多功能性	作物生产功能 (0.30)	X ₁ 粮食作物产量/kg (0.11)
		X ₂ 经济作物产量/kg (0.10)
		X ₃ 蔬果类作物产量/kg (0.09)
	经济贡献功能 (0.35)	X ₄ 种植业占 GDP 比重/% (0.11)
		X ₅ 种植业占农业比重/% (0.09)
		X ₆ 单位面积耕地种植业产值/(元·m ²) (0.08)
		X ₇ 人均种植业产值/元 (0.07)
	社会保障功能 (0.19)	X ₈ 人均耕地经营面积/m ² (0.11)
		X ₉ 人均粮食保证率/% (0.09)
	生态保育功能 (0.16)	X ₁₀ 作物多样性指数 (0.08)
		X ₁₁ 耕地生态服务价值/万元 (0.08)
耕地安全	耕地数量安全 (0.30)	Y ₁ 人均耕地面积/m ² (0.10)
		Y ₂ 土地垦殖率/% (0.10)
		Y ₃ 耕地复种指数/% (0.10)
	耕地质量安全 (0.39)	Y ₄ 灌溉潜力 (0.12)
		Y ₅ 种植业生产结构/% (0.10)
		Y ₆ 土壤退化指数 (0.08)
		Y ₇ 土壤水分指数 (0.08)
	耕地生态安全 (0.31)	Y ₈ 植被覆盖率/% (0.09)
		Y ₉ 耕地景观分维数/% (0.10)
		Y ₁₀ 化肥施用量/kg (0.07)
		Y ₁₁ 农药施用量/kg (0.05)

对于耕地安全评价指标,参考已有研究成果(王芳等, 2013; 匡丽花等, 2018), 基于珠海市耕地数量、质量和生态的复合状态对耕地多功能性发展的促进和约束作用, 遵循层次性、可获得性等原则, 从耕地数量安全、耕地质量安全和耕地生态安全3个方面选取了11个指标(见表1)。耕地数量安全评价指标考虑了耕地与人口之间的数量关系以及土地利用活动对耕地数量的影响。耕地质量安全评价指标考虑了耕地水源条件的优劣、生产结构的规模以及土壤质量的高低, 其中灌溉潜力通过计算河流水库占区域土地总面积求得, 土壤退化指数采用比值植被指数, 土壤水分指数采用差值植被指数(宋戈等, 2014)。耕地生态安全评价指标考虑了区域植被覆盖状况、耕地资源斑块空间形态以及化肥和农药施用量对耕地生态环境的胁迫程度, 其中耕地景观分维数通过Fragstats软件求得。

1.2.2 综合指数模型 采用综合指数模型, 基于耕地多功能性与安全评价指标体系, 通过计算耕地多功能性指数和耕地安全指数, 对时刻 t 耕地多功能性和耕地安全分别进行评价(叶晓琪等, 2017)。计算公式为:

$$f(X) = \sum_{j=1}^m a_j X_j \quad (1)$$

$$g(Y) = \sum_{j=1}^n b_j Y_j \quad (2)$$

式中: $f(X)$ 、 $g(Y)$ 分别为耕地多功能性指数和耕地安全指数, 取值均为 $[0, 1]$, 值越大, 表示耕地多功能性、耕地安全越接近最高水平, 反之越低; a_j 、 b_j 分别为耕地多功能性和耕地安全第 j 个评价指标的权重, 通过变异系数法确定(艾凤巍, 2018); 分 X_j 、 Y_j 分别为耕地多功能性和耕地安全第 j 个评价指标经极值标准化无量纲处理后的指标值。

1.2.3 耦合协调模型 采用物理学中耦合协调模型, 通过计算耕地多功能性与安全耦合协调度从而度量时刻 t 耕地多功能性与安全二者间的耦合协调程度(张浩等, 2017)。计算公式为:

$$C = [(f(X) \times g(Y)) / ((f(X) + g(Y))^2)^{\frac{1}{2}}] \quad (3)$$

$$T = \alpha f(X) + \beta g(Y) \quad (4)$$

$$D = (C \times T)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: C 为耦合度; T 为协调指数; D 为耦合协调度, 取值为 $[0, 1]$, 值越大, 表明耕地多功能性与安全耦合协调程度越强, 反之越弱; α 、 β 为待定参数, 取决于耕地多功能性与安全的相对重要程度, 考虑到二者在协调发展下同等重要, 取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

1.2.4 地理探测器 采用地理探测器, 探测相关因子对耕地多功能性与安全耦合协调度演变的影响程度。地理探测器是基于地理数据的空间分异特征, 能有效探测出在某种程度上自变量对因变量空间分布差异的影响效果(王劲峰等, 2017)。采用 q 值进行度量, 模型为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中: h 为耕地多功能性与安全耦合协调度或各因子的分级数; N 和 N_h 分别为整个区域和第 h 级的样本个数; σ^2 和 σ_h^2 分别为整个区域和第 h 级的耦合协调度的方差。 q 的取值为 $[0, 1]$, 值越大, 表明该因子对耕地多功能性与安全耦合协调度演变的影响程度越强, 反之越弱。

1.3 数据来源与处理

基于相等间隔年份分析原则, 选取1990、1995、2000、2005、2010和2015年作为研究时间点。土地利用数据为中国科学院经人工目视解译生成且验收合格的产品(空间分辨率 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$)(<http://www.resdc.cn/>)。社会经济统计数据源于珠海市及各区政府部门权威的统计资料。近红外波段和红波段的反射率由下载于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)的Landsat TM/ETM+遥感影像经处理后获取。

2 珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的时空变化

根据综合指数模型和耦合协调模型, 计算得到1990—2015年珠海市镇域耕地多功能性指数、耕地安全指数以及二者耦合协调度(表2), 并借助ArcGIS将各镇(街)不同类型指数平均值的自然断点分级结果绘制成图。

2.1 耕地多功能性和耕地安全的时空变化

2.1.1 耕地多功能性时空变化 1990—2015年珠海市镇域耕地多功能性的时空变化差异较大(见表2)。除白蕉镇、斗门镇和莲洲镇随着时间的推移耕地多功能性有所提升外, 其他镇(街)呈不同程度的下降态势, 其中红旗镇、横琴镇、唐家湾镇和香洲主城区分别下降了58.62%、68.14%、54.36%和65.83%, 降幅较为突出。总体上, 莲洲镇因各项耕地功能优势, 乾务镇因作物生产功能、社会保障功能和生态保育功能优势, 白蕉镇因作物生产功能和生态保育功能优势, 平沙镇因作物生产功能和经济贡献功能优势, 故属于珠海市耕地多功能性高值区(0.44~

表2 珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度评价结果

Tab.2 Evaluation results of coupling coordinative degree between cultivated land multifunctionality and its security at town scale in Zhuhai

指数类型	年份	白蕉镇	白藤街道	斗门镇	井岸镇	莲洲镇	乾务镇	红旗镇	南水镇	平沙镇	三灶镇	横琴镇	南屏镇	唐家湾镇	香洲主城区
耕地多功能性指数	1990	0.57	0.25	0.32	0.25	0.53	0.51	0.60	0.25	0.65	0.43	0.10	0.30	0.28	0.21
	1995	0.55	0.21	0.28	0.21	0.48	0.52	0.54	0.19	0.59	0.28	0.19	0.28	0.24	0.16
	2000	0.55	0.18	0.32	0.16	0.52	0.49	0.41	0.14	0.42	0.23	0.36	0.39	0.37	0.24
	2005	0.52	0.17	0.31	0.12	0.54	0.36	0.49	0.31	0.61	0.37	0.12	0.20	0.16	0.08
	2010	0.46	0.24	0.59	0.29	0.56	0.59	0.38	0.31	0.71	0.32	0.10	0.13	0.11	0.05
	2015	0.68	0.18	0.42	0.21	0.68	0.36	0.25	0.22	0.42	0.25	0.03	0.16	0.13	0.07
耕地安全指数	1990	0.56	0.68	0.52	0.55	0.60	0.49	0.48	0.36	0.37	0.34	0.62	0.59	0.52	0.51
	1995	0.52	0.64	0.51	0.55	0.61	0.49	0.49	0.36	0.40	0.39	0.56	0.53	0.48	0.46
	2000	0.54	0.59	0.64	0.61	0.61	0.58	0.46	0.50	0.35	0.33	0.59	0.52	0.56	0.42
	2005	0.55	0.68	0.54	0.57	0.62	0.63	0.55	0.50	0.55	0.50	0.56	0.47	0.43	0.36
	2010	0.56	0.70	0.52	0.54	0.62	0.54	0.51	0.47	0.44	0.42	0.58	0.44	0.44	0.38
	2015	0.48	0.60	0.47	0.45	0.55	0.49	0.64	0.61	0.57	0.59	0.39	0.43	0.43	0.37
耦合协调度	1990	0.75	0.64	0.64	0.61	0.75	0.70	0.73	0.55	0.70	0.62	0.50	0.65	0.62	0.57
	1995	0.73	0.61	0.61	0.58	0.74	0.71	0.72	0.51	0.70	0.58	0.57	0.62	0.58	0.52
	2000	0.74	0.57	0.67	0.56	0.75	0.73	0.66	0.52	0.62	0.53	0.68	0.67	0.68	0.57
	2005	0.73	0.58	0.64	0.52	0.76	0.69	0.72	0.63	0.76	0.66	0.51	0.56	0.51	0.41
	2010	0.71	0.64	0.74	0.63	0.77	0.75	0.66	0.62	0.75	0.61	0.50	0.49	0.47	0.36
	2015	0.76	0.57	0.67	0.55	0.78	0.65	0.63	0.60	0.70	0.62	0.33	0.51	0.48	0.40

注：香洲区的狮山、湾仔、拱北、吉大、香湾、梅华、前山和翠香 8 个街道统称为香洲主城区；万山群岛无耕地分布，因此本文讨论的地区不包括万山群岛，下同。

0.57)，而白藤街道、井岸镇、南水镇、唐家湾镇、南屏镇、横琴镇和香洲主城区因各项耕地功能水平均较低，故属于耕地多功能性低值区（0.13~0.25）

（图1）。

2.1.2 耕地安全时空变化 1990—2015年珠海市镇域耕地安全的时空变化（见表2）表现为：白蕉镇、

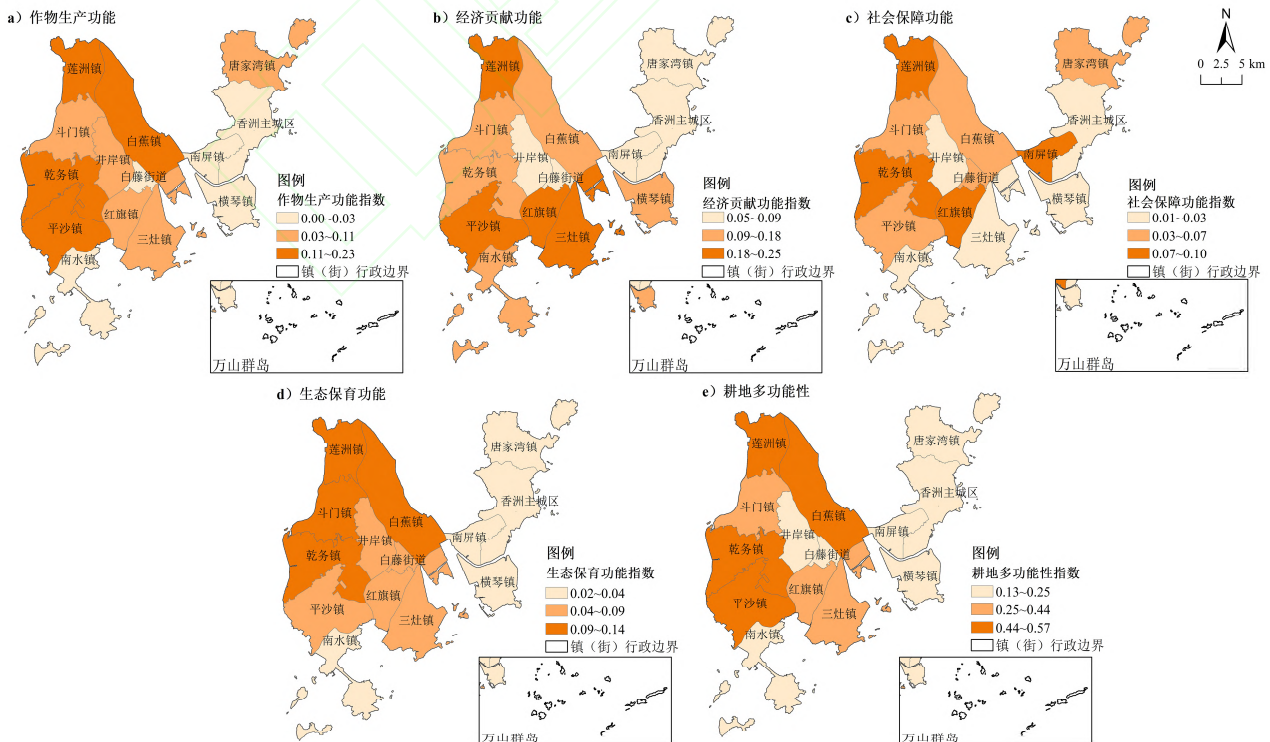


图1 1990—2015年珠海市镇域耕地多功能性和单项耕地功能的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of cultivated land multifunctionality and single function at town scale in Zhuhai during 1990-2015

白藤街道、井岸镇、横琴镇、南屏镇、唐家湾镇和香洲主城区随着时间的推移耕地安全呈不同程度的下降趋势，乾务镇基本保持不变，而红旗镇、南水镇、平沙镇和三灶镇呈上升趋势，分别上升了32.47%、68.72%、53.83%和70.40%。总体上，白藤街道因较高水平的耕地数量安全和耕地质量安全，

莲洲镇因较高水平的耕地数量安全，井岸镇因较高水平的耕地生态安全，横琴镇因较高水平的耕地质量安全和耕地生态安全，故成为耕地安全高值区（0.54~0.65），而平沙镇、三灶镇和香洲主城区由于耕地数量安全、耕地质量安全和耕地生态安全水平较低，成为耕地安全低值区（0.42~0.45）（图2）。

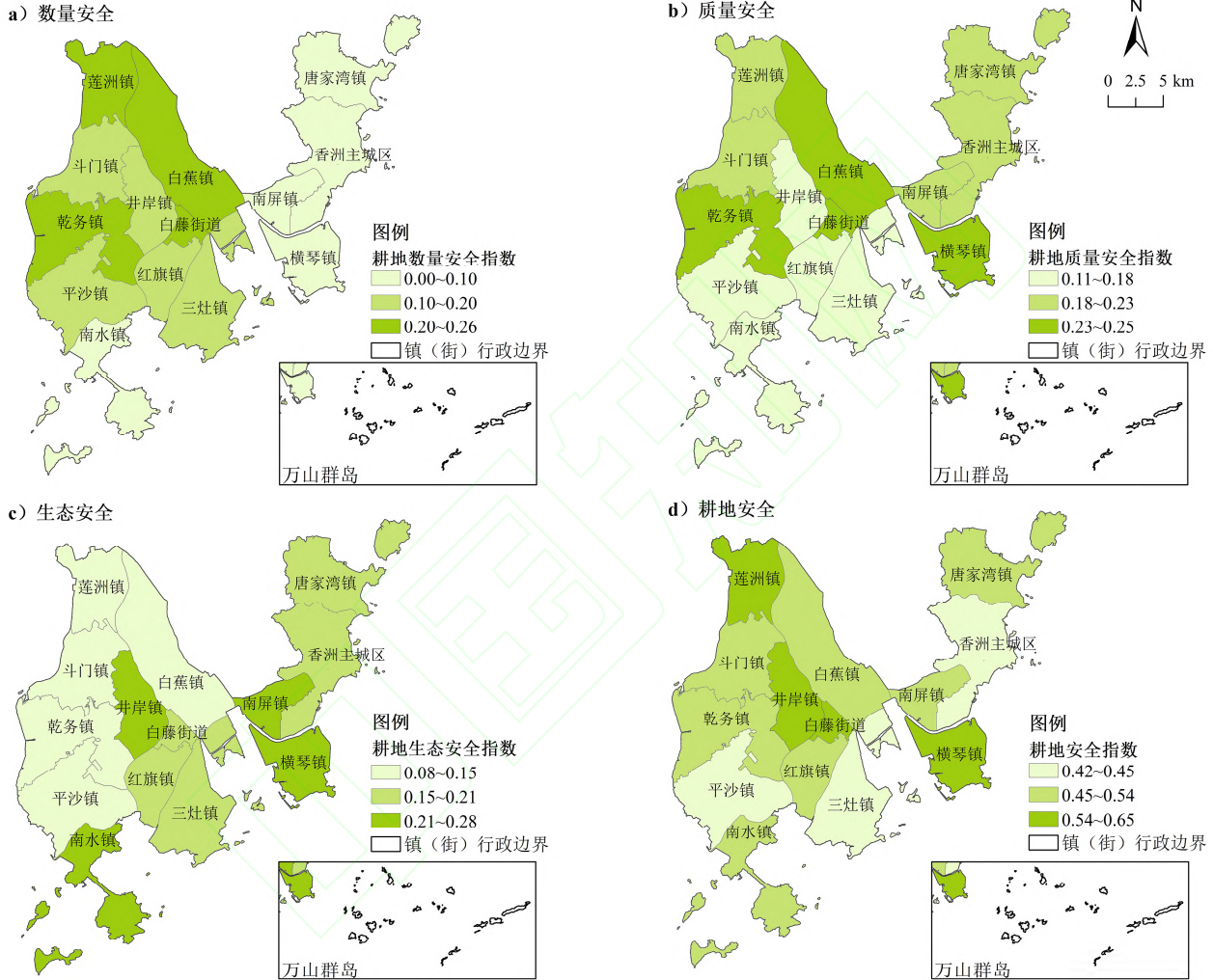


图2 1990—2015年珠海市镇域耕地安全和单项耕地安全的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of cultivated land security and single security at town scale in Zhuhai during 1990-2015

2.2 耕地多功能性与安全耦合协调度的时空变化

2.2.1 耦合协调度的时间动态变化 1990—2015年珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的变化表现出明显的时间阶段性特点(见表2)。1990—2000年各镇(街)耕地多功能性与安全发生略微波动，耦合协调度的变化幅度较小，属于变化相对平缓期；2000—2015年大部分镇(街)耕地多功能性与安全的变化愈趋明显，耦合协调度的变化幅度增大，属于变化相对剧烈期。总体而言，研究期内珠海市镇

域耕地多功能性与安全耦合协调度的平均水平逐步下降，全市耦合协调度平均值由1990年的0.65降为2015年的0.59，下降了8.52%。

2.2.2 耦合协调度的空间异质变化 研究期内，珠海市不同镇(街)耕地多功能性与安全耦合协调度朝着不同方向、发生不同程度的变化(见表2)。耦合协调度呈下降趋势的镇(街)共10个，主要分布在东部，其中横琴镇、香洲主城区、南屏镇和唐家湾镇因耕地多功能性和耕地安全显著下降，故耦合

协调度降幅比较明显,分别下降了32.88%、29.59%、21.70%和21.48%。耦合协调度上升区域主要包括西部的斗门镇、莲洲镇和南水镇,分别上升了4.79%、4.29%和10.53%。总的来看,耦合协调度呈西部高于中部和东部的空间分布格局(图3)。耦合协调度高值区(0.69~0.76)主要分布在西南部和西北部,如白蕉镇、莲洲镇、乾务镇和平沙镇,该地区耕地多功能性与安全水平较高,二者间产生相互促进作用,耕地多功能性与安全的协调发展能力强。耦合协调度中值区(0.58~0.69)包括白藤街道、斗门镇、红旗镇、三灶镇和南屏镇,该地区耕地多功能性与安全均处于中等水平,二者有所关联但相互促进或相互制约的作用不明显,协调发展能力有待加强。耦合协调度低值区(0.47~0.58)包括东部的唐家湾镇、横琴镇、香洲主城区以及井岸镇、南水镇,其中横琴镇各项耕地功能均未得到充分利用,耕地多功能性严重滞后于耕地安全;井岸镇、南水镇、唐家湾镇和香洲主城区不仅各项耕地功能优势不明显,同时存在耕地数量安全、耕地质量安全和耕地生态安全水平较低的问题,耕地多功能性与安全的协调发展态势不容乐观。

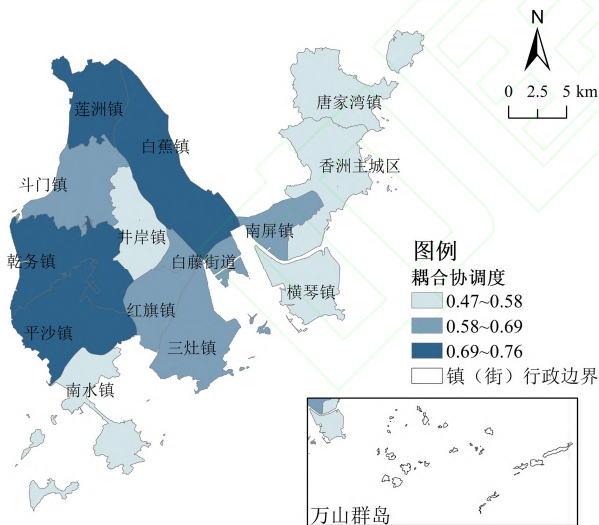


图3 1990—2015年珠海市耕地多功能性与安全的耦合协调度的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of coupling coordinative degree between cultivated land multifunctionality and its security at town scale in Zhuhai during 1990-2015

3 珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的影响因子

3.1 因子影响程度探测

珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的

时空变化应是多因子综合作用的结果,其成因复杂,受不同时期社会经济发展、耕地利用模式和区域管理政策等基本因素的影响(王枫等, 2015b; Chen et al., 2018): 1990—2000年,珠海市城镇化进程加速但水平不高,耕地利用以满足居民温饱为目的,耕地数量变化不大,加之政府重视生态环境的保护,该时期耕地多功能性、耕地安全以及二者耦合协调度的变化相对平缓;进入21世纪,在城镇化水平加速和人口规模增加的压力下,珠海市“外向型”经济步伐加快、土地开发强度加大、“被迫式”非农化转移加快,造成2000—2015年耕地多功能性、耕地安全以及二者耦合协调度的变化相对剧烈。为进一步探测相关因子对耦合协调度演变的影响程度,借助ArcGIS软件分别对相关影响因子进行自然断点分级(每项因子均划分为5级),并采用地理探测器进行因子探测,得到1990—2015年各因子对珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度演变的 q 值。结果显示(图4):不同影响因子的 q 值存在一定差异,化肥施用量、种植业占GDP比重、蔬果类作物产量、粮食作物产量、人均粮食保证率、经济作物产量、土地垦殖率、耕地生态服务价值、人均种植业产值、人均耕地面积和农药施用量的 q 值 >0.60 ,对珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度演变的影响作用显著,属于主导影响因子;作物多样性指数、植被覆盖率、土壤退化指数、灌溉潜力、人均耕地经营面积、耕地复种指数和土壤水分指数的 q 值在0.32~0.58,属于一般影响因子;单位面积耕地种植业产值、耕地景观分维数、种植业生产结构、种植业占农业比重的 q 值较小且均未通过0.10的显著性水平检验,影响作用不显著。

3.2 主导影响因子的机理分析

3.2.1 耕地资源禀赋 土地垦殖率、耕地生态服务价值和人均耕地面积共同说明了耕地资源禀赋对珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度具有影响。这是因为耕地资源禀赋差异不仅直接影响着耕地数量安全,而且从物质基础上决定着耕地多功能性发展(王枫等, 2015b),在这两方面的叠加作用下,耕地资源禀赋的减少将对耕地多功能性与安全耦合协调发展造成胁迫。对珠海市而言,1990—2015年各镇(街)土地垦殖率、耕地生态服务价值和人均耕地面积呈不同程度的减少。土地垦殖率减少以南水镇相对突出,减少了40.67%;耕地生态服务价值减少以红旗镇和白藤街道相对明显,分别减少了69.71%和64.00%;人均耕地面积减少以香洲主城区

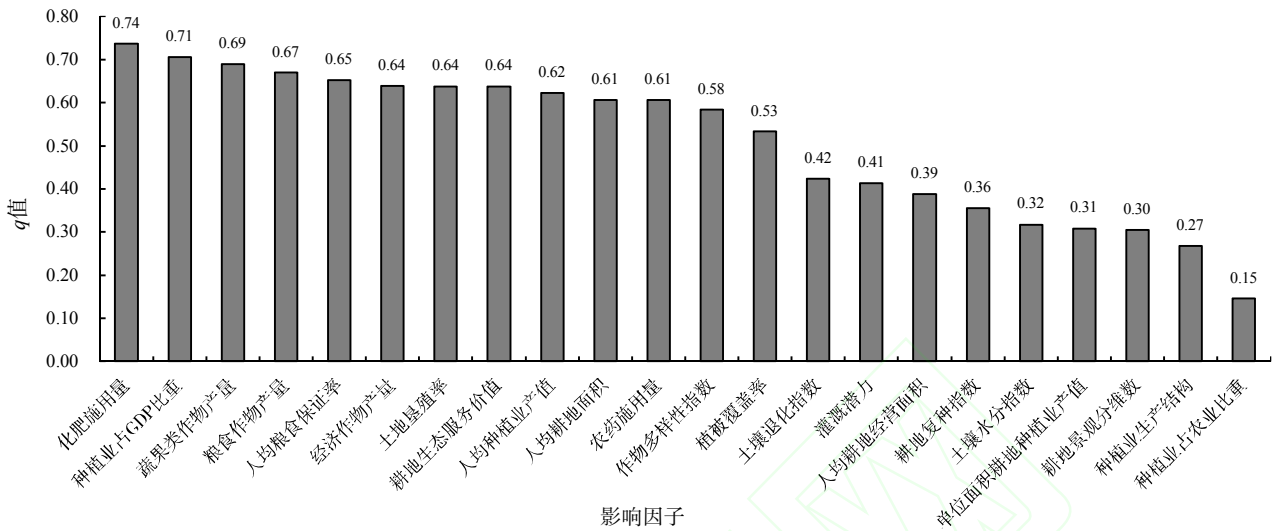


图4 基于地理探测器的因子影响程度分析

Fig.4 Factors analysis of coupling coordinative degree between cultivated land multifunctionality and its security based on GeoDetector

最为明显,减少幅度高达95.67%,导致这些镇(街)耕地多功能性与安全耦合协调度大幅下降且相对较低。而在基本农田建设等项目的实施下,莲洲镇、白蕉镇和平沙镇维持相对较好的耕地资源禀赋,因此耦合协调度较高。可见,珠海市亟需从保证耕地资源禀赋入手,继续落实耕地占补平衡制度,创新耕地保护补偿机制;严格控制优质耕地非农化,确保高标准基本农田数量不减少;将西部地区生产条件好、质量高的耕地划定为基本农田进行保护,对东部地区应严格限制除重大项目确需占用以外其他形式的耕地占用。

3.2.2 耕地利用效益 种植业占GDP比重和人均种植业产值共同反映了耕地利用效益改变对珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度产生的影响。究其原因,耕地利用效益的改变意味着农户从事耕地利用活动的收益发生变化(宋小青等,2012b),继而影响农户对耕地的依赖程度、耕作积极性和耕地保护意愿,耕地利用效益过低甚至会引发耕地撂荒等现象(李升发等,2016),威胁着对耕地多功能性与安全耦合协调发展。随着全市产业结构的调整,农业在国民经济中的地位下降,种植业在国民经济中的份额减少,1990—2015年珠海市镇域种植业占GDP比重呈减少趋势。同时,在全市人口规模增加、空间发展战略执行的背景下,各镇(街)人均种植业产值朝不同方向发展。处于东部的南屏镇、唐家湾镇和香洲主城区,作为都市功能提升区,承担着经济发展、产业升级等职能,人均种植业产值不断减少,分别减少了60.45%、38.51%和94.95%,导致

耦合协调度的下降。而作为生态农业商品基地的莲洲镇、乾务镇和平沙镇,其耕地经营依托现代生态观光农业的发展,带动人均种植业产值的增加,促进耕地多功能性与安全耦合协调度的提高。据此,珠海市应当积极提高耕地利用效益,推广农业产业化和规模化经营,落实惠农补贴政策,促进种植业纯收益和比较效益的提升,提高农民积极性;对西部地区继续发展特色生态农业,对东部地区重点提高农业机械化水平、加大生物化学技术投入。

3.2.3 耕地种植结构 粮食作物产量、经济作物产量、蔬果类作物产量和人均粮食保证率共同反映了耕地种植结构的调整影响着珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度。耕地种植结构调整不仅决定着作物生产功能的发展,也在粮食保障方面影响着社会保障能力,还与耕地利用方式变化息息相关,在一定程度上会带来土壤养分失衡等负面影响(张英男等,2018),对耕地安全水平产生胁迫,驱动着耕地多功能性与安全耦合协调度发生变化。珠海市农户作为自负盈亏的主体,追求种植具更高附加值的农作物,因而根据收益差异对粮食作物、经济作物和蔬果类作物的种植进行结构性调整,表现为蔬果类作物产量有所增加而粮食作物产量和经济作物产量大幅度减少,引致全市作物总产量由1990年的 18.5×10^9 kg减为2015年的 0.24×10^9 kg,减少了86.95%。各镇(街)作物总产量和人均粮食保证率也呈现不同程度的减少,这不利于耕地多功能性与安全的协调发展。因此,珠海市亟待通过实行粮食生产补贴等政策,提高农户种粮积极性以确保粮食

安全;通过提高农业机械化水平、建设高标准基本农田等途径,保障农作物绿色、多样化、高效生产;对西部地区应保障高产农田、改造中低产农田,对东部地区可鼓励种植有观赏、休闲价值的作物,严禁耕地闲置。

3.2.4 化学物质投入量 化肥施用量和农药施用量共同反映了化学物质投入量对珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度具有影响。在农业生产活动中,化肥、农药等化学物质的投入量既决定着耕地生产能力的高低,也决定着耕地生态环境状况的好坏。基于对生态环境建设与保护的重视,1990—2015年珠海市各镇(街)化肥施用量和农药施用量表现为不同程度的减少:白蕉镇、乾务镇和平沙镇的化学物质投入量分别减少了62.47%、58.91%和42.54%,对该地区耕地多功能性与安全的协调发展具有正向作用;而横琴镇、唐家湾镇和香洲主城区的化学物质投入量减幅分别高达92.24%、93.87%和95.03%,耕地安全得以维持而耕地多功能性未得到充分发展,遏制着该地区耦合协调度的提升。据此,珠海市仍需严格落实生态安全保护措施,合理投入化肥、农药以保护耕地质量及其生态环境,维护耕地安全,同时可加大农田机械化水平、水利设施等建设力度,采取定向援助等各项政策支持和激励农产品主产区,促进耕地多功能性可持续发展。

4 结论

以中国改革开放以来经济快速发展地区、粤港澳大湾区核心城市之一的珠海市为例,基于镇域尺度,对1990—2015年珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的时空变化及其影响因子进行探讨,主要研究结论为:

1)珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的变化表现出明显的时间阶段性特点,1990—2000年变化相对平缓而2000—2015年变化相对剧烈。1990—2015年全市耦合协调度的平均水平逐步下降,由0.65下降为0.59。

2)珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度下降区域主要分布在东部,如横琴镇、香洲主城区、南屏镇、唐家湾镇等,上升区域主要包括西部的斗门镇、莲洲镇和南水镇。整体上耦合协调度呈西部高于中部和东部的分布格局,高值区主要分布在西南部和西北部,如白蕉镇、莲洲镇、乾务镇和平沙镇;低值区主要包括东部的唐家湾镇、横琴镇、香洲主城区以及井岸镇、南水镇。

3)根据地理探测器的结果可知:不同因子对耕地多功能性与安全耦合协调度演变的影响程度存在差异,其中反映耕地资源禀赋、利用效益、种植结构及化学物质投入量,如土地垦殖率、种植业占GDP比重、各类作物产量、化肥农药施用量等是珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度演变的主导影响因子。珠海市未来应通过保证耕地资源禀赋、提高耕地利用效益、优化种植结构和化学物质投入量等途径,促进耕地多功能与安全耦合协调发展。

文章探讨了珠海市镇域耕地多功能性与安全耦合协调度的时空变化过程,在一定程度上完善了对其认识的体系,并结合主导影响因子解析了耦合协调度逐步下降的原因,对今后促成珠海市耕地多功能性与安全和谐统一、同步达到最优水平具有指导价值。由于耕地多功能性与安全是一个复杂体系,进一步探究各项耕地功能与安全间横向耦合协调程度将是后续研究的重点。另外,囿于个别指标数据获取难度较大,后续研究还需要进一步补充完善耕地多功能性与安全评价指标体系。

参考文献 (References):

- 艾凤巍. 2018. 呼伦贝尔地区耕地集约利用与生态安全协调发展研究. 中国农业资源与区划, 39(4): 193-199. [Ai Fengwei, 2018. The Coordinated Development of Cultivated Land Intensive Use and Ecological Security in Hulunber Area. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 39(4): 193-199.]
- Bommarco R, Kleijn D and Potts S G. 2013. Ecological Intensification: Harnessing Ecosystem Services for Food Security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4): 230-238.
- Chen L, Song G, Meadows M E and Zou C. 2018. Spatio-temporal Evolution of the Early-warning Status of Cultivated Land and Its Driving Factors: A Case Study of Heilongjiang Province, China. *Land Use Policy*, 72: 280-292.
- Deng X, Gibson J and Wang P. 2017. Management of Trade-offs Between Cultivated Land Conversions and Land Productivity in Shandong Province. *Journal of Cleaner Production*, 142: 767-774.
- 杜继丰, 袁中. 2015. 基于耕地多功能需求的巨型城市区耕地保护阈值探讨——以珠江三角洲为例. 自然资源学报, 30(8): 1255-1266. [Du Jifeng and YUAN Zhongyou. 2015. Cultivated land Protection Threshold Calculation from Perspective of Multifunctional Demands for Cultivated land in Mega-urban Region-A Case Study in the Pearl River Delta. *Journal of Natural Resources*, 30(8): 1255-1266.]
- 范业婷, 金晓斌, 项晓敏, 杨绪红, 刘晶, 周寅康. 2018. 苏南地区耕地多功能评价与空间特征分析. 资源科学, 40(5): 980-992. [Fan Yeting, Jin Xiaobin, Xiang Xiaomin, Yang Xuhong, Liu Jing and Zhou Yinkang. 2018. Evaluation and Spatial Characteristics of Arable Land Multifunction in Southern Jiangsu. *Resources Science*, 40(5): 980-992.]
- 匡丽花, 叶英聪, 赵小敏, 郭熙. 2018. 基于改进TOPSIS方法的耕地系

- 统安全评价及障碍因子诊断. 自然资源学报, 33(9): 1627-1641. [Kuang Lihua, Ye Yingcong, Zhao Xiaomin and Guo Xi. 2018. Evaluation and Obstacle Factor Diagnosis of Cultivated Land System Security in Yingtan City Based on the Improved TOPSIS Method. *Journal of Natural Resources*, 33(9): 1627-1641.]
- 李升发, 李秀彬. 2016. 耕地撂荒研究进展与展望. 地理学报, 71(3): 370-389. [Li Shengfa and Li Xiubin. 2016. Progress and Prospect on Farmland Abandonment. *Acta Geographica Sinica*, 71(3): 370-389.]
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington DC: World Resources Institute.
- 彭保发, 郑俞, 刘宇. 2018. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. 地理科学, 38(3): 361-367. [Peng Baofa, Zheng Yu and Liu Yu. 2017. Coupling Ecosystem Services and Regional Ecological Security Pattern. *Scientia Geographica Sinica*, 38(3): 361-367.]
- 彭建, 刘志聪, 刘焱序, 陈昕, 赵会娟. 2016. 京津冀地区县域耕地景观多功能性评价. 生态学报, 36(8): 2274-2285. [Peng Jian, Liu Zhicong, Liu Yanxu, Chen Xin and Zhao Huijuan. 2016. Assessment of Farmland Landscape Multifunctionality at County Level in Beijing-Tianjin-Hebei Area. *Acta Ecologica Sinica*, 36(8): 2274-2285.]
- 宋戈, 王越, 雷国平. 2014. 松嫩高平原黑土区耕地利用系统安全影响因子作用机理研究——以黑龙江省巴彥县为例. 自然资源学报, 29(1): 13-26. [Song Ge, Wang Yue and Lei Guoping. 2014. Land Use System Security of Black Soil Region in Songnen High Plain: A Case Study of Bayan County in Heilongjiang Province. *Journal of Natural Resources*, 29(1): 13-26.]
- Song X, Huang Y, Wu Z F and Ouyang Z. 2015. Does Cultivated Land Function Transition Occur in China?. *Journal of Geographical Sciences*, 25(7): 817-835.
- 宋小青, 欧阳竹. 2012a. 耕地多功能内涵及其对耕地保护的启示. 地理科学进展, 31(7): 859-868. [Song Xiaoqing and Ouyang Zhu. 2012a. Connotation of Multifunctional Cultivated Land and Its Implications for Cultivated Land Protection. *Progress in Geography*, 31(7): 859-868.]
- 宋小青, 欧阳竹. 2012b. 1999—2007年中国粮食安全的关键影响因素. 地理学报, 67(6): 793-803. [Song Xiaoqing and Ouyang Zhu. 2012b. Key Influencing Factors of Food Security Guarantee in China during 1999-2007. *Acta Geographica Sinica*, 67(6): 793-803.]
- Tschamtké T, Clough Y, Wanger T C, Jackson L, Motzke I, Perfecto I, Vandermeer J and Whitbread A. 2012. Global Food Security, Biodiversity Conservation and the Future of Agricultural Intensification. *Biological Conservation*, 151(1): 53-59.
- Verhagen W, Van Zanden E H, Strauch M, Van Teeffelen A J A and Verburg P H. 2018. Optimizing the Allocation of Agri-environment Measures to Navigate the Trade-offs Between Ecosystem Services, Biodiversity and Agricultural Production. *Environmental Science & Policy*, 84: 186-196.
- 王成, 彭清, 唐宁, 李颖颖. 2018. 2005—2015年耕地多功能时空演变及其协同与权衡研究——以重庆市沙坪坝区为例. 地理科学, 38(4): 590-599. [Wang Cheng, Peng Qing, Tang Ning and Li Haoying. 2018. Spatio-temporal Evolution and the Synergy and Trade-off Relationship of Cultivated Land Multi-function in 2005-2015: A Case of Shapingba District, Chongqing City. *Scientia Geographica Sinica*, 38(4): 590-599.]
- 王芳, 冯艳芬, 卓莉, 周涛. 2013. 基于改进遗传算法投影寻踪的大城市郊区耕地安全综合评价. 热带地理, 33(4): 373-380. [Wang Fang, Feng Yanfen, Zhuo Li and Zhou Tao. 2013. Comprehensive Evaluation of Arable Land Security in Metropolitan Suburbs Using Projection Pursuit Model Based on Improved Genetic Algorithms. *Tropical Geography*, 33(4): 373-380.]
- 王枫, 董玉祥. 2015a. 基于灰色关联投影法的土地利用多功能动态评价及障碍因子诊断——以广州市为例. 自然资源学报, 30(10): 1698-1713. [Wang Feng and Dong Yuxiang. 2015a. Dynamic Evaluation of Land Use Functions Based on Grey Relation Projection Method and Diagnosis of Its Obstacle Indicator: A Case Study of Guangzhou City. *Journal of Natural Resources*, 30(10): 1698-1713.]
- 王枫, 董玉祥. 2015b. 广州市土地利用多功能的空间差异及影响因素分析. 资源科学, 37(11): 2179-2192. [Wang Feng and Dong Yuxiang. 2015b. Spatial Differences and Influencing Factors of Land Use Function in Guangzhou. *Resources Science*, 37(11): 2179-2192.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng and Xu Chengdong. 2017. Geodetector: Principle and Prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134.]
- 吴大放, 刘艳艳, 董玉祥, 刘海珍, 倪少春. 2009. 珠海市耕地变化时空特征及其驱动力分析. 热带地理, 29(5): 472-476. [Wu Dafang, Liu Yanyan, Dong Yuxiang, Liu Haizhen and Ni Shaoshun. 2009. Analysis on the Spatial-temporal Changes of Cultivated Land and Their Driving Forces in Zhuhai. *Tropical Geography*, 29(5): 472-476.]
- 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 2003. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 18(2): 189-196. [Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, Zheng Du and Li Shuangcheng. 2003. Ecological Assets Valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 189-196.]
- 徐珊, 宋戈, 李丹, 王扬. 2012. 东北粮食主产区耕地资源时空变化及其对粮食生产能力的影响. 农业工程学报, 28(21): 1-9. [Xu Shan, Song Ge, Li Dan and Wang Yang. 2012. Spatial-temporal Variation of Cultivated Land and Its Effects on Grain Production Capacity of Northeast Grain Main Production Area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(21): 1-9.]
- 叶晓琪, 宋小青, 谭子安, 吴志峰. 2017. 大都市镇域耕地功能格局及其成因——以广州市为例. 热带地理, 37(6): 862-873. [Ye Xiaohui, Song Xiaoqing, Tan Zi'an and Wu Zhifeng. 2017. Functional Pattern of Cultivated Land and Its Cause in Metropolitan at the Sub-district Scale: A Case Study of Guangzhou. *Tropical Geography*, 37(6): 862-873.]
- 叶云, 赵小娟, 胡月明. 2018. 基于GA-BP神经网络的珠三角耕地质量评价. 生态环境学报, 27(5): 964-973. [Ye Yun, Zhao Xiaojuan and Hu Yueming. 2018. Evaluation of Cultivated Land Quality in Pearl River Delta Based on GA-BP Neural Network. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(5): 964-973.]
- 张冰洁, 宋戈. 2012. 松嫩高平原黑土区典型地域耕地生态安全评价及驱动力分析——以黑龙江省绥化市为例. 水土保持研究, 19(3): 215-220. [Zhang Bingjie and Song Ge. 2012. Evaluation on Cultivated Land Ecological Security and Analysis on the Driving Forces of the Typical Mollisols Area in Songnen High Plain: A Case Study of City in

- Heilongjiang Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 19(3): 215-220.]
- 张浩, 冯淑怡, 曲福田. 2017. 耕地保护、建设用地集约利用与城镇化耦合协调性研究. *自然资源学报*, 32(6): 1002-1015. [Zhang Hao, Feng Shuyi and Qu Futian. 2017. Research on Coupling Coordination Among Cultivated Land Protection, Construction Land Intensive Use and Urbanization. *Journal of Natural Resources*, 32(6): 1002-1015.]
- 张英男, 龙花楼, 戈大专, 屠爽爽, 曲艺. 2018. 黄淮海平原耕地功能演变的时空特征及其驱动机制. *地理学报*, 73(3): 1-17. [Zhang Yingnan, Long Hualou, Ge Dazhuan, Tu Shuangshuang and Qu Yi. 2018. Spatio-temporal Characteristics and Dynamic Mechanism of Farmland Functions Evolution in the Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Geographica Sinica*, 73(3): 1-17.]
- 赵宏波, 马延吉. 2014. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子——以吉林省为例. *应用生态学报*, 25(2): 515-524. [Zhao Hongbo and Ma Yanji. 2014. Spatial-temporal Pattern and Obstacle Factors of Cultivated Land Ecological Security in Major Grain Producing Areas of Northeast China: A Case Study in Jilin Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(2): 515-524.]
- Zheng W, Ke X Zhou T and Yang B. 2018. Trade-offs Between Cropland Quality and Ecosystem Services of Marginal Compensated Cropland-A Case Study in Wuhan, China. *Ecological Indicators*, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.089>.
- Zhou D, Xu J and Lin Z. 2017. Conflict or coordination? Assessing Land Use Multi-functionalization Using Production-living-ecology Analysis. *Science of the Total Environment*, 577: 136-147.

Coupling Coordinative Degree Analysis of Cultivated Land Multifunctionality and Its Security at Town Scale in Zhuhai

Li Jiayi¹ and Dong Yuxiang^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Xinhua College of Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510520, China)

Abstract: As a coupling system of human-nature, cultivated land multifunctionality and its security are critical to the sustainable development of cultivated land and human society. Meanwhile, studying the coupling coordinative development between cultivated land multifunctionality and its security is also the key to deepen the utilization and protection of cultivated land. Especially for Zhuhai, it's important to analyze the coupling coordinative development between cultivated land multifunctionality and its security in the period of rapid development of urbanization. In that case, taking Zhuhai as the research area, selecting town scale and using land use data and socio-economic statistics data, this article studies the temporal and spatial variation of the coupling coordinative degree between cultivated land multifunctionality and its security at town scale in Zhuhai during 1990—2015 with the comprehensive index evaluation method and the coupling coordinative degree model. Besides, by using the Geodetector, this article also reveals the main factors behind the coupling coordinative development between cultivated land multifunctionality and its security. Conclusions are drawn as follows: (1)the temporal variation of the coupling coordinative degree between cultivated land multifunctionality and its security at town scale in Zhuhai is relatively moderate during 1990-2000 but drastic during 2000—2015, decreasing gradually from 0.65 to 0.59. (2)The spatial variation of the coupling coordinative degree shows a trend of increasing in the western area and decreasing in the eastern area. Its spatial distribution becomes scattered, showing the higher coupling coordinative degree in the western area than that in the midterm and eastern area. (3) According to the Geodetector, different factor has a different impact on the coupling coordinative development between cultivated land multifunctionality and its security at town scale in Zhuhai during 1990-2015. Factors such as land reclamation rate, planting industry's proportion in GDP, output of crops, the amount of chemical fertilizer and pesticide application are the main factors affecting the coupling coordinative development, by acting on cultivated land resource endowment, cultivated land utilization efficiency, cultivated land planting structure and chemical substance input.

Key words: cultivated land multifunctionality; cultivated land security; coupling coordination degree; Geodetector; Zhuhai