

浙江省耕地多功能时空格局变化、影响因素及空间溢出效应

陈 莎¹, 杨润佳², 李 冠^{3*}

(1. 浙江财经大学公共管理学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058; 3. 宁波大学法学院, 宁波 315211)

摘 要: 探讨耕地多功能的时空变化规律、影响因素及其空间上的溢出效应或交互作用, 对深化耕地多功能认知、提升耕地资源可持续利用能力具有重要意义。该研究选取浙江省为研究区域, 基于耕地利用、气象、土壤、社会经济等数据, 综合运用 GIS 制图、空间自相关分析和基于可拓展随机性环境影响评估 (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology, STIRPAT) 的面板空间计量模型探讨了浙江省 2000—2015 年耕地多功能的时空变化特征、影响因素及空间溢出效应。结果表明: 1) 2000—2015 年浙江省各区县耕地功能综合水平呈现“先减少, 后增长”的变化趋势, 耕地物质产出功能、净固碳功能和景观美学功能均呈上升趋势, 水源涵养功能保持平稳, 劳动力承载功能逐步降低; 2) 耕地多功能水平的提升对邻近地区有较强的辐射影响作用, 本县域耕地多功能水平每增长 1% 将导致邻近县域耕地多功能水平增长 0.224%。农业劳动力、农村居民可支配收入和农业机械水平对耕地多功能具有显著的正向效应, 第二产业占比和城镇化水平对耕地多功能具有显著的负向效应; 3) 第二产业占比、农业现代化水平、农业劳动力投入对耕地多功能有直接效应, 城乡居民收入、城镇化水平对耕地多功能水平有溢出效应。研究建议重视区县内部以及区县与邻近地区之间的空间交互作用, 加强区域间土地整治、生态保护和农业技术升级等多方面合作。应充分考虑各县域资源禀赋的特殊性以及社会经济发展阶段的异质性, 制定针对性的耕地保护和农业扶持适应策略。

关键词: 土地利用; 耕地多功能; 面板空间计量; 空间溢出效应; 空间杜宾模型; 浙江省

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.16.003

中图分类号: F301.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-16-0021-12

陈莎, 杨润佳, 李冠. 浙江省耕地多功能时空格局变化、影响因素及空间溢出效应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 21–32. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.16.003 <http://www.tcsae.org>

Chen Sha, Yang Runjia, Li Guan. Spatiotemporal variation, influencing factors and spatial spillover of cultivated land multifunction in Zhejiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 21–32. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.16.003 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

耕地作为乡村土地资源的精华, 不但是国家粮食安全的物质基础, 更为满足人类生存和发展需要提供了多元化的服务和功能, 包括粮食、蔬菜等物质供给功能, 调节气候、涵养水土等生态功能, 以及提供开敞空间、体现乡村风貌等景观文化功能^[1]。由于耕地资源异质性、耕地利用多宜性和社会经济发展以及居民消费需求转变等综合作用, 耕地功能表现出一定的层次性和阶段性^[2]。中央一号文件连续四年 (2018—2021) 提出充分挖掘乡村多种功能和价值, 全面、协同、系统地发挥有耕地资源的多种功能, 为乡村振兴和双循环背景下推进农业高质量发展提供重要动力源。在此背景下, 探讨耕地多功能的时空变化规律和影响机理对深化耕地利用多功能认知、推动耕地资源保护和可持续管理具有重要意义^[3]。

21 世纪以来, 中国学者在耕地多功能内涵^[1]、耕地多功能分类及评价指标体系构建^[4]以及耕地多功能时空动态及影响因素^[5]等方面开展了较广泛的研究。耕地多功能是指耕地直接或间接地提供满足人类需要的产品及服务的自然过程及组分的能力, 通常包括产品生产、经济社会、生态调节、文化休闲等四项功能^[6]。而从中国发展实际来看, 耕地多功能源于区域发展目标的多元性、社会需求的多样性及土地利用的多宜性, 主要发挥着经济贡献、粮食生产、社会保障、生态服务等多种功能^[7]。随着经济社会发展以及居民生活方式、消费结构的转型升级, 耕地多功能类型分化^[8]、区域差异^[9]、时空格局演化^[10]等都引起了学者们的高度关注, 耕地各项功能间此消彼长或协同增长^[11]的总体态势也得到了初步揭示。目前常用的耕地多功能测度方法包括指标替代法^[12]、物质量法^[13]、价值量法^[14], 耕地多功能之间关系的研究主要采用相关分析^[11]、均方根误差^[15]、耦合协调度^[16]等定量方法。

在对耕地多功能变化驱动机制的研究中, 不少学者探讨了自然禀赋、社会经济发展、政策干预等因素对耕地利用功能演变的影响。黄孟勤等^[17]发现坡度、海拔、起伏度等自然区位因素将决定耕地的生产禀赋、种植结构以及人地关系和矛盾; Davis 等^[18]认为区域经济发展背景下的农业劳动力析出和产业结构调整是导致耕地多功能变化的主要外部因素; 此外, 粮食安全、惠农及生态

收稿日期: 2022-07-01 修订日期: 2022-08-05

基金项目: 浙江省自然科学基金探索项目 (LQ21G030003); 浙江省省属高校基本科研业务费专项 (SJWY2021002); 宁波市社会科学基地项目 (JD5-ZD41)

作者简介: 陈莎, 博士, 讲师。研究方向为土地利用与城乡发展、耕地保护。
Email: chensha@zufe.edu.cn

*通信作者: 李冠, 博士, 讲师。研究方向为国土空间规划与生态系统服务。
Email: liguan@nbu.edu.cn

保护等政策干预也已成为影响耕地多功能变化的关键因素^[19]。总体上看,自然因素对耕地多功能起着基础性的主导作用,政策因素能在较短的时间内产生明显的效果,而城镇化及社会经济发展产生的效应则是更为复杂、长期且具有阶段性,但目前关于社会经济因素对耕地多功能的影响机制剖析不够深入。纵观以往研究,学者们多采用主成分分析^[20]、线性回归^[21]等探讨各项因素对耕地多功能的数量关系和影响程度,遗憾的是,上述研究并未考虑到区域之间客观存在的空间外溢对耕地多功能演变的影响。

就耕地利用的空间溢出而言,耕地空间位置的相邻性导致耕地某一利用主体福利受其他利用主体行为的影响,即耕地利用具有外部性^[22]。不少学者从不同角度对耕地利用表现的空间溢出现象进行了探讨,例如侯孟阳等^[23]运用省级面板数据实证发现化肥施用强度对农业生产效率的影响存在空间溢出效应,徐清华等^[24-25]运用空间杜宾模型分别检验了农业机械化对农业碳排放、粮食产量的空间溢出效应。随着外部性理论延伸到空间计量经济学领域^[26],空间计量方法在实证研究方面已被广泛运用,能够很好地揭示由某一解释变量变化对该地域单元的影响(直接效应)以及对相邻地域单元的影响(溢出效应)。在耕地利用功能研究领域,已有研究对耕地多功能在地理空间上的溢出效应关注比较缺乏。如何从空间相关性的角度理解耕地多功能变化的驱动机理,各项影响因素对耕地多功能的影响是否在空间上存在溢出效应和互馈作用,这些是本文拟解决的核心问题。

浙江省是走在改革开放前沿的先行者,在全国范围内属于经济较发达地区,但浙江省的耕地资源表现出“耕地总量少、人均耕地少、耕地后备资源少”的“三少”特征,经济发展与耕地保护的矛盾十分突出,对此区域开展耕地多功能时空分异及演变驱动机理研究能为优化耕地资源配置和促进耕地保护提供依据。综上,针对目前研究存在的不足和浙江省耕地多功能转型利用的紧迫性,本研究从地理学重视区域差异性与空间依赖性的视角切入,以浙江省 69 个县(区)域单元为研究样本,在已有研究基础上,选择合理的指标评价耕地的各项功能;随后,通过 GIS 制图和空间自相关方法识别耕地功能的时空分异特征,并运用基于可拓展随机性环境影响评估(STIRPAT)的空间计量方法定量探讨社会经济因素对耕地多功能变化的直接效应和溢出效应,为推进浙江省耕地资源的合理配置与利用,促进耕地资源保护和可持续利用提供量化依据和决策支撑。

1 耕地多功能变化影响机理分析

结合已有研究对耕地多功能驱动因素以及关于耕地利用空间溢出效应的理论线索,本文梳理了社会经济要素对耕地多功能变化的直接效应和间接效应,劳动力转移、经济发展水平、农业技术升级能够深刻改变耕地利用方式从而对耕地多功能产生直接效应,并通过空间邻近性、区域竞争与示范以及要素空间流动对耕地多功能形成溢出效应。

1.1 社会经济因素对耕地多功能变化的直接效应

基于系统观的视角,耕地利用系统是由自然生态子系统与人工社会经济子系统耦合而成的复合系统,其承载的社会、经济、生态功能具有协同性,其演变也受到自然条件、耕地资源禀赋、社会经济发展、政策环境等多因素影响和制约^[27],其中城镇化及社会经济发展对耕地多功能的作用最为显著,并具有长期性和阶段性特征。已有研究表明,农业劳动力析出和产业结构调整是导致耕地多功能变化的主要外部因素^[18],其影响可以从劳动力转移、经济发展水平、农业技术升级三方面具体分析:1)随着农村劳动力向非农业部门大规模转移,土地闲置与农业劳动力老龄化、妇女化现象逐渐凸显^[28],可能导致耕地利用边际化;2)城市化推进和工业化快速发展会占用大量优质耕地资源,但能为农业生产提供一定的技术、要素支撑,同时也会促使石油农业的发展,增加耕地利用碳排放和污染排放^[29]。同时,随着社会经济水平的提升,城市居民收入不断增长,公众对于绿色生态产品的意识和需求提升,促进景观农业、休闲农业、生态农业等新型业态不断发展^[30];3)随着劳动力成本的逐渐上升,更多的剩余劳动力得以从农业生产中解放出来,促进机械投入增加替代劳动力,进而缓解了农村劳动力缺口对农业生产活动带来的冲击。随着农民生活水平的提高,农户对耕地绿色低碳利用、保护的意愿相对更强,最终反映在其耕地利用实践之中^[31]。

1.2 耕地多功能变化的空间溢出效应

类似环境污染具有容易在区域间扩散的特性,在耕地功能方面亦是如此。耕地多功能变化的空间溢出效应可通过以下三条路径产生:1)空间邻近性。地理空间邻近的地区更易形成污染的集聚,而某地区耕地的多功能变化能够对邻近地区产生扩散效应。比如,化肥施用强度较大的地区不仅能够对本地区耕地生产和生态环境产生影响,也会造成邻近地区耕地的生产和生态环境受到波及^[23];2)区域竞争与示范效应。耕地多功能水平较高的地区会对周围地区形成示范效应与辐射带动作用,一些耕地保护和农业扶持政策,例如建设农业示范区,聚焦重点区县保护优质耕地,基本农田集中连片建设等都会导致地区间生产要素投入与农业生态发挥邻里效应,使得邻近地区耕地多功能可能在空间上存在高度的正向关联^[32];3)人口、资金、信息等要素流动。农村劳动力的空间转移、农业机械服务的跨区作业等投入要素的空间流动性能使得本地区与邻近地区耕地生产与生态功能存在空间上的相互影响^[22]。

2 研究方法 with 数据说明

2.1 研究区域

浙江省位于中国东南沿海,长江三角洲尾部南翼(27°02'E~31°11'E, 118°01'N~123°10'N),陆地总面积 10.55 万 km²,其中耕地面积为 208.17 万 hm²。浙江省地形地貌复杂多样,地势自西南向东北呈阶梯状倾斜(图 1),素有“七山一水二分田”之说,由于人口众多,人均耕地仅 0.04 hm² 左右,不及全国人均耕地水平的一

半。2020 年浙江省粮食总产量为 606 万 t，占全国粮食总产量的 0.91%。浙江省是中国经济最活跃的省份之一，2021 年常住人口城镇化率达到 72.2%，人均 GDP 达到 10.1 万元。快速工业化、城镇化导致浙江省耕地规模显著减少和生态质量下降。加之当前气候变化和各类“黑天鹅”事件频发、粮食安全系统韧性不足、城乡空间重构以及居民消费需求转型等因素，都对耕地利用和管理进一步提出了严峻挑战。

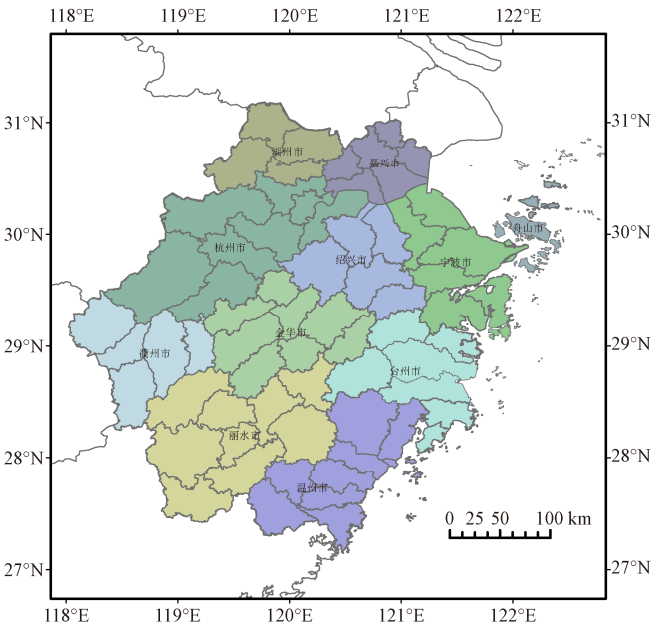


图 1 浙江省地理位置图
Fig.1 Geographical map of Zhejiang Province

2.2 研究方法

2.2.1 耕地多功能测算

本文综合考虑耕地的生产、生态、社会和文化功能分类体系，选取目前广受学者关注的物质产出、净固碳、水源涵养、劳动力承载和景观美学 5 种重要的耕地功能进行定量测算。具体测算过程及计算式见表 1。

1) 物质生产功能：耕地作为基本的农业生产资料，核心功能之一是物质生产功能。农作物的产出规模是衡量物质生产功能的常用指标^[33]，但这种标准过于零散且无法形成统一的度量尺度，容易导致经济作物价值被低估。考虑到浙江省经济作物播种面积占比较大（2015 年占农作物播种总面积的 47.6%），只考虑各类作物产量可能造成评价结果失真。本研究采用单位耕地面积的农业总产值衡量耕地的物质生产功能，并对各年度农业总产值进行消胀处理，转化为 2000 年基期农业总产值。

2) 净固碳功能：耕地系统的固碳减排具有巨大潜力，耕地的净固碳功能与生长周期内农作物的碳吸收量和碳排放量有关，二者都受到自然和人为因素的影响。碳吸收量参考陈丽等^[34-35]相关研究成果，基于浙江省的实际种植情况，考虑稻谷、玉米、薯类、豆类、油料 6 种作物类型的固碳量。具体参数值参考陈丽等^[34,36-38]相关研究。耕地碳排放主要表现为施用化肥、农药、地膜等物资引起的碳排放，农作物根系分泌物对土壤表层破坏所致的 N₂O 排放，以及水稻生长过程中 CH₄ 的排放。碳排放系数参考田云等^[35,39-40]的研究成果。三类碳的排放量总和即为碳排放量，碳吸收量和碳排放量相减即得耕地的净固碳量。

表 1 耕地功能及定量测算说明

Table 1 Description and quantitative calculation method of cultivated land multifunction

功能类型 Function type	指标 Indicator	计算方法 Calculation method	变量说明 Variable Declaration
物质生产功能(APF) Agricultural Production Function	地均农业产值	APF=W/S	W-2000 年为基期的实际农业总产值（万元）；S-耕地面积（hm ² ）
净固碳功能(NCF) Net Carbon Function	耕地净固碳量	$C_1 = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n c_i \cdot Y_i \times (1-r_i) \times (1+R_i) / HI_i$ $NCF = (C_1 - C_2) / S$	C ₁ -碳固定量；C ₂ -碳排放量；C _i -第 i 类农作物的碳吸收量（t）；n-作物种类数；c _i -第 i 类农作物合成单位有机物吸收的碳量；Y _i -农作物的经济产量（t）；r _i -第 i 类农作物经济产品的水分系数；R _i -农作物 i 的根冠比；HI _i -作物经济系数
水源涵养功能(WRF) Water Retention Function	农作物截留和土壤储水量	$WRF = W_1 + W_2$ $W_1 = \sum (S_i \cdot p \cdot \alpha_i \times 10)$ $W_2 = \sum (S_j \cdot H_j \cdot \rho_j \times 10^4)$	W ₁ -农作物冠层降雨截留量（m ³ ）；W ₂ -土壤层储水量（m ³ ）；S _i -第 i 种农作物的种植面积（hm ² ）；p-年降水量（mm，以前后三年均值确定）；α _i -农作物降雨截留率（%）；S _j -各区县耕地面积（hm ² ）；H _j -单位耕地土层厚度（m），ρ _j 为单位土层的非毛管孔隙率（%），按非毛管孔隙率占总孔隙率的比例 16%计算
劳动力承载功能(LCF) Labor Carrying Function	地均劳动力投入	LCF=AL/S	AL-农业劳动力人数（万人）
景观美学功能(ASF) Aesthetic Service Function	景观美学功能指数	ASF=SI/DI	SI-供给侧指数；DI-需求侧指数。具体评价方法见表 2

3) 水源涵养功能：目前测算水源涵养功能的常用方法有土壤层蓄水能力法、综合蓄水能力法、水量平衡法等。考虑到研究区的实际情况及地理位置，研究采用综合蓄水法，对农作物的冠层降水截留和土壤层水分截留作用进行估算，计算方法参考杜勇等^[41]的研究成果。

4) 劳动力承载功能：耕地发挥着重要的劳动力承载功能，也因此被视为缓冲劳动力就业风险的重要屏障。本文采用单位耕地的劳动力投入强度来表征劳动力承载

功能。

5) 景观美学功能：耕地景观美学功能是耕地文化功能的重要组成部分，其强弱受到供、需两方面的影响。需求方面，耕地景观的吸引力取决于居民的支付意愿和欣赏能力，与相邻近城市的人口规模、收入水平等因素有关；供给方面，一般认为由连片耕地、林地、水体等形成构成的“马赛克”式景观组合具有更高的美学价值^[42]。鉴于此，首先运用专家打分法确定供给侧

和需求侧指标, 权重见表 2。随后采用供给相对于需求的盈余程度(采用比值形式)来表征景观美学功能。

表 2 耕地景观美学功能评价指标体系

Table 2 Evaluation index for ASF of cultivated land

评价标准 Criterion	指标 Indicator	权重 Weight	指标说明 Description
需求侧 Demand index	需求量	0.30	县域周边最近地级以上城市人口总量
	需求水平	0.30	县域周边最近地级以上城市人均 GDP
	辐射范围强弱	0.40	县域周边最近地级市辖区中心直线距离
供给侧 Supply index	斑块集聚度	0.55	耕地景观斑块的团聚程度
	景观多样性	0.45	区域不同景观类型的多样性程度

需要说明的是, 物质生产功能、劳动力承载功能和景观美学功能的测算均以县域为基本评价单元进行, 而净固碳功能和水源涵养功能是基于相关的原始栅格数据进行计算, 因此需要转换为以县域为基本单元的矢量数据, 具体操作如下: 对浙江省县域图层生成相应分辨率的渔网(fishnet), 提取栅格数据值到渔网点数据中, 最后基于县域汇总计算平均值。由于耕地各项功能指标的量纲不同, 采用极差标准化方法对指标进行无量纲化处理。

$$Y_{ij} = \begin{cases} (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}), & \text{正向指标} \\ (X_{jmax} - X_{ij}) / (X_{jmax} - X_{jmin}), & \text{负向指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中 X_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的评价值; X_{jmax} , X_{jmin} 分别为第 j 个指标的最大值和最小值; Y_{ij} 为标准化后的指标值。

对耕地功能评价指标完成标准化后, 计算耕地多功能综合值, 计算式如下:

$$MFCI_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (2)$$

2.2.2 耕地多功能的影响因素指标

前文从劳动力转移、经济发展水平、农业技术升级三方面梳理了社会经济因素对耕地多功能的直接效应和溢出效应, 这符合环境影响评估 (Impacts by Population, Affluence and Technology, IPAT) 模型的标准形式。IPAT 模型最早由斯坦福大学的 Ehrlich 等^[43]提出, 已被广泛用于揭示不同因素对环境压力的影响。IPAT 标准模型可写为: $I = P \cdot A \cdot T$, 其中 I 代表环境影响, P 代表人口数量, A 代表富裕度, T 代表技术水平。IPAT 模型的主要限制之一是无法识别非单调或非比例的因素影响。为了克服这一局限性, Dietz 等^[44]将 IPAT 模型重构为可拓展随机性环境影响评估模型 (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology), 即 STIRPAT 模型, 表达式为 $I_i = a \cdot P_i^b \cdot A_i^c \cdot T_i^d \cdot e_i$, 其中 a 表示常数项, b, c, d 分别表示 3 个变量 (P, A, T) 的弹性系数。 e 表示不可控制或不可观察的随机变量的误差项。在大多数研究中, 通常对 STIRPAT 方程两边取对数, 将其转化为线性方程, 即 $\ln I_i = a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + e$ 。相较于 IPAT 模型, STIRPAT 模型形式更灵活, 通用性更强。

根据本文对耕地多功能的影响机制分析并结合相关学者基于 STIRPAT 模型的研究成果^[21,45-46], 最终选取了

7 个重要的社会经济因素变量: 表征人口维度的农业劳动力 ($apop$)、表征富裕水平维度的人均 GDP ($gdpp$)、城市人均可支配收入 ($udin$)、农村人均可支配收入 ($rdin$), 以及表征技术维度的第二产业占比 ($secpr$)、城镇化率 ($urat$)、农业机械动力 ($mapow$)。

2.2.3 面板空间计量模型

a. 空间相关性检验

在运用面板空间计量模型进行分析之前, 有必要通过空间自相关分析检验耕地多功能的空间集聚特征。采用 Global Moran' I 指数衡量研究区耕地功能空间分布的整体状况。Global Moran' I 指数的计算公式如下:

$$I = \frac{k \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k W_{ij} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中 \bar{x} 为所有 k 个位置 (区域) 观测值的均值; W_{ij} 为空间权重矩阵; x_i, x_j 表示在空间位置 i 和 j 的观测值。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 小于 0 表示负相关, 等于 0 表示不相关, 大于 0 表示正相关。通常采用标准化统计量 Z 值对研究单元空间自相关进行显著性检验, Z 值计算式如下:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \quad (4)$$

式中 $E(I)$ 表示 I 的均值; $VAR(I)$ 表示 I 的方差; 当 Z 值为正且显著时, 表明存在正的空间自相关, 即相似的观测值 (高值或低值) 趋于空间集聚; 当 Z 值为负且显著时, 表明存在负的空间自相关; 当 Z 值为 0 时, 观测值趋于独立随机分布。

b. 面板空间计量模型设定

空间计量模型可以有效解决线性回归分析无法处理的空间依赖性问题, 本文通过空间滞后面板模型 (Spatial Lag Panel Model, SLPM)、空间误差面板模型 (Spatial Error Panel Model, SEPM) 和空间杜宾面板模型 (Spatial Durbin Panel Model, SDPM) 来探讨空间溢出效应。SEPM 假设误差项包含空间依赖性, 通常用来描述被忽略的变量引起的空间效应, 这些变量可能同时影响局部和相邻单元。SLPM 假设个体因变量部分地受到相邻单位因变量的影响。SDPM 可以看作是 SLPM 和 SEPM 的集成, 不仅考虑了因变量受个体自变量和因变量的影响, 而且考察了独立变量和因变量在邻近地区的影响。

上述 3 种广泛使用的空间面板计量模型需要一系列的检验来选择最合适的模型。具体步骤如下: 首先采用传统拉格朗日乘子 (Lagrange Multiplier, LM) 检验和稳健 LM 检验确定空间滞后项和空间误差项的存在, 随后运用 Wald 检验和似然比 (Likelihood Ratio, LR) 检验决定是采用 SLPM、SEPM 还是 SDPM 模型, 并采用 Hausman 检验来决定是采用随机效应模型还是固定效应模型。由于空间相关性的存在, 回归系数不能准确反映计量经济模型中自变量对因变量的影响, 可利用求偏微分的方法将自变量对因变量的影响进一步分解为直接效应、间接效应和总效应^[26]。

2.3 数据来源与预处理

本文以 2000、2005、2010、2015 年浙江省 69 个区

县的面板数据为研究样本,耕地面积数据来源于浙江省历年土地利用变更调查数据库。耕地多功能测度过程和影响因素所涉及的农业投入产出数据、人口数据、社会经济数据主要来源于历年的《浙江统计年鉴》,部分来源于各地级市统计年鉴和各区县统计局。气象数据来源于中国气象数据服务共享网 (<http://data.cma.cn>)。土壤深度与孔隙率数据来源于 1:100 万中国土壤数据库。县域中心距最近地级市辖区中心直线距离数据通过百度地图的测距功能获取。耕地斑块聚集度、耕地景观多样性数据通过 Fragstats4.2 软件计算得到。部分数据由相关参考文献获得。对所有数据统一行政边界,基于 GCS_Krasovsky_1940 地理坐标系,采用 Albers 投影。

数据预处理包括:第一,针对耕地面积数据,为了消除第二次全国土地调查前后数据突变,将第二次全国土地调查公布的 2009 年耕地面积减去当年土地利用变更调查中的耕地面积,将差值加到 2000、2005 年耕地面积上,完成了对数据的校正^[47]。第二,针对部分区县个别年份个别数据的缺失,以历年数据为基础通过移动平均、

趋势外推等方法进行数据重建;第三,为了消除价格指数对农业产值的影响,将各年的农业产值转化为 2000 年可比价;第四,为了使统计数据范围与现有行政区范围一致,本文对部分行政区进行合并处理,最终以 69 个区县作为研究样本。

3 结果分析

3.1 耕地多功能时空格局分析

2000—2015 年间,浙江省耕地物质产出功能从 14 942 元/hm² 增长至 27 578 元/hm²,2010 年略有下降(图 2)。在 4 个时间节点上,碳固定功能值分别为 2.480、2.580、4.062 和 4.575 t/hm²,呈逐步增加趋势。耕地保水功能值保持相对稳定,主要是由于降水量在研究区内较为平稳。劳动力承载功能持续下降,2000 年为 11.45 人/hm²,2015 年降至 2.89 人/hm²。2000、2005、2010 和 2015 年,耕地景观美学功能值分别为 1.168、1.166、1.033、1.316,呈先下降后上升的趋势。浙江省 2000、2005、2010 和 2015 年的多功能综合值分别为 1.316、1.311、1.666、1.748,呈现先下降后上升趋势。

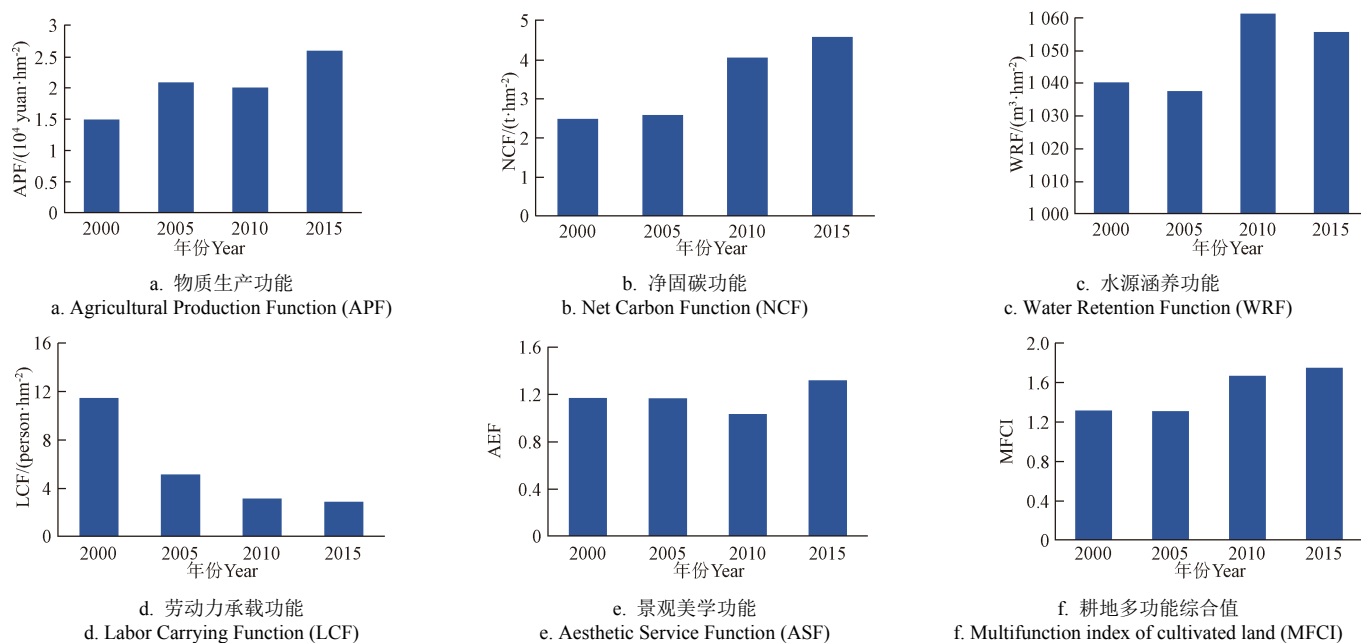


图 2 2000—2015 年浙江省耕地多功能变化

Fig.2 Multifunction variation in Zhejiang Province from 2000 to 2015

就耕地多功能综合值而言,高值区域(MFCI>1.6)的县区数量显著增加(图 3),由 2000 年的 6 个县区增加到 2015 年的 52 个县区。2005 年,浙江省西部地区在 MFCI 上表现出绝对优势,但到 2015 年,整个区域的 MFCI 呈现相对均衡的格局。就净变化而言,浙江南部地区普遍呈下降趋势而北部地区普遍呈上升趋势(图 4)。特别值得注意的是,2005 年后 MFCI 降低的趋势在浙江北部地区基本不再出现,但南部的大部分区县在 2000—2005 和 2010—2015 年间 MFCI 都出现了明显的下降趋势,反映出耕地综合功能变化具有差异性的阶段特征。2000—2015 年间,绍兴市区和江山市的 MFCI 增幅最大,分别由 1.171 和 1.275 增至 2.596 和 2.273。庆元、龙泉、景宁、岱山、遂昌和青田等

县市下降最为明显,主要集中在浙江省西南丘陵地区。

3.2 耕地多功能影响因素分析

3.2.1 相关检验

全局 Moran's *I* 指数(表 3)表明,MFCI 值和各项影响因子均表现出显著的空间依赖性,并且绝大多数年份在 10%水平上显著。

为了选择合适的模型以便达到最佳的拟合效果,在空间面板模型回归之前需进行一系列的检验。首先,传统 LM 检验和稳健 LM 检验的结果(表 4)均在 1%水平上显著,拒绝了不存在空间被解释变量和不存在空间自相关误差项的原假设,表明空间滞后模型和空间误差模型两个模型同时成立。同时,Hausman 检验结果在 1%水

平上拒绝随机效应（卡方统计量为 44.654， $P < 0.01$ ），说明应采用固定效应模型。

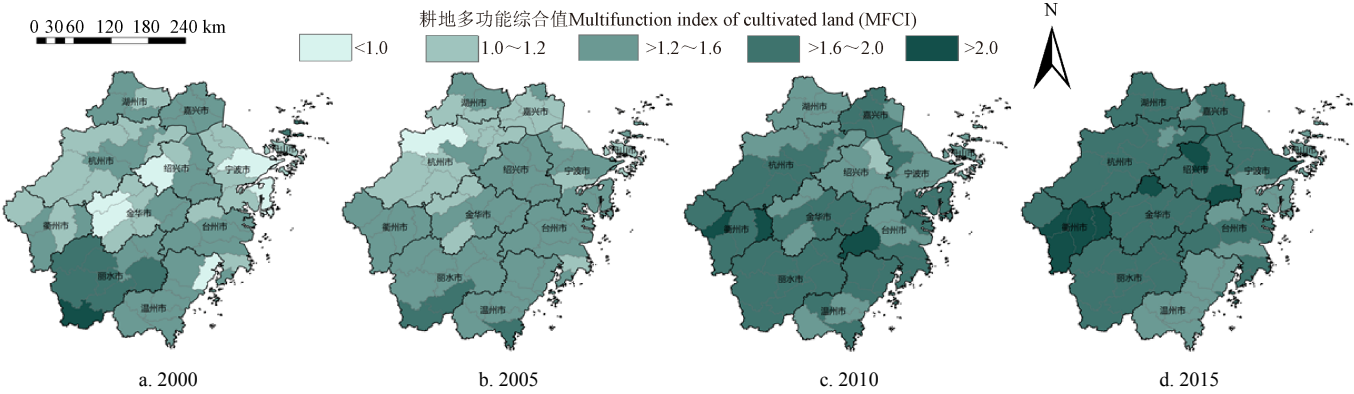


图 3 2000—2015 年浙江省耕地多功能综合值分布
Fig.3 MFCI of Zhejiang Province during 2000-2015

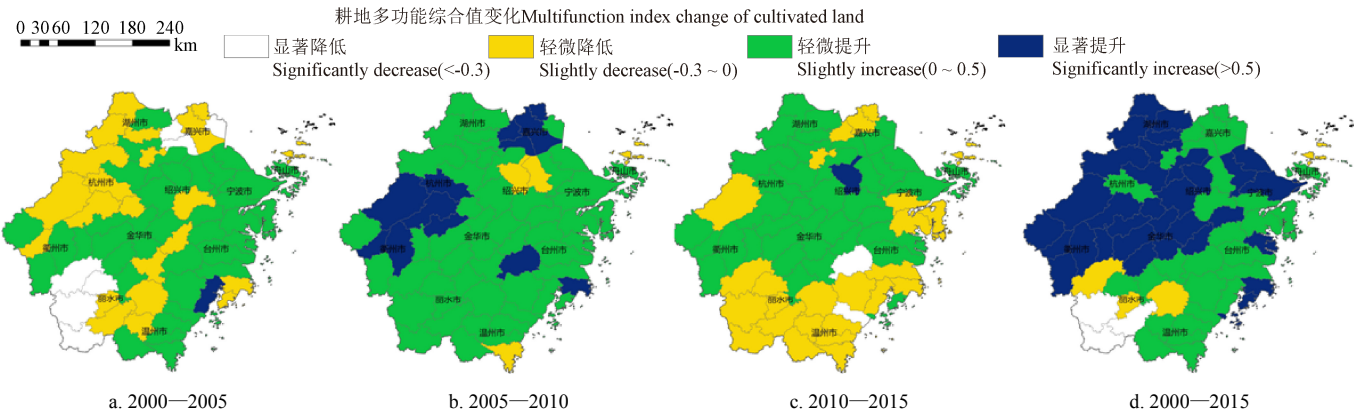


图 4 2000—2015 年浙江省耕地多功能综合值变化
Fig.4 MFCI changes of Zhejiang Province during 2000-2015

表 3 耕地多功能综合值和各影响因子 Moran's I 指数
Table 3 MFCI and Moran's I of selected independent variables

变量 Variables	2000	2005	2010	2015
耕地多功能综合值 MFCI	0.504***	0.433***	0.247***	0.387***
农业人口 $apop$	0.449***	0.029	0.073*	0.056
人均生产总值 $gdpp$	0.379***	0.358***	0.503***	0.493***
城市人均可支配收入 $udin$	0.318***	0.418***	0.489***	0.607***
农村人均可支配收入 $rdin$	0.506***	0.660***	0.685***	0.748***
第二产业占比 $secpr$	0.273***	0.271***	0.093*	0.182**
城镇化率 $urat$	0.187***	0.181**	0.300***	0.276***
农业机械动力 $mapow$	0.064*	0.174***	0.105**	0.007

注：*，**，***分别表示在 0.1、0.05、0.01 水平上显著。下同。
Note: *, **, and *** indicate significance at 0.1, 0.05, 0.01 level, respectively. Same as below.

表 4 混合最小二乘法回归模型的拉格朗日乘子检验
Table 4 Lagrange Multiplier (LM) test results of pooled OLS regression model

	检验 Test	结果值 Result	P 值 P -value
空间误差 Spatial error	拉格朗日乘子检验	73.609	0.000
	稳健拉格朗日乘子检验	13.165	0.000
空间滞后 Spatial lag	拉格朗日乘子检验	77.525	0.000
	稳健拉格朗日乘子检验	17.081	0.000

根据 Elhorst^[48]提出的判定方法，进一步检验空间杜宾模型能否简化为空间滞后模型以及空间杜宾模型能否

简化为空间误差模型。LR 检验结果显示卡方统计量分别为 19.29 和 23.75， P 值均 <0.01 ，说明拒绝空间杜宾模型能简化为空间滞后模型和空间误差模型的原假设，应采用空间杜宾模型。

3.2.2 耕地多功能影响因素分析

对比 3 类空间回归模型估计结果（表 5）的对数似然函数值 LogL 和 R^2 ，明显看出 SDPM 模型的拟合效果最好。结合前文的检验结果，具有固定效应的 SDPM 是本研究中最合适的估计模型。空间滞后项 $W \times \ln \text{MFCI}$ 为 0.224，且在 1% 水平下显著，意味着本地区的耕地多功能水平的提升对邻近地区有较强的辐射影响作用，在控制其他变量的前提下，本县域耕地多功能水平每增长 1% 将导致邻近县域耕地多功能水平增长 0.224%。从其他解释变量的系数来看，农业劳动力对 MFCI 存在显著的正效应，支持了农业劳动力转移可能驱动耕地边际化进而损害耕地多功能的观点。人均 GDP 对 MFCI 的影响在 3 类回归模型中均不显著。农村居民人均可支配收入的估计系数在 SEPM 和 SDPM 中均为显著正，城镇居民人均可支配收入的估计系数仅在 SLPM 模型中显著为正，相比之下说明农村居民家庭收入在维持农业运行及耕地功能发挥方面发挥了重要作用。第二产业占比对 MFCI 存在负向效应，且在 5% 水平下显著；城市化率仅在 SLPM 模型中 10% 水平下显著；农业机械水平在所有模型中都表

现出对 MFCI 具有显著的正效应，以上发现总体上支持了前文关于社会经济因素对耕地多功能的影响机制分析。此外，研究采用基于 Queen 相邻关系和基于欧氏距离的空间权重矩阵分别运行了 SLPm、SEPM、SDPM 三类模型，结果显示各变量的系数及显著程度无明显变化，说明本文构建的模型具有良好的稳健性。

表 5 空间滞后面板模型、空间误差面板模型与空间杜宾面板模型估计结果比较

Table 5 Estimation results of Spatial Lag Panel Model (SLPM), Spatial Error Panel Model (SEPM) and Spatial Durbin Panel Model (SDPM)

解释变量 Determinants	SLPM	SEPM	SDPM
农业人口 $\ln apop$	0.021	0.048	0.071**
人均生产总值 $\ln gdp$	-0.017	-0.006	0.039
城市人均可支配收入 $\ln udin$	0.124*	-0.041	-0.077
农村人均可支配收入 $\ln rdin$	-0.055	0.152*	0.191*
第二产业占比 $\ln secpr$	-0.055*	-0.073**	-0.083**
城镇化率 $\ln urat$	-0.075**	-0.050	-0.051
农业机械水平 $\ln mapow$	0.051**	0.062***	0.072***
农业人口空间项 $W \times \ln apop$			-0.016
人均生产总值空间项 $W \times \ln gdp$			-0.016
城市人均可支配收入空间项 $W \times \ln udin$			0.131***
农村人均可支配收入空间项 $W \times \ln rdin$			-0.142**
第二产业占比空间项 $W \times \ln secpr$			-0.009
城镇化率空间项 $W \times \ln urat$			-0.036
农业机械水平空间项 $W \times \ln mapow$			-0.005
被解释变量耕地多功能综合值 滞后项 $W \times \ln MFCI$	0.241***		0.224***
误差空间项 $W \times \ln u$		0.266***	
拟合优度 R^2	0.260	0.183	0.371
对数似然函数值 LogL	185.50	187.73	197.38

3.3 耕地多功能空间效应分析

3.3.1 影响耕地多功能的直接效应与空间溢出效应分析

表 5 中表征外生交互效应(WX)的系数显示， $W \times \ln udin$ ， $W \times \ln rdin$ 均表现出很高的显著性。为了深入剖析这一空间

交互效应，本文将总空间效应分解为直接效应与间接效应（表 6），各项解释变量的系数和显著性表明了各自的贡献程度。具体来看，对本地耕地多功能水平的直接效应贡献强度从大到小排序为：第二产业占比[#]、农业机械水平、农业劳动力、城镇化率[#]（“[#]”代表负向效应，下同），可见，产业结构、农业现代化水平、农业劳动力投入和城镇化水平对耕地多功能有显著的直接效应。第二产业占比的增加和城镇化建设占用将直接导致当地耕地功能损失。2000—2015 年浙江省城市化率已从 48.6%提升至 65.8%，耕地面积经历了快速减少到减少缓解再到略有增加的变化趋势。受到“开发区热”“房地产热”等因素的影响，2000—2010 年间是浙江省耕地大量向建设用地转变的时期^[49]，耕地占用总面积达到 9 759.02 km²，耕地补充总面积为 7 151.01 km²，占补缺口达到 2 608.01 km^{2[50]}。2011 年以后，耕地利用转型以林地补充耕地、建设用地占用耕地为主，尽管耕地面积大量减少的趋势得到遏制，但对耕地质量和生态环境依然构成较大威胁。

对耕地多功能水平的空间溢出效应影响从大到小排序为：城市居民可支配收入、农村居民可支配收入、城镇化率[#]。这表明，邻近区县的农村居民可支配收入和城镇化率对本地的耕地多功能水平有负向消减作用，而邻近地区的城市居民可支配收入高了反而对本地的耕地多功能有正向作用。可能的解释为，由于地理空间的邻近性、经济绩效竞争和农民攀比心理，邻近区县的农民收入增加会对周边地区形成竞争效应和示范效应^[23]，促使本地农民外流和产业结构转型。以余杭、富阳、临安、淳安、建德 5 个杭州的郊区县为例，2015 年余杭的农村居民可支配收入达到 25 010 元，乘着融入主城发展之势头，余杭的城乡经济发展十分迅速，并对其周边的区县，富阳和临安形成了一定的辐射带动作用，2000—2015 年间富阳和临安的农业人口分别减少了 26.7%和 36.3%，明显高于淳安（4.5%）和建德（15.4%），而 2015 年富阳和临安的耕地多功能值（分别为 1.683 和 1.536）则明显低于淳安和建德（1.726 和 1.778）。

表 6 SDPM 的直接效应、间接效应与总效应估计

Table 6 The direct, indirect and total effects of SDPM

解释变量 Determinants	直接效应 Direct effects		间接效应 Indirect effects		总效应 Total effects	
	估计系数 Estimated coefficient	标准误 Standard error	估计系数 Estimated coefficient	标准误 Standard error	估计系数 Estimated coefficient	标准误 Standard error
农业人口 $\ln apop$	0.071**	0.034	-0.007	0.114	0.064	0.113
人均生产总值 $\ln gdp$	0.035	0.051	-0.031	0.174	0.005	0.180
城市人均可支配收入 $\ln udin$	-0.027	0.081	0.773***	0.299	0.746**	0.304
农村人均可支配收入 $\ln rdin$	0.148	0.095	-0.699*	0.398	-0.551	0.425
第二产业占比 $\ln secpr$	-0.092***	0.033	-0.184	0.145	-0.277*	0.156
城镇化率 $\ln urat$	-0.065*	0.034	-0.307*	0.187	-0.372*	0.202
农业机械水平 $\ln mapow$	0.076***	0.026	0.080	0.133	0.156	0.144

另一方面，邻近区县的城市吸引了大量的发展资源后，会产生一定的“虹吸效应”，可能导致本地县域的向心力不足，资本、劳动力、技术等生产要素难以集聚，降低本地经济建设的步伐^[51]，进而缓解了农村耕地流失及多功能退化的压力。比如，有学者发现，嘉兴市市区长期身处沪杭夹缝，受两地的吸引力较强，因此所辖各

县域的资本、劳动力、技术等生产要素难以集聚^[51]，但也正因为如此，在一定程度上缓解了耕地占用和农业退化的威胁。加之嘉兴市近年来积极推动农机服务主体集约发展，通过农机装备结构的优化，催生农机事业发展，推动农业生产向规模化、集约化和现代化方向发展，2015 年嘉兴市各区县的耕地多功能平均值（1.627）明显高于

杭州各区县的耕地多功能平均值(1.496)。此外,农业人口、人均 GDP、第二产业占比以及农业机械水平对 MFCI 均不存在显著的空间溢出效应。

3.3.2 库兹涅茨曲线及其空间效应分析

为进一步验证各驱动因子对耕地多功能水平影响的阶段差异特征,在 SDPM 中加入解释变量的二次项,模型拟合度 R^2 从 0.371 增加至 0.626。从各变量的估计系数来看(表 7), $\ln gdp$ 和 $(\ln gdp)^2$, 以及 $\ln udin$ 和 $(\ln udin)^2$ 的系数分别表现一负一正,说明人均 GDP 和城市居民收入分别与耕地多功能水平形成的关系符合“U”型的库兹涅茨曲线。可能的解释是,在经济社会发展初级阶段,土地、劳动力、资本等要素皆处于发育阶段,耕地利用以传统农业生产为主^[2],生态调节、环境保育功能较强;随着经济社会逐渐发展,人口增长和耕地需求相应增加,同时工业占比不断提升,建设用地需求逐渐扩大,建设占用与耕地持留之间的矛盾不断加剧,同时耕地数量将会减少。当经济社会发展到高级水平时,由于技术改进、产业转型以及政策调整等因素,导致建设用地需求对耕地压力逐步缓和,部分地区甚至出现耕地“恢复性”增长^[52]。改革开放以来,浙江省耕地减少的速度呈现“先快后慢”的变化过程,这种变化趋势主要受到区域经济社会发展、土地管理政策等因素的影响^[49]。2000—2010 年间浙江省耕地被建设用地占用的情况仍较为明显,主要集中在宁波市辖区、慈溪市、余姚市等浙东北平原区,以及温州市辖区、苍南县等浙东南沿海区^[51]。2010—2015

年间,浙江加强落实最严格的耕地保护制度,先后实施了“365”节约集约用地行动计划、“812”土地整治工程,“两区”土壤污染防治三年行动计划等土地政策和行动计划,有效推动了耕地保护,改进了耕地的占补平衡,这一时期的耕地占补缺口也较 2000—2010 年有明显改善(从 2 608.01 km² 减少到 1 907.49 km²)^[50]。

另一方面, $\ln rdn$ 和 $(\ln rdn)^2$, 以及 $\ln mapow$ 和 $(\ln mapow)^2$ 的系数分别表现为一正一负,说明农村居民人均收入和农业机械水平与耕地多功能水平之间关系符合倒“U”型的库兹涅茨曲线关系,这可能是因为,在经济发展初级阶段,农民收入会随着人口转出导致非农收入增加,同时促进耕地流转和规模经营,农业机械水平得以提升,促进耕地多功能水平提升。当经济发展到较高水平(农民收入水平和农业机械化水平较高),耕地集约度达到较高水平,此时农业化学品(化肥等)投入都比较高,耕地固碳能力受到限制。尽管随着经济水平提升,农民可能选择更环保的农业化学品,但就本文的数据实证来看,使用更环保的化学品对耕地功能提升的生态效益还未显明,也许需要更长时间的“疗效”释放。耕地规模经营推动农业人口进一步析出,导致耕地的劳动力承载功能也降至历史最低水平,因此总体上对耕地多功能水平产生了显著负效应。此外, $W \times (\ln gdp)^2$, $W \times (\ln udin)^2$ 、 $W \times (\ln rdn)^2$ 均表现出较高的显著性,说明经济发展水平对耕地多功能的库兹涅茨效应也存在一定空间上的交互影响。

表 7 含解释变量二次项的 SDPM 估计结果
Table 7 Regression results of SDPM with squared variable items

解释变量 Determinants	系数 Coefficient	标准误 Standard error	解释变量 Determinants	系数 Coefficient	标准误 Standard error
农业人口 $\ln apop$	0.109***	0.031	$W \times \ln apop$	-0.016	0.022
人均生产总值 $\ln gdp$	-0.242	0.351	$W \times \ln gdp$	-0.926***	0.252
人均生产总值二次项 $(\ln gdp)^2$	0.012	0.018	$W \times (\ln gdp)^2$	0.044***	0.013
城市人均可支配收入 $\ln udin$	-3.837***	1.002	$W \times \ln udin$	-1.380*	0.830
城市人均可支配收入二次项 $(\ln udin)^2$	0.212***	0.055	$W \times (\ln udin)^2$	0.085*	0.046
农村人均可支配收入 $\ln rdn$	2.473***	0.899	$W \times \ln rdn$	1.502**	0.618
农村人均可支配收入二次项 $(\ln rdn)^2$	-0.140***	0.052	$W \times (\ln rdn)^2$	-0.097***	0.036
第二产业占比 $\ln secpr$	-0.130	0.090	$W \times \ln secpr$	0.022	0.075
第二产业占比二次项 $(\ln secpr)^2$	-0.022	0.039	$W \times (\ln secpr)^2$	0.020	0.032
城镇化率 $\ln urat$	-0.068	0.096	$W \times \ln urat$	-0.045	0.079
城镇化率二次项 $(\ln urat)^2$	-0.001	0.044	$W \times (\ln urat)^2$	0.002	0.035
农业机械水平 $\ln mapow$	0.347***	0.056	$W \times \ln mapow$	0.107**	0.054
农业机械水平二次项 $(\ln mapow)^2$	-0.052***	0.010	$W \times (\ln mapow)^2$	-0.021**	0.010

4 讨 论

本文的耕地功能测算结果显示,耕地多功能水平呈现出先减少后略有升高的变化过程。朱从谋等^[21]同样对浙江省耕地多功能价值进行了估算,发现粮食生产和文化休闲价值显著增加,社会保障价值显著下降,在这一研究中由于学者采用了价值量评估的方法,即计算每种服务的货币价值,从而“放大”了耕地的劳动力承载价值降低的影响,因此在研究结果中,耕地多功能综合值呈下降趋势。此外,部分学者对湖北省^[11]、北京市^[33]、

重庆市^[45]等地耕地多功能时空变化的研究发现,耕地的作物生产功能和文化休闲功能有所上升,社会保障功能持续下降。尽管不同地区的经济水平和资源禀赋条件存在较大的差异,但社会经济发展对耕地利用功能转型仍然表现出了一些共性的规律。

耕地多功能水平由自然因素与人为因素共同作用,与污染物排放、自然资源分布等类似,耕地多功能本身存在空间溢出效应。同时本文发现农业劳动力、农村居民可支配收入、农业机械水平、第二产业占比和城镇化水平对耕地多功能的影响也存在显著的空间溢出效应,因此,在制

定耕地保护和农业扶持相关措施时要重视区县内部以及区县与邻近地区之间的交互作用,在理性对待县际竞争的前提下,推动县域间土地整治、生态保护和农业技术升级等多方面合作,促进区域耕地利用系统协同发展。此外,部分社会经济变量对耕地多功能的影响符合“U”型或倒“U”型的环境库兹涅茨曲线,已有研究发现,耕地非农化、耕地生态系统服务与经济发展水平、城镇化进程之间也存在库兹涅茨曲线关系^[53],这表示耕地保护与城镇化发展之间存在“双赢”的可能性。鉴于此,应依据各县域资源禀赋与社会经济发展水平的异质性制定针对性的适应策略,在社会经济发展的初级阶段,应严守国土空间规划三条控制线、缓解建设占用大量优质耕地、引导农业人口有序退出并推动耕地流转规模化经营;在社会经济发展的中高级阶段应重视农业布局 and 空间优化、鼓励青年回乡创业、扶持绿色生态循环农业等。

本研究目前采用的耕地面积数据来自浙江省各年度土地利用变更调查获取的面积数据,但 2017 年启动“三调”后,耕地的判断标准和调查技术均有大幅变化,可能与之前的数据变动较大,难以衔接,因此本文并未纳入 2020 年最新耕地数据。考虑到自然因素(如地形起伏度、年均降水等)在短期内很难有大的变动,其影响系数“缺乏弹性”,因此本文主要考察了社会经济方面的因素影响,未来亦有必要考察气候、植被、地理区位等自然要素对耕地多功能变化的影响,同时耕地各项功能之间此消彼长的权衡或是相互增益的协同关系及其与自然、社会经济、政策等要素间的互动机制也值得进一步研究。本文发现耕地多功能与部分社会经济因素之间存在库兹涅茨曲线关系,但库兹涅茨曲线的转折点(可视为耕地多功能转型的节点)仍有待进一步检视。在新型城镇化的背景下,评估并监测耕地多功能的变化能够有效识别城市化的“隐形代价”,加强政府部门和全社会公众的耕地保护意识。本文可作为政府农业部门耕地可持续治理工作的有益补充,细化到区县尺度对耕地综合功能的社会经济影响因素进行较全面甄别和量化,可为寻求区域经济发展与耕地多功能保护之间的平衡提供决策参考。

5 结 论

耕地多功能演变的时空特征和驱动机理一直是耕地利用领域的重要议题。应“乡村振兴”“农业高质量发展”“可持续发展”等重大发展需求,在定量评估耕地关键功能服务的基础上,识别浙江省各区县耕地多功能的时空演变格局,并运用基于可拓展随机性环境影响评估的面板空间计量模型,探讨了不同社会经济因素对浙江省各区县耕地多功能水平的贡献程度和空间溢出效应,主要结论如下:

1) 2000—2015 年间浙江省耕地物质产出、净固碳、景观美学功能呈上升态势,其中物质产出功能增长较快,景观美学功能增长较慢;水源涵养功能保持平稳,劳动力承载功能持续减弱。耕地多功能综合水平呈现先降低后上升趋势,空间上从西南地区局部高值转变为整体相对均衡。

2) 耕地多功能水平的提升对邻近地区有较强的辐射影响作用,本县域耕地多功能水平每增长 1%将导致邻近县域

耕地多功能水平增长 0.224%。三类模型中空间杜宾模型对本研究的拟合效果最好,模型估计结果表明内生和外生交互作用同时存在。农业劳动力、农村居民可支配收入和农业机械水平对耕地多功能具有显著的正向效应,第二产业占比和城镇化水平对耕地多功能具有显著的负向效应。

3) 影响因素中对本地耕地多功能的直接效应贡献强度从大到小依次是:第二产业占比、农业机械水平、农业劳动力、城镇化率,人均 GDP、城镇居民可支配收入和农村居民可支配收入对耕地多功能没有显著的直接效应作用;对邻近地区耕地多功能具有空间溢出效应的影响因素从大到小排序是:城市居民可支配收入、农村居民可支配收入、城镇化率,而农业劳动力、人均 GDP、第二产业占比以及农业机械水平对耕地多功能均不存在显著的空间溢出效应。

4) 对空间杜宾面板模型(SDPM)增加解释变量的二次项得到的估计结果表明,人均 GDP 和城市居民收入分别与耕地多功能水平形成的关系符合正“U”型的库兹涅茨曲线,而农村居民人均收入和农业机械水平与耕地多功能水平之间关系符合倒“U”型的库兹涅茨曲线关系,且经济发展水平对耕地多功能的库兹涅茨效应存在一定空间上的交互影响。

[参 考 文 献]

- [1] 宋小青,欧阳竹.耕地多功能内涵及其对耕地保护的启示[J].地理科学进展,2012,31(7):859-868.
Song Xiaoqing, Ouyang Zhu. Connotation of multifunctional cultivated land and its implications for cultivated land protection[J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 859-868. (in Chinese with English abstract)
- [2] 高星,宋昭颖,李晨曦,等.城乡梯度下的耕地多功能价值空间分异特征[J].农业工程学报,2021,37(16):251-259.
Gao Xing, Song Zhaoying, Li Chenxi, et al. Spatial differentiation characteristics of cultivated land multifunctional value under urban-rural gradient[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 251-259. (in Chinese with English abstract)
- [3] 胡伟艳,魏安奇,赵志尚,等.农地多功能供需错位与协同作用研究进展及趋势[J].中国土地科学,2017,31(3):89-97.
Hu Weiyan, Wei Anqi, Zhao Zhishang, et al. Literature review on mismatch of demand and supply, and synergies of multifunctional agricultural land[J]. China Land Sciences, 2017, 31(3): 89-97. (in Chinese with English abstract)
- [4] Jiang G H, Wang M Z, Qu Y B, et al. Towards cultivated land multifunction assessment in China: Applying the “influencing factors functions-products-demands” integrated framework[J]. Land Use Policy, 2020, 99: 104982.
- [5] 杨雪,谈明洪.北京市耕地功能空间差异及其演变[J].地理研究,2014,33(6):1106-1118.
Yang Xue, Tan Minghong. Spatial differences and evolution of arable land functions in Beijing[J]. Geographical Research, 2014, 33(6): 1106-1118. (in Chinese with English abstract)
- [6] Costanza R, D'Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. World Environment, 1997, 25(1): 3-15.
- [7] 宋小青,吴志峰,欧阳竹.1949 年以来中国耕地功能变化[J].地理学报,2014,69(4):435-447.
Song Xiaoqing, Wu Zhifeng, Ouyang Zhu. Changes of cultivated land function in China since 1949[J]. Acta

- Geographica Sinica, 2014, 69(4): 435-447. (in Chinese with English abstract)
- [8] 向敬伟, 廖晓莉, 宋小青, 等. 中国耕地多功能的区域收敛性[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 1959-1971. Xiang Jingwei, Liao Xiaoli, Song Xiaoqing, et al. Regional convergence of cultivated land multifunctions in China[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 1959-1971. (in Chinese with English abstract)
- [9] 梁小英, 顾铮鸣, 雷敏, 等. 土地功能与土地利用表征土地系统和景观格局的差异研究: 以陕西省蓝田县为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1127-1135. Liang Xiaoying, Gu Zhengming, Lei Min, et al. The differences between land use function and land use to reflecting the change of land use system and their impacts on landscape pattern: A case study of Lantian County in Shaanxi Province, China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(7): 1127-1135. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李怡, 方斌, 李裕瑞, 等. 城镇化进程中耕地多功能权衡/协同关系演变及其驱动机制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 244-254. Li Yi, Fang Bin, Li Yurui, et al. Trade-off and synergy evolution of farmland functions and its dynamic mechanism in the process of urbanization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 244-254. (in Chinese with English abstract)
- [11] 朱庆莹, 胡伟艳, 赵志尚. 耕地多功能权衡与协同时空格局的动态分析: 以湖北省为例[J]. 经济地理, 2018, 38(7): 143-153. Zhu Qingying, Hu Weiyan, Zhao Zhishang, et al. Dynamic analysis on spatial-temporal pattern of trade-offs and synergies of multifunctional cultivated land-evidence from Hubei Province[J]. Economic Geography, 2018, 38(7): 143-153. (in Chinese with English abstract)
- [12] 卫新东, 林良国, 罗平平, 等. 耕地多功能耦合协调发展时空格局与驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 260-269. Wei Xindong, Lin Liangguo, Luo Pingping, et al. Spatiotemporal pattern and driving force analysis of multi-functional coupling coordinated development of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 260-269. (in Chinese with English abstract)
- [13] Turner K, Odgaard M, Bøcher P, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.
- [14] 高进云, 杨微, 乔荣锋. 天津市郊区休闲农庄农地游憩价值评估: 以西青区杨柳青庄园和水高庄园为例[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1898-1906. Gao Jinyun, Yang Wei, Qiao Rongfeng. The recreational value of agricultural land in Yangliuqing Manor and Shuigao Manor in Tianjin[J]. Resources Science, 2014, 36(9): 1898-1906. (in Chinese with English abstract)
- [15] 方莹, 王静, 孔雪松, 等. 耕地利用多功能权衡关系测度与分区优化: 以河南省为例[J]. 中国土地科学, 2018, 32(11): 57-64. Fang Ying, Wang Jing, Kong Xuesong, et al. Trade-off relation measurement and zoning optimization of multi-functionality of cultivated land use: A case study of Henan Province[J]. China Land Sciences, 2018, 32(11): 57-64. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王成, 彭清, 唐宁, 等. 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[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 590-599. Wang Cheng, Peng Qing, Tang Ning, et al. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural production-living-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality[J]. Geographical Research, 2018, 38(4): 590-599. (in Chinese with English abstract)
- [17] 黄孟勤, 李阳兵, 冉彩虹, 等. 三峡库区腹地山区农业景观格局动态变化与转型[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2749-2764. Huang Mengqin, Li Yangbing, Ran Caihong, et al. Dynamic changes and transformation of agricultural landscape pattern in mountainous areas: A case study in the hinterland of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2749-2764. (in Chinese with English abstract)
- [18] Davis J, Lopez-Carr D. Migration, remittances and smallholder decision-making: Implications for land use and livelihood change in Central America[J]. Land Use Policy, 2014, 36: 319-329.
- [19] 杜国明, 郭凯, 于凤荣. 黑龙江省垦区耕地利用功能转型与调控建议[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(4): 589-599. Du Guoming, Guo Kai, Yu Fengrong. Suggestions on the transition and regulation of farmland utilization function in Heilongjiang Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(4): 589-599. (in Chinese with English abstract)
- [20] 范德强, 王萍, 吕晓, 等. 山东省耕地显性转型时空特征及影响因素分析[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2021, 36(2): 176-187. Fan Deqiang, Wang Ping, Lv Xiao, et al. Analysis on the spatiotemporal characteristics and influencing factors of the explicit transformation of cultivated land in Shandong[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2021, 36(2): 176-187. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱从谋, 李武艳, 杜莹莹, 等. 浙江省耕地多功能价值时空变化与权衡-协同关系[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 263-272. Zhu Congmou, Li Wuyan, Du Yingying, et al. Spatial-temporal change, trade-off and synergy relationships of cropland multifunctional value in Zhejiang Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 263-272. (in Chinese with English abstract)
- [22] 卢新海, 唐一峰, 易家林, 等. 基于空间计量模型的耕地利用转型对农业经济增长影响研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(6): 53-61. Lu Xinhai, Tang Yifeng, Yi Jialin, et al. Study on the impact of cultivated land use transition on agricultural economic growth based on spatial econometric model[J]. China Land Science, 2019, 33(6): 53-61. (in Chinese with English abstract)
- [23] 侯孟阳, 邓元杰, 姚顺波. 农村劳动力转移、化肥施用强度与农业生态效率: 交互影响与空间溢出[J]. 农业技术经济, 2021(10): 79-94. Hou Mengyang, Deng Yuanjie, Yao Shunbo. Rural labor transfer, fertilizer use intensity and agro-ecological efficiency: Interaction effects and spatial spillover[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(10): 79-94. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐清华, 张广胜. 农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应: 基于 282 个城市面板数据的实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 23-33. Xu Qinghua, Zhang Guangsheng. Spatial spillover effect of agricultural mechanization on agricultural carbon emission intensity: An empirical analysis of panel data from 282 cities[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(4): 23-33. (in Chinese with English abstract)
- [25] 方师乐, 卫龙宝, 伍骏骞. 农业机械化的空间溢效应及其分布规律出: 农机跨区服务的视角[J]. 管理世界, 2017(11): 65-78, 187-188.

- Fang Shile, Wei Longbao, Wu Junqian. The spatial spillover effect of agricultural mechanization and its distribution pattern: The perspective of interregional-service of agricultural machinery[J]. *Management World*, 2017(11): 65-78, 187-188. (in Chinese with English abstract)
- [26] Lesage J P, Pace R K. *Introduction to Spatial Econometrics*[M]. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009: 31.
- [27] Schultz L, Folke C, Österblom H, et al. Adaptive governance, ecosystem management, and natural capital[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(24): 7369-7374.
- [28] 刘魏, 张应良, 李国珍, 等. 工商资本下乡、要素配置与农业生产效率[J]. *农业技术经济*, 2018(9): 4-19.
Liu Wei, Zhang Yingliang, Li Guozhen, et al. Industrial and commercial capital moving to agriculture, factor allocation and agricultural production efficiency[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(9): 4-19. (in Chinese with English abstract)
- [29] 柯楠, 卢新海, 匡兵, 等. 碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(8): 67-76.
Ke Nan, Lu Xinhai, Kuang Bing, et al. Regional differences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China[J]. *China Land Science*, 2021, 35(8): 67-76. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张茜茜, 廖和平, 巫芯宇, 等. 乡村振兴背景下的“人、地、业”转型空间差异及影响因素分析: 以重庆市渝北区为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(4): 1-9.
Zhang Qianqian, Liao Heping, Wu Xinyu, et al. Analysis of the spatial difference and influencing factors of the population, land use and industry transformation in the rural revitalization context: A case study of Yubei District in Chongqing[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2019, 41(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [31] 冀正欣, 王秀丽, 李玲, 等. 南阳盆地耕地利用效率演变及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 688-701.
Ji Zhengxin, Wang Xiuli, Li Lin, et al. The evolution of cultivated land utilization efficiency and its influencing factors in Nanyang Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 688-701. (in Chinese with English abstract)
- [32] 侯孟阳, 姚顺波. 中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征[J]. *资源科学*, 2018, 40(12): 2475-2486.
Hou Mengyang, Yao Shunbo. Spatial spillover effects and threshold characteristics of rural labor transfer on agricultural eco-efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(12): 2475-2486. (in Chinese with English abstract)
- [33] 杨雪, 谈明洪. 近年来北京市耕地多功能演变及其关联性[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(5): 733-743.
Yang Xue, Tan Hongming. Changes and relationships of arable land functions in Beijing in recent years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(5): 733-743. (in Chinese with English abstract)
- [34] 陈丽, 郝晋珉, 王峰, 等. 基于碳循环的黄淮海平原耕地固碳功能研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(6): 1039-1053.
Chen Li, Hao Jinmin, Wang Feng, et al. Carbon sequestration function of cultivated land use system based on the carbon cycle for the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1039-1053. (in Chinese with English abstract)
- [35] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 2012, 34(11): 2097-2105.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105. (in Chinese with English abstract)
- [36] 谷家川, 查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(12): 1507-1513.
Gu Jiachuan, Zha Liangsong. Research on dynamic change of vegetation carbon storage of crops in the Wanjiang City Belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(12): 1507-1513. (in Chinese with English abstract)
- [37] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(1): 9-17.
Xie Guanghui, Wang Xiaoyu, Han Dongqian, et al. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [38] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(1): 1-8.
Xie Guanghui, Han Dongqian, Wang Xiaoyu, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [39] 贺亚亚, 田云, 张俊飏. 湖北省农业碳排放时空比较及驱动因素分析[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2013(5): 79-85.
He Yaya, Tian Yun, Zhang Junbiao. Analysis on spatial-temporal difference and driving factors of agricultural carbon emissions in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2013(5): 79-85. (in Chinese with English abstract)
- [40] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21-27.
Min Jisheng, Hu Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21-27. (in Chinese with English abstract)
- [41] 杜勇, 税伟, 孙晓瑞, 等. 海湾型城市生态系统服务权衡的情景模拟: 以福建省泉州市为例[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4293-4302.
Du Yong, Shui Wei, Sun Xiaorui, et al. Scenario simulation of ecosystem service trade-offs in bay cities: A case study in Quanzhou, Fujian Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4293-4302. (in Chinese with English abstract)
- [42] Fagerholm N, Oteros-Rozas E, Raymond C M, et al. Assessing linkages between ecosystem services, land-use and well-being in an agroforestry landscape using public participation GIS[J]. *Applied Geography*, 2016, (74): 30-46.
- [43] Ehrlich, P R, Holdren J P. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [44] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population affluence and technology[J]. *Human Ecology Review*, 1994, 1(2): 277-300.
- [45] 孔凡靖, 陈玉成, 陈庆华, 等. 重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(11): 1637-1648.
Kong Fanjing, Chen Yucheng, Chen Qinghua, et al. Temporal and spatial variation and driving factors of farmland ecological service value in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(11): 1637-1648. (in Chinese with English abstract)
- [46] 苑韶峰, 杨丽霞, 杨桂山, 等. 耕地非农化的社会经济驱动因素异质性研究: 基于 STIRPAT 和 GWR 模型的实证分析[J]. *经济地理*, 2013, 33(5): 137-143.
Yuan Shaofeng, Yang Lixia, Yang Guishan, et al. The spatial heterogeneity of socio-economic driving factors of cultivated land conversion: A case based on STIRPAT and GWR models[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(5): 137-143. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [47] 张弛, 曹银贵, 陈智, 等. 基于政策量化的我国耕地保护政策效果评价[J]. 广东农业科学, 2020, 47(9): 153-160. Zhang Chi, Cao Yingui, Chen Zhi, et al. Evaluation of the effects of cultivated land protection policies in China based on policy quantification[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(9): 153-160. (in Chinese with English abstract)
- [48] Elhorst J P. Dynamic spatial panels: Models, methods, and inferences[J]. Journal of Geographical Systems, 2012, 14(1): 5-28.
- [49] 范辉, 刘卫东, 张恒义. 浙江省工业化、城市化与建设占用耕地规模的关系: 基于工业化和城市化阶段划分的视角[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 267-271. Fan Hui, Liu Weidong, Zhang Hengyi. Relationship between cultivated land occupation by construction and industrialization & urbanization in Zhejiang Province: Based on perspective of stage division of industrialization and urbanization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 267-271. (in Chinese with English abstract)
- [50] 苗苗, 连寒露, 吴永华. 浙江省耕地利用转型时空演变特征分析[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 753-760. Miao Miao, Ze Hanlu, Wu Yonghua, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of cultivated land use transition in Zhejiang Province[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(4): 753-760. (in Chinese with English abstract)
- [51] 姚文捷, 朱磊. 基于分向引力模型的点轴城市系统双重虹吸效应研究: 以沪杭一线(上海—嘉兴—杭州)为例[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(2): 20-24. Yao Wenjie, Zhu Lei. Double siphon effect in point-axis urban system with gravity model improved in directionality: A case study of Shanghai-Hangzhou Line (Shanghai-Jiaxing-Hangzhou)[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(2): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [52] 宋小青, 欧阳竹. 中国耕地多功能管理的实践路径探讨[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 540-551. Song Xiaoqing, Ouyang Zhu. Route of multifunctional cultivated land management in China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(4): 540-551. (in Chinese with English abstract)
- [53] Xing L, Zhu Y, Wang J. Spatial spillover effects of urbanization on ecosystem services value in Chinese cities[J]. Ecological Indicators, 2021(121): 107028.

Spatiotemporal variation, influencing factors and spatial spillover of cultivated land multifunction in Zhejiang Province

Chen Sha¹, Yang Runjia², Li Guan^{3✉}

(1. School of Public Affairs, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018, China; 2. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Law School, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The utilization and function pattern of cultivated land have been profoundly transformed by the socio-economic and historical changes in the urban-rural relationship. The spatiotemporal variation, influencing factors, and spatial spillover of cultivated land multifunction can also greatly contribute to the sustainable utilization of cultivated land resources. However, it is still lacking on the influence of socioeconomic factors on the cultivated land multifunction, particularly with the spatial spillover. Therefore, this study aims to conduct a theoretical analysis of the influencing mechanism of cultivated land multifunction, including the direct and indirect (spillover) effect. Specifically, the direct effects of cultivated land use originated from the labor transfer, the economic level, and agricultural technology. The spillover effects of the cultivated land multifunction were brought about by the spatial proximity, regional competition, and spatial flow of developing elements. Taking Zhejiang Province of China as an example, five functions of cultivated land were selected to calculate the comprehensive index of cultivated land multifunction (MFCI) using the data on cultivated land use, meteorology, soil and socio-economics. Then, the spatiotemporal evolution of MFCI was revealed to determine the driving mechanism of cultivated land multifunction using GIS mapping, spatial autocorrelation, and spatial panel econometric models under the STIRPAT analysis. The results showed that: 1) Most counties in Zhejiang province experienced a trend of rapid decrease, slow decrease, and then a slight increase of cultivated land during 2000-2015. There was an increase in the agricultural production function (APF), net carbon sequestration function (NCF), and landscape aesthetic function of cultivated land (ASF). The water retention function (WRF) remained stable, while the labor carrying function (LCF) decreased gradually in the period. 2) There were strong spillover effects of cultivated land multifunction on the neighboring area. Every 1% increase of MFCI in the local county led to a 0.224% increase in MFCI in the neighboring counties. There were significant positive effects of agricultural labor input, disposable income of rural households, and agricultural machinery level on the MFCI. By contrast, the proportion of secondary industry and urbanization level posed significant negative effects on the MFCI. 3) The industrial structure, agricultural machinery level, and agricultural labor input presented the direct effects on the multifunctional level of cultivated land, whereas, the spillover effects were from the income of urban and rural residents, as well as the urbanization level. Besides, the Kuznets effect was identified in the change of MFCI. A “U” shaped curve with the MFCI was found in the per capita GDP and urban disposable income, whereas, an “inverted-U” shaped curve with MFCI was formed in the disposable income of rural households and agricultural machinery level. Some suggestions were made to strengthen the cooperation in the land consolidation, ecological protection, and agricultural technology, particularly on the spatial interaction within and between counties. Besides, it is necessary to fully understand the specification of resource endowment and the heterogeneity of socio-economic development for the adaptive strategies in cultivated land protection and agricultural support.

Keywords: land use; cultivated land multifunction; spatial panel economics; spatial spillover; spatial Durbin model; Zhejiang Province