

城市协同发展对粮食生产区域的影响预测 ——以珠三角城市群为例

卢奕帆, 林锦耀

(广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006)

摘要: 探索基于系统保护规划理念的粮食生产功能区划定方法, 分析各城市协同发展下城市群扩张对优质耕地的侵占情况, 对区域粮食生产功能区识别、资源配置优化和空间布局规划具有重要意义。为此结合城市流理论与PLUS模型, 模拟预测两种不同发展情景下2030年珠三角城市群的扩张情况; 基于系统保护理念识别该区域的粮食生产功能区和粮食生产后备区, 分析不同扩张结果对粮食生产区的侵占情况。结果表明: (1) 珠三角各城市协同发展情景下的城市群扩张模拟结果更符合现实发展情况; (2) 基于系统保护规划理念, 可将研究区域的耕地划分为粮食生产功能区、粮食生产后备区、其余区域; (3) 相较各城市独立发展的情景, 基于城市相互作用的城市群扩张结果侵占的粮食生产功能区以及粮食生产后备区面积更少。本文所提出的粮食生产功能区的划定方法能统筹社会经济发展、保护耕地、维护粮食安全的多重目标, 为城市区域化背景下优化国土空间开发保护格局提供建议和依据。

关键词: 粮食生产功能区; 系统保护规划; 城市扩张; 城市流; 珠三角城市群

粮食安全是国运民生的根基, 是世界和平与发展的重要保障。虽然耕地是保护粮食安全的核心载体, 但伴随着全球城市化进程的加快, 城市扩张导致大量耕地的流失。与此同时, 耕地利用的时空格局转变也呈现出复杂的分异特征, 影响国家粮食供给的稳定性^[1]。尤其是中国耕地“非粮化”的问题日益凸显, 对粮食安全造成较大威胁^[2]。在此背景下, 国家出台了一系列保护耕地、维护粮食安全的政策法规, 如“耕地占补平衡”政策。大量城市中心的优质耕地随之转向城市边际土地, 但有部分学者指出这种耕地的再分配会对粮食安全和可持续发展造成负面影响^[3]。因此如何协调耕地保护、粮食安全与城市发展之间的矛盾, 合理规划农业空间布局, 提高耕地质量, 已成为国家发展面临的重大挑战。

以往相关研究大多从耕地面积和耕地适宜性的角度探讨城市扩张对耕地流失的影响^[4-6], 相对较少从粮食生产区等宏观角度分析城市发展与粮食安全的关系。一方面, 中国的粮食生产功能区划定正处于初级阶段, 仍较少研究探讨如何科学划定与建设粮食生产功能区^[7]。合理划分粮食生产功能区, 明确耕地用途对保障粮食安全具有重要意义。然而, 目前国内粮食生产功能区的划定工作大多是基于永久基本农田的基础上开展的^[8], 在

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801307, 42007406); 广州市科技计划项目 (202201010289); 中国人民大学教育基金会林增杰土地科学发展基金优秀学术论文资助项目 (2022)

作者简介: 卢奕帆 (1998-), 女, 广东潮州人, 硕士, 研究方向为土地资源开发与可持续利用。

E-mail: 2112101083@e.gzhu.edu.cn

通讯作者: 林锦耀 (1989-), 男, 广东广州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为地理建模与遥感应用研究。E-mail: ljy2012@gzhu.edu.cn

实际划定工作中，存在地方政府为了经济发展而将质量较差的耕地划入基本农田的行为；也存在规划方案制定缺乏科学依据和方法，大多依靠经验判断划定而成的局限^[9]。维护国家粮食安全必须对粮食生产功能区的划定进行深入全面的研究，科学客观地推进粮食生产功能区的建设。为此，粮食生产功能区的划定可以借鉴张路等^[10]提出的针对生物多样性保护的系統保护规划理念。基于系統保护理念的 Marine Reserve Design using Spatially Explicit Annealing (MARXAN) 模型已被广泛运用于海洋与陆地的保护体系规划和保护优先区识别^[11-13]。该模型综合考虑保护区的面积、边界、连通性以及社会经济成本等因素，通过模拟退火算法迭代运算得到区域内部的最佳保护方案，实现以最小成本达到保护目标的目的^[14]。然而目前较少研究将该模型运用到粮食生产功能区的划定中^[15]。

另一方面，虽然也有学者根据土地利用变化模型（如元胞自动机 CA）模拟预测城市未来的时空格局，以此分析城市扩张对耕地的影响^[16-21]。然而随着中国城市区域化进程不断加快^[22]，城市群之间的相互联系逐渐密切，以往大多数 CA 模型仅适用于分析单个城市的发展演变，较少考虑城市之间的相互流动，难以有效实现大尺度区域的城市增长模拟^[23,24]。“城市流”是指城市之间人口、商品、信息、资本和技术的双向或多向交换^[25]。为此，He 等^[26]引入城市流模型以量化城市之间空间交互作用，将其作为转换规则嵌入 CA 模型，用以模拟京津冀城市群的联动空间增长，证明结合城市流模型方法的合理性。但仍较少研究分析城市协同发展背景下，未来城市群扩张对优质耕地的占用情况。优质耕地是气候条件、地形条件、土壤条件和田间基础设施等均优越的耕地，是能满足多种农作物包括粮食作物生长需求的耕地，保护绝大多数优质耕地对维护区域的粮食安全具有重要意义。有学者指出在未来新增相同城市人口的前提下，发展超大城市导致的耕地损失数量更少，产量更低。以粮食安全为由遏制大城市的发展可能是无效的，甚至会导致城市发展和耕地保护的“双失败”^[27]。

综上，分析城市群扩张对区域耕地保护以及粮食生产的影响，对统筹城市群内部各城市的协调发展，实现区域内的分工协作、优化配置资源、合理空间布局具有重要的实践意义。因此本文针对以往研究的不足，以中国三大城市群之一的珠三角城市群作为研究区域，利用 CA 模型对 2030 年珠三角城市群扩张情况进行模拟，分析结合城市流模型的城市群扩张模拟方法的合理性。同时，构建珠三角城市群耕地种粮成本评价指标体系，利用 MARXAN 模型开展区域粮食生产功能区划定，该方法划定的粮食生产功能区和粮食生产后备区的耕地破碎化程度低且农业生产条件较好，其区别在于种植粮食作物的经济成本差异。因此本文认为粮食生产功能区和粮食生产后备区都属于自然条件状况较好、适宜种植粮食作物的优质耕地。最后，对比传统城市独立发展情景下城市扩张模拟结果以及考虑城市相互作用情景下城市扩张模拟结果对此类优质耕地的侵占情况，以期对珠三角城市群的粮食生产功能区划定、区域资源配置优化和空间结构布局规划提供参考依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

珠江三角洲地处广东省中南部，属亚热带海洋季风气候，水热条件好、土壤肥沃，其水稻单位面积产量在全国名列前茅。珠三角城市群包括广州、深圳、佛山、珠海、东

莞、中山、惠州、肇庆、江门9个城市，涉及48个县区，总面积为55368.70 km²。其土地面积仅占广东省国土面积的23.20%，但汇集了广东省53.35%的人口和79.67%的经济总量，是中国经济最发达的地区之一。珠三角作为世界人口最多和面积最大的城市群，在人口和经济飞速发展的同时，面临着耕地资源减少、土壤污染、粮食安全等问题，识别该区域的粮食生产功能区，分析如何减少城市群发展对耕地保护和粮食安全的影响，对珠三角城市群乃至全国城市群的耕地保护规划发展具有重要意义。

1.2 研究数据

本文以珠三角城市群为研究案例，所需数据主要包括：2010年和2020年的珠三角土地利用、DEM高程数据，2010年人口密度、GDP网格数据、珠三角行政边界、交通路网以及各县区行政中心等矢量数据，2020年6月上旬MODIS EVI数据，2015年珠三角各市分部门在职人数、人口数量、GDP等社会经济数据以及2020年各县区粮食产量以及化肥、农药使用量等农业统计数据，其来源见表1。将上述不同类型的空间数据进行投影、剪裁和重采样等预处理，统一转换为500 m分辨率的栅格数据。

表1 研究所需数据及其来源
Table 1 Data sources for this study

数据	来源	空间分辨率
土地利用数据	GLOBELAND30 (http://www.globallandcover.com/)	30 m
DEM 高程数据	地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn/)	30 m
MODIS EVI	NASA USGS (https://search.earthdata.nasa.gov/)	500 m
人口密度	Worldpop (https://www.worldpop.org)	100 m
GDP 网格数据	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)	1 km
珠三角行政边界	国家基础地理信息中心 (http://www.ngcc.cn/)	—
交通路网以及各县区行政中心等	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)	—
各市社会经济数据	《广东统计年鉴》	—
各县区农业统计数据	《广东农村统计年鉴》	—

1.3 研究方法

本文基于城市流理论以及Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) 模型，对比分析珠三角各城市独立发展以及各城市协同发展两种情景下城市群扩张模拟的结果与现实情况的差异。随后，基于粮食产量空间化数据与种粮成本数据，从系统保护规划的角度出发，利用MARXAN模型识别珠三角城市群的粮食生产功能区以及粮食生产后备区，并与两种不同发展情景下的2030年城市群扩张预测结果进行空间分析，探讨不同模式的城市群扩张对粮食生产区的侵占情况。技术流程如图1所示。

1.3.1 基于城市相互作用的城市群扩张模拟

(1) 城市流强度

城市流强度是城市外向功能量与其所产生的实际影响力之积，其作为城市群内部各个城市之间社会经济相互作用强度的有效指标，可以反映城市的经济影响力^[26]。城市流强度 F_i 计算公式为：

$$F_i = N_i \times E_i \tag{1}$$

式中： N_i 表示城市内部职能，可用从业人员人均GDP表示； E_i 表示城市*i*的外向功能

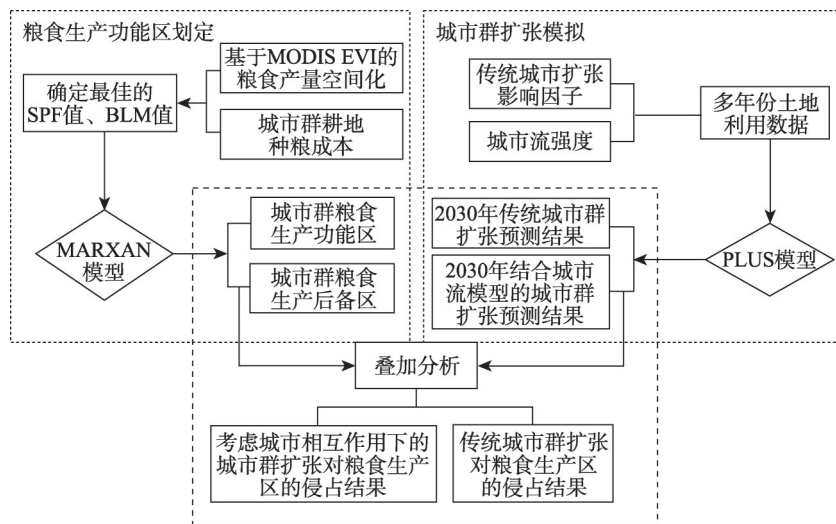


图1 本文技术路线

Fig. 1 Technology roadmap of this study

量，基于指标选取的代表性及可行性，选取城市产业从业人数作为其度量指标，其计算公式为：

$$E_i = \sum_{k=1}^m E_{ik} = \sum_{k=1}^m \left(G_{ik} - G_i \times \frac{G_k}{G} \right) \quad (2)$$

式中： m 表示对外的经济职能部门个数（个）； G_{ik} 表示城市 i 第 k 个部门的在职人数（人）； G_i 表示城市 i 的总从业人数（人）； G_k 表示城市群内部第 k 个部门的在职人数总和（人）； G 为城市群总从业人数（人）。当 $E_{ik} \leq 0$ 时，则表示城市 i 的第 k 个部门不存在外向功能；当 $E_{ik} > 0$ 时，则表示城市 i 中的 k 部门的从业人数在城市总从业人数的占比超过了城市所在区域的分配比例，即城市 i 的 k 部门存在外向功能。

由于城市流强度随距离的变化会存在衰减效应^[28]，因此城市之间的相互作用对城市中各个元胞的影响可以表示为：

$$P(x, y) = \frac{F_i}{D(x, y, x_i, y_i)} \quad (3)$$

式中： $D(x, y, x_i, y_i)$ 是元胞 (x, y) 到城市 i 中心 (x_i, y_i) 的欧氏距离。

(2) 基于PLUS模型的城市群扩张模拟

PLUS模型是基于栅格数据的土地利用变化模拟模型，其耦合了新的用地扩张分析策略和基于多类型随机斑块种子的CA模型，不仅可以更快速、方便、精确地模拟多种土地利用类型斑块的变化过程，还可以输出预测过程中各种土地利用类型驱动因素的影响权重，挖掘各类用地变化的机理^[29,30]。因此，本文采用PLUS模型对珠三角城市群的城市扩张情况进行模拟与预测。

首先根据相关参考文献^[31,32]选取九个土地利用变化的常规驱动因素（图2），输入PLUS模型中作为传统预测变量。随后以2010年的土地利用数据为基础，模拟出传统因素驱动下的2020年珠三角城市扩张格局。此外，在考虑珠三角各城市相互作用的情况下，结合广州、深圳和研究区域其余城市的城市流强度（图3）模拟出城市协同发展下

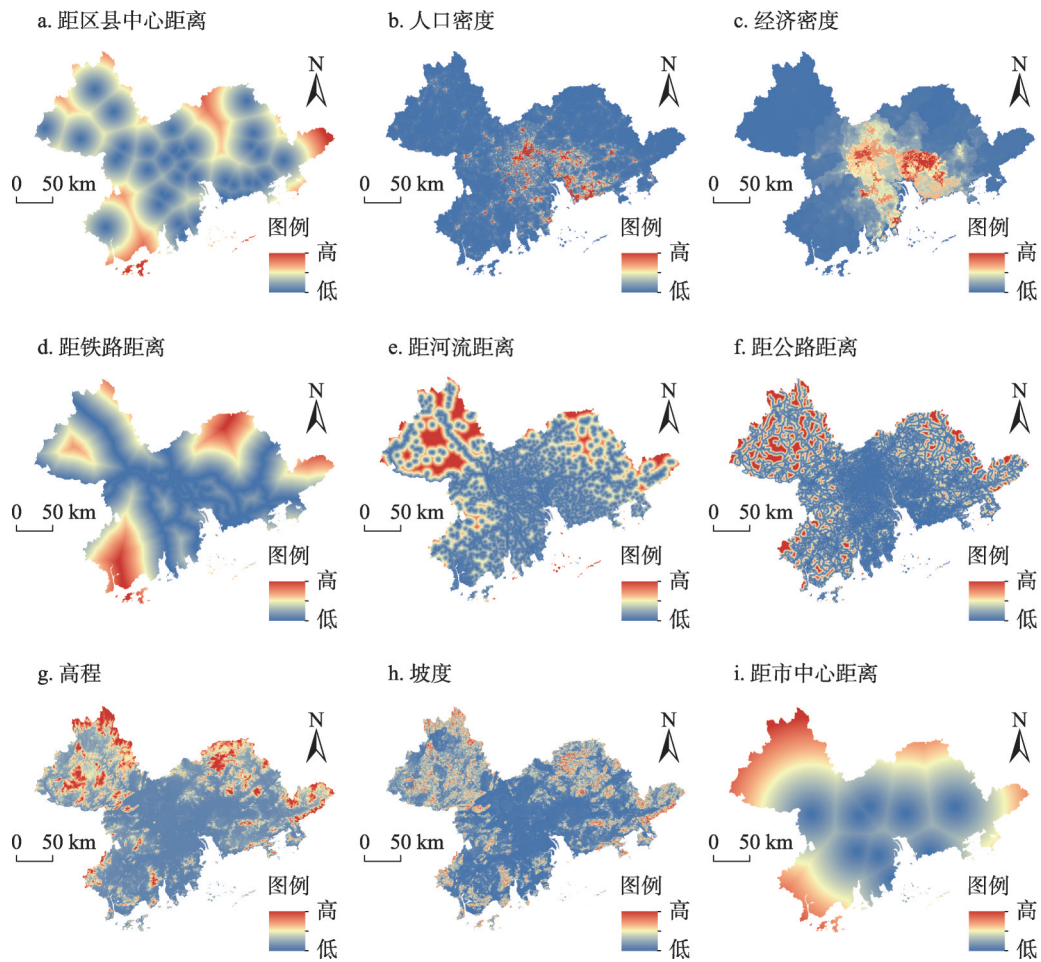


图2 土地利用变化模拟的常规影响因素

Fig. 2 Common driving factors of land use change simulation

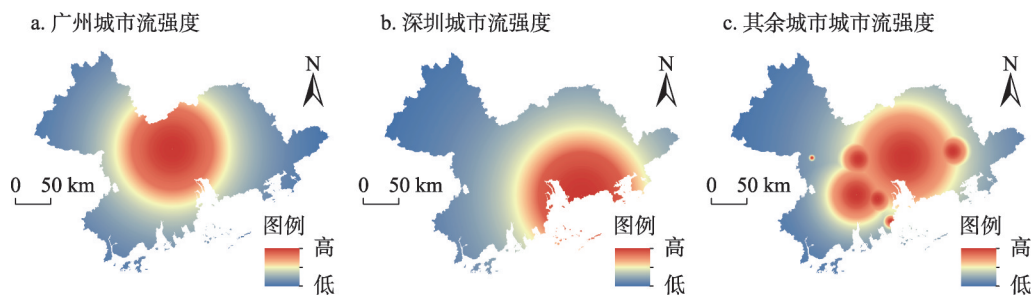


图3 广州、深圳以及其余城市的城市流强度

Fig. 3 Urban flow in Guangzhou, Shenzhen and other cities

的2020年珠三角城市扩张状况。然后将2020年实际土地利用数据与两种模拟结果进行Kappa系数检验和对比分析,验证结合城市流模型的城市扩张模拟方法的合理性。最后模拟出2030年传统情景下的城市扩张结果以及考虑各个城市之间相互作用下的城市扩张结果。

1.3.2 基于系统保护理念的粮食生产功能区识别

(1) MARXAN模型

MARXAN是基于互补性原则和模拟退火算法的多目标系统保护规划模型，通过迭代优化运算，选出最优区划方案。其目的是在尽可能减少成本的情况下达成保护目标。该模型最早运用在海洋生态保护规划中，此后随着模型的不断改进也逐渐应用在陆地保护体系规划和保护优先区识别中。其核心目标函数如下：

$$Score = \sum Cost + \sum SPF \times Penalty + BLM \sum Boundary \quad (4)$$

式中： $Score$ 为总保护成本； $Cost$ 为单个规划单元保护成本； SPF 是未达到单个保护特征的代表性目标的代价； $Penalty$ 是惩罚系数，指对未能达到保护目标的惩罚； $Boundary$ 是边界长度调节因子，用以平衡边界长度和成本支出，从而得到建设成本低且边界长度短的解决方法； BLM 是修正系数，其值越小，边界长度越短，代表保护区形状更紧凑完整。总边界较短的保护区更容易管理，成本较短。根据相关参考文献，通过对多次不同参数运算结果的敏感度分析，进一步确定合适的 SPF 值与最佳的 BLM 值^[14]。

MARXAN模型运行时会将研究区域划分为一定数量的规划单元，每个规划单元包含保护对象的特定面积与单位保护成本值。本文将珠三角城市群的耕地区域作为研究对象，将其划分为43126个边长为500 m的网格规划单元。

(2) 基于MODIS EVI的粮食产量空间化

MODIS作为一种新的信息源，其对作物信息特征的深入揭示是准确提取作物信息的基础。与归一化植被指数($NDVI$)相比，增强型植被指数(EVI)耦合了抗大气植被指数($ARVI$)和土壤调节植被指数($SAVI$)，继承其对植被特征反映的同时，也针对 $NDVI$ 对大气影响矫正有限、未考虑土壤背景干扰等缺点进行改进^[33]。以往研究已表明 EVI 和作物产量存在较高的相关性^[34]。由于珠三角地区主要粮食作物为水稻，而该区域水稻的抽穗期为6月上旬至7月上旬，因此本文选用2020年6月上旬的MODIS EVI 数据进行修正耕地数据以及粮食产量空间化。本文假设在耕地区域内， EVI 越高则粮食产量越高^[35-37]。

根据上述思路，本文从粮食安全的角度，利用耕地规划单元去除 EVI 数据中非耕地的区域。然后，将珠三角各个县级行政单元的耕地 EVI 进行分区统计，得到每个县级单元的 EVI 总值，将其与各自对应的粮食产量相除，得到每个县级行政区 EVI 与粮食产量的关系系数。得到该系数之后，基于上述分配原则——栅格粮食产量和 EVI 呈正相关关系，将每一栅格的 EVI 值乘以系数，即可把粮食产量分配到分辨率为500 m的栅格单元。基于研究区域的粮食产量现状和国家耕地保护政策，将现阶段珠三角地区拥有粮食产出的耕地作为保护对象潜在分布范围。

(3) 基于粮食安全的耕地保护成本评价

$Cost$ 值是MARXAN模型的关键参数，其可以是土地成本，也可以是基于任何成本的度量，在模型动态计算中会被加入到目标函数中。本文保护成本指标的选择将影响到粮食生产区的选址，而耕地是否适合种植粮食作物在受到自然质量条件限制的同时，更多的是受到社会经济条件的影响。因此，参考以往相关研究^[38-44]，遵循全面性、主导性、差异性和数据可获取性等原则选取八项指标，建立珠三角耕地种植粮食作物成本的评价指标体系，具体包括：高程、坡度、田块分维度、田块连片度得分、耕地化肥评价指

数、耕地农药评价指数、第一产业从业人数比、第一产业产值比。① 高程：海拔越高的区域，温度越低且交通相对闭塞，影响粮食作物生长以及耕作便利程度，种粮成本较高。② 坡度：坡度越大的耕地，水土流失、土壤侵蚀越严重，越不利于种植粮食作物。③ 田块分维度：规整的耕地易集中连片，稳定性高，不容易被建设用地侵占，种粮成本相对较低。利用景观生态学中的分维数FRAC对耕地形状复杂程度进行量化，FRAC范围在1.0~2.0，FRAC越小越规则，反之越复杂。④ 田块连片度得分：田块连片度反映耕地的空间邻近集中程度，连片度越高，越有利于农业的规模化经营，粮食种植成本越低。⑤ 耕地化肥评价指数、耕地农药评价指数：施用化肥、农药是导致村镇土地污染的重要原因，化肥和农药不合理利用会导致水资源污染浪费、生物多样性受损、土壤污染等问题。本文通过化肥和农药评价指数表示区域内部耕地的生态环境状况，生态环境越好，该区域的种粮成本越低。⑥ 第一产业从业人数比：区域内部第一产业从业人数占总从业人数比例，反映区域劳动力结构。从事第一产业的劳动力越多，种植粮食的成本越低。⑦ 第一产业产值比：区域内第一产业占总产值的比例，第一产业产值比越高，说明该区域农业经济贡献率越高，有利于农业集约化发展，种粮成本更低。基于层次分析法，运用AHP模型确定其指标权重（表2）^[45-47]。根据研究区域耕地种植粮食成本评价结果，采用自然断点法将其分为五个等级，在ArcGIS软件中生成粮食种植成本的点数据，使用空间连接工具将保护成本关联至各个规划单元中，形成规划单元保护成本数据。

表2 种植粮食作物成本评价指标量化赋分及其权重
Table 2 Quantitative assignment and weight of evaluation index of planting grain crop cost

指标	1	2	3	4	5	权重
高程/m	<200		200~500		>500	0.02
坡度/(°)	<2	2~6	6~15	15~25	>25	0.04
耕地连片度得分	0.4~1	0.2~0.4	0.1~0.2	0.03~0.1	0~0.03	0.15
田块分维度	<1.02	1.02~1.06	1.06~1.1	1.1~1.3	>1.3	0.03
化肥评价指数	1				0	0.08
农药评价指数	1		0~1		0	0.13
第一产业从业人数比	0.7~1	0.5~0.7	0.3~0.5	0.1~0.3	0~0.1	0.33
第一产业产值占比	0.24~0.45	0.16~0.24	0.08~0.16	0.04~0.08	0~0.04	0.22

2 结果分析

2.1 珠三角城市输出功能量计算结果

在考虑数据可获得性的情况下，从2015年珠三角各城市的统计年鉴中获取计算城市外向功能量所需的各市级行政区17个部门的在职人数统计数据。根据式（1）~式（3）计算城市输出功能量，计算结果由表3所示。在珠三角城市群中，广州呈主导地位，其人口、经济等方面均远超其他各市；深圳作为中国设立的第一个经济特区，是中国的经

表3 珠三角各个城市城市功能输出量（F）
Table 3 Urban outflows (F) of the cities in the Pearl River Delta

城市	广州	深圳	佛山	东莞	江门	惠州	珠海	肇庆	中山
F	5250.90	1438.38	259.17	802.95	444.30	231.11	99.48	34.25	207.01

济中心城市之一，也是珠三角地区的中心城市。因此本文结合珠江三角洲城市群的特点，将其影响力分为三个等级：1. 广州；2. 深圳；3. 其他城市。当元胞受到同一等级的不同城市影响时，取其最大值，分别得到广州、深圳以及珠三角其余城市的城市流强度最终计算结果（图3）。

2.2 珠三角城市群扩张模拟检验与对比分析

在充分考虑珠三角城市群内部各个城市相互作用的情况下，利用PLUS模型进行城市扩张模拟，得到珠三角地区2020年结合城市流模型的城市群扩张格局，并与2020年传统的城市扩张模拟结果、2020年实际的城市扩张情况进行对比（图4）。在珠三角整体的城市规划中，广州、深圳及其周边的地区理应获得优先增长，而离中心城市较远的地区增长速度则会较慢。但未考虑城市相互作用下的城市扩张模拟，未能突出边缘城市扩张速度较慢的特点。例如图4中所显示的肇庆市怀集县，结合城市流模型的城市扩张模拟结果更符合2020年怀集县的实际情况。因此，本文采用的结合城市流模型的城市扩张模拟方法具有合理性，且更符合城市群的实际发展趋势，能够更好地预测其内部的变化发展情况。

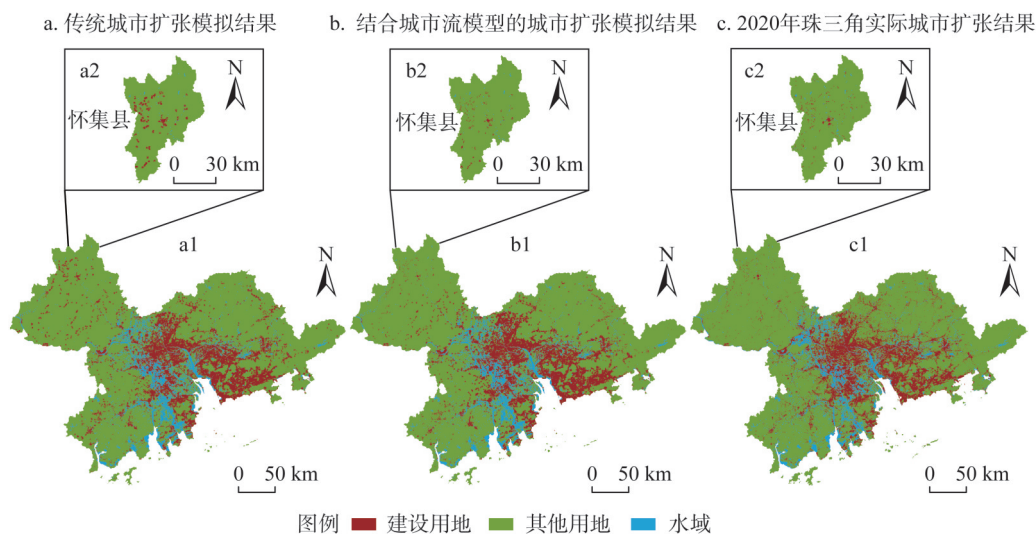


图4 2020年珠三角城市群城市扩张模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of urban expansion simulation results in the Pearl River Delta in 2020

2.3 珠三角城市群粮食产量空间化结果

通过《广东农村统计年鉴》获取2020年珠三角城市群50个县级行政区的粮食产量，随后对该区域2020年6月上旬的耕地EVI数据进行分县区统计，得到各个县级单元的EVI总值。通过各个分区的粮食产量和相应的EVI总值，得出各个县域的粮食产量分配系数（表4）。最后，结合各个分区的粮食产量分配系数和栅格像元EVI值，将各个分区的粮食产量合理分配到每个像元中，得出珠三角城市群粮食产量空间化结果（图5）。

2020年珠三角各城市的粮食产量差异明显，珠三角中部地区，如广州、深圳、东莞、佛山等城市作为改革开放的前沿阵地，城镇化率高，耕地利用多元化，耕地每单位粮食产量较低。惠州市西接广州、南连深圳，近些年在广州、深圳的辐射带动下，抓住

表4 珠三角各县域粮食产量分配系数
Table 4 Grain distribution coefficient at county level

县域	新会	鼎湖	广宁	高要	怀集	封开	德庆	四会	蓬江
粮食产量系数	717.94	489.56	398.14	344.32	306.33	306.17	273.16	271.80	244.13
县域	鹤山	惠城	惠东	惠阳	恩平	龙门	高朋	斗门	博罗
粮食产量系数	199.08	162.92	159.26	140.58	139.80	130.01	121.26	109.48	95.719
县域	从化	增城	中山	花都	三水	黄埔	南沙	东莞	金湾
粮食产量系数	68.54	60.47	37.37	34.38	30.14	29.72	29.22	21.98	18.21
县域	光明	南海	江海	番禺	龙岗	香洲	顺德	禅城	海珠
粮食产量系数	13.00	11.86	11.00	8.49	6.20	3.85	2.30	0	0
县域	天河	越秀	宝安	福田	龙华	罗湖	南山	坪山	盐田
粮食产量系数	0	0	0	0	0	0	0	0	0

重大历史机遇，城镇化进程加快，尤其是靠近深圳市的惠阳区，每单位耕地粮食产量明显少于较偏远的惠东县。粮食产量较高的地区主要集中在珠三角西部的江门市、肇庆市，其农业生产基础条件较好、耕地集中连片。在这两个城市内部，江门的新会区以及肇庆的怀集县耕地单位粮食产量较高，但这两个地区的粮食生产有较明显的区别。肇庆怀集县地处山区，经济发展水平较低，农业生产的地位和作用比较重要，这在一定程度上确保了该区域粮食作物的种植。而江门新会区临近中山和珠海，是珠三角地区新兴的工业城市，是江门市发展水平较高的县域，2020年GDP总值位列全市第一。但其耕地非粮化率相比该市其他地区更低，且该区内部耕地更加集中连片、粮食产量差异较小。原因在于，新会区坚持以科技为导向，提高粮食的生产效率，拥有广东省首个袁隆平院士工作站，是广东省重要的粮食产地和储备库点。

2.4 种植粮食成本及粮食生产区划定结果

本文综合考虑珠三角地区的自然条件和社会经济条件，确定其耕地种植粮食作物的成本（图6）。珠三角地区粮食种植成本呈现四周低、中间高的空间分布特征。由于经济发展水平较高的区域，能够提供更多的就业机会，农业劳动力不足，耕地地租高、破碎化程度高，因此农民种植粮食的积极性降低，更多选择种植更高经济价值的非粮作物，导致种地成本更高。

在MARXAN模型中分别设置40%和80%的保护目标^[48,49]，并且通过敏感性分析得到适宜的SPF值为1.3，最佳的BLM值为0.9。进行迭代计算之后，得到在两个保护目标下的最佳结果^[14,50-52]。然后将两个最优方案叠加分析，选择两次方案都被选中的规划单元作为粮食生产功能区，被单次方案选中的规划单元作为粮食生产后备区，而不被选中的规划单元作为其余区域（图7a）。

由粮食生产区域划定结果可知，珠三角粮食生产功能区主要分布在种植粮食作物成本较低、耕地集中连片的区域（肇庆、江门及惠州南部），占珠三角地区耕地面积的34.37%（图7b）。粮食生产后备区域主要分布在农业生产基础较好、耕地破碎化程度低的小城市中心城区和大城市郊区，例如江门新会区（图7c）和广州南沙区（图7d），占珠三角耕地面积的48.89%。但由于其经济发展水平较粮食生产功能区域更高，农民种植粮食的积极性受到影响。其余区域经济发展实力强劲，土地与劳动力价格高昂，耕地难以集中连片，种植粮食成本高，约占珠三角耕地面积的16.74%，主要分布在大城市的中

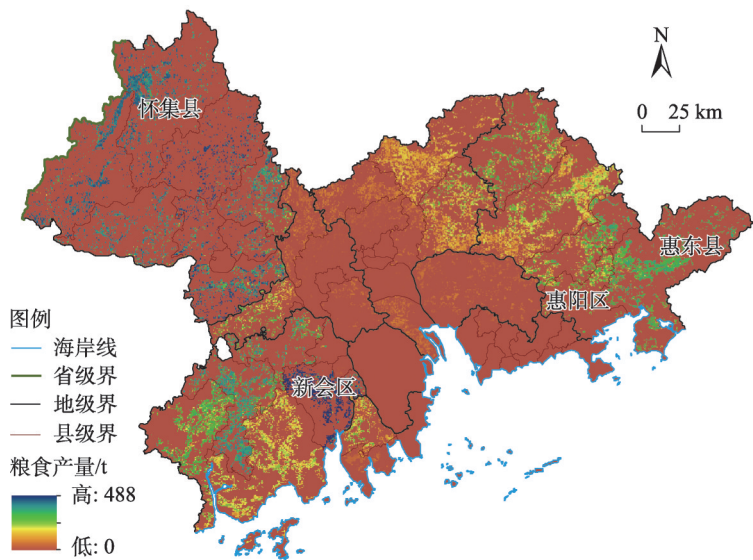


图5 2020年珠三角城市群粮食产量空间化结果

Fig. 5 Spatialization results of grain yield in the Pearl River Delta in 2020

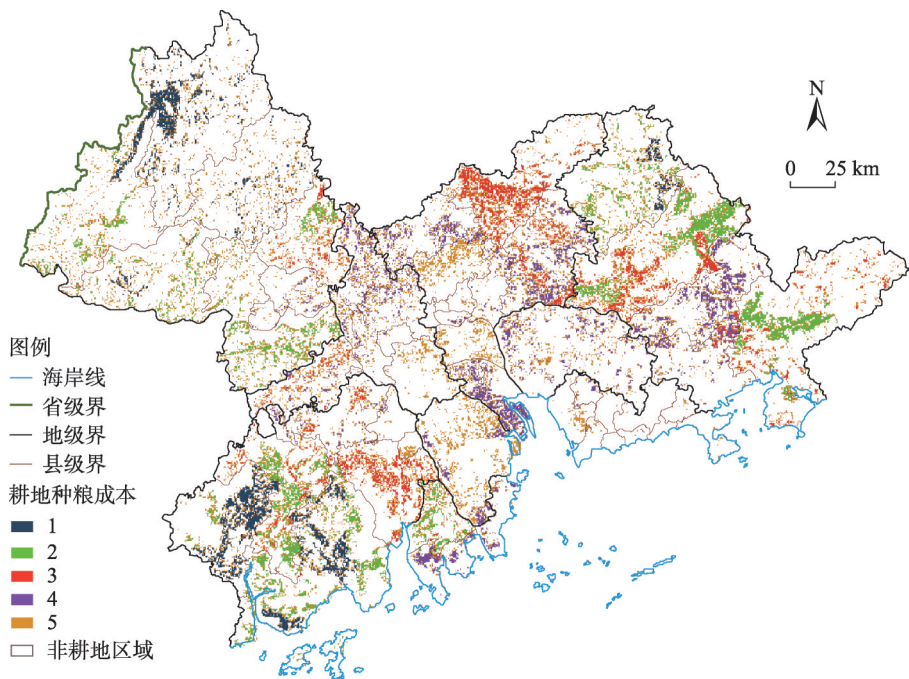


图6 珠三角城市群耕地种植粮食作物的成本

Fig. 6 The cost of farmland to grow grain crops in the Pearl River Delta

心区域，比如深圳宝安区（图7e）。单纯按照粮食产量的划分结果（图8）未考虑耕地的面积、边界、连通性以及区域的经济成本等因素。一方面，该划分方法将广州、深圳等地的大部分耕地划入其余区域，忽略了经济发达地区适宜种植粮食作物的耕地；另一方面，由于目前粮食产量数据只能获取到县区级，该划分方法忽略了行政区域内部耕地质

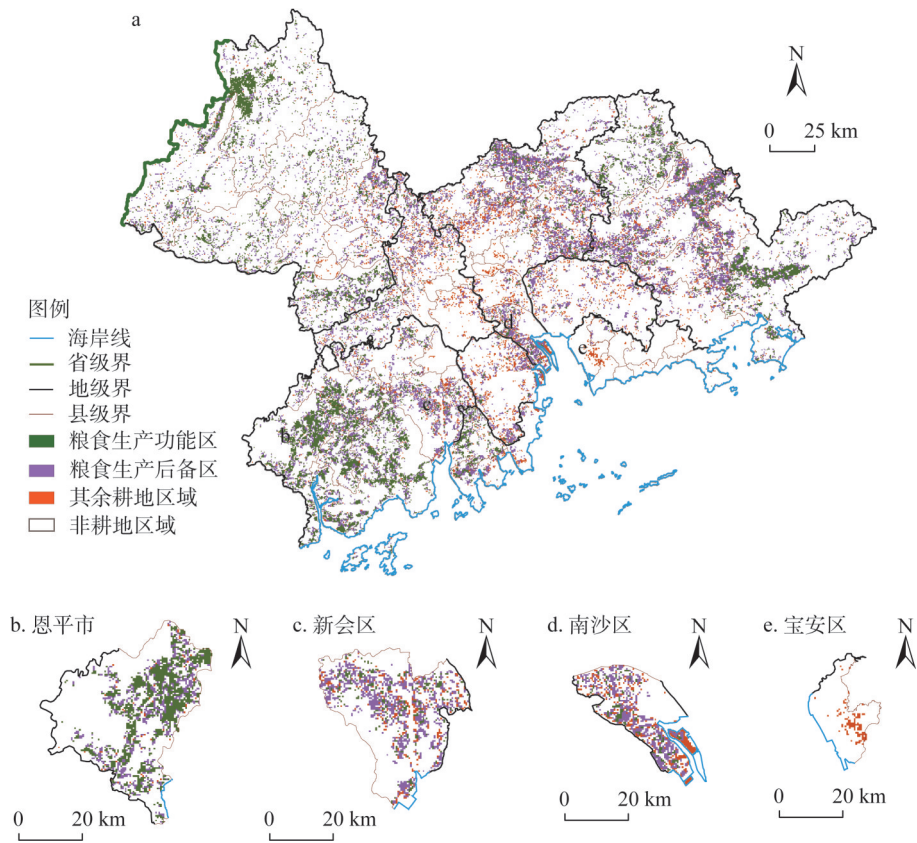


图7 珠三角粮食生产区域划定结果

Fig. 7 The demarcation result of grain production regions in the Pearl River Delta

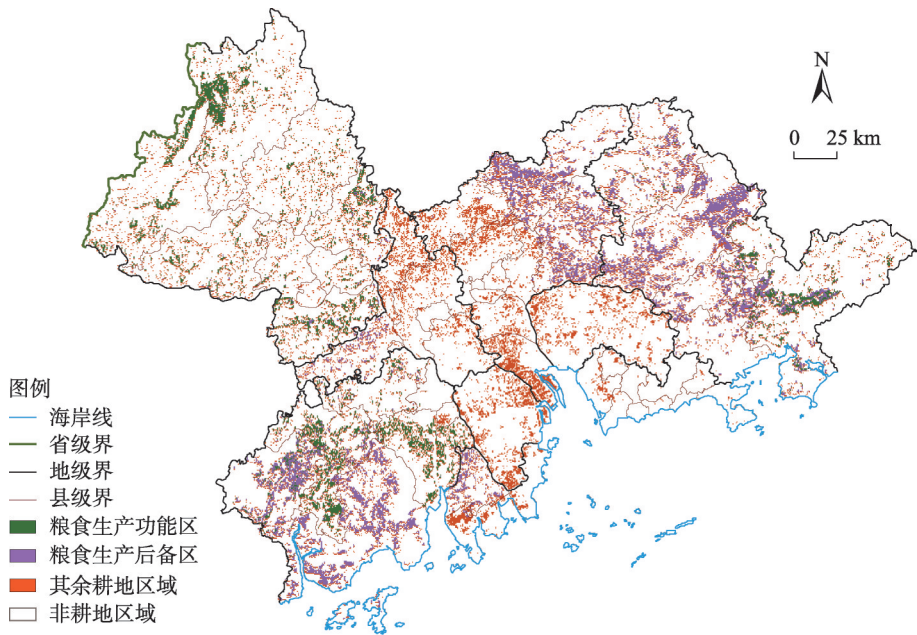


图8 珠三角粮食生产区域传统划定结果

Fig. 8 The traditional demarcation result of grain production regions in the Pearl River Delta

量的差异，难以为后续的耕地保护及粮食功能区规划提供具有针对性的建议和措施，不利于形成差异化的非粮化治理模式。因此，本文基于系统保护理念的粮食生产功能区划定在空间规划布局上合理性较高，该结果可为城市群中耕地利用空间配置优化以及跨区域非粮化协同治理提供依据。

2.5 未来建设用地侵占粮食生产区结果对比及分析

本文将各城市协同发展情景及各城市独立发展情景的2030年珠三角城市群扩张预测结果与上述粮食生产区域划定结果进行叠加，得出两种情景下新增建设用地侵占粮食生产功能区以及粮食生产后备区的情况。在城市群各城市联动发展条件下，2030年新增建设用地侵占粮食生产功能区的面积为31575 hm²，侵占粮食生产后备区的面积为72225 hm²；而基于城市独立发展的城市扩张预测结果表明，建设用地侵占粮食生产功能区的面积为43175 hm²，侵占粮食生产后备区的面积为80275 hm²，对粮食生产区域的损害更为严重。各个城市的粮食生产区域被侵占情况如表5所示，仅深圳、佛山和珠海在城市协同发展的情况下被侵占的粮食生产区面积更大。这是由于深圳、佛山和珠海的经济发展水平较高，粮食种植成本高，建设用地扩张速度快，耕地容易被侵占。如图9所示，深圳光明区这一类经济发达地区被侵占的粮食生产区较为细碎，难以发展大规模的机械化农业，不适宜种植粮食作物；而怀集县在城市协同发展的情况下被侵占的粮食生产区面积远远小于城市独立发展情景下被侵占的面积，且在各城市独立发展的城市群扩张模拟结果中，怀集县被占用的粮食生产区较为集中连片，农业生产条件较好。

表5 2030年珠三角各城市扩张侵占粮食生产区面积

Table 5 Urban encroachment on grain production regions in the Pearl River Delta in 2030 (hm²)

城市	传统城市扩张结果侵占 粮食生产功能区	传统城市扩张结果侵占 粮食生产后备区	结合城市流模型的结果侵 占粮食生产功能区	结合城市流模型的结果侵 占粮食生产后备区
广州	6525	26300	6075	24025
深圳	50	325	50	475
佛山	1450	5975	1650	6300
东莞	1025	5550	900	4900
中山	425	3325	250	2650
珠海	1025	1625	1525	1625
江门	9300	9525	6850	7975
肇庆	12225	7600	5700	6800
惠州	11150	20050	8575	17475

由上述结果可以得出，城市群各城市协同发展的情景可以减少高质量耕地的侵占，更有利于保护粮食安全。在未来城市组团式发展的趋势下，应该充分考虑耕地的地理区位条件以及社会经济发展水平，依据区域的自然生产条件开展粮食安全保护工作以及加快农业结构调整转型，促进各个城市群乃至全国的耕地保护协同发展，减少城市扩张对耕地保护和粮食安全的负面影响。

3 结论与建议

3.1 结论

本文结合城市流理论与PLUS模型模拟2020年珠三角城市群的扩张情况，并且与传

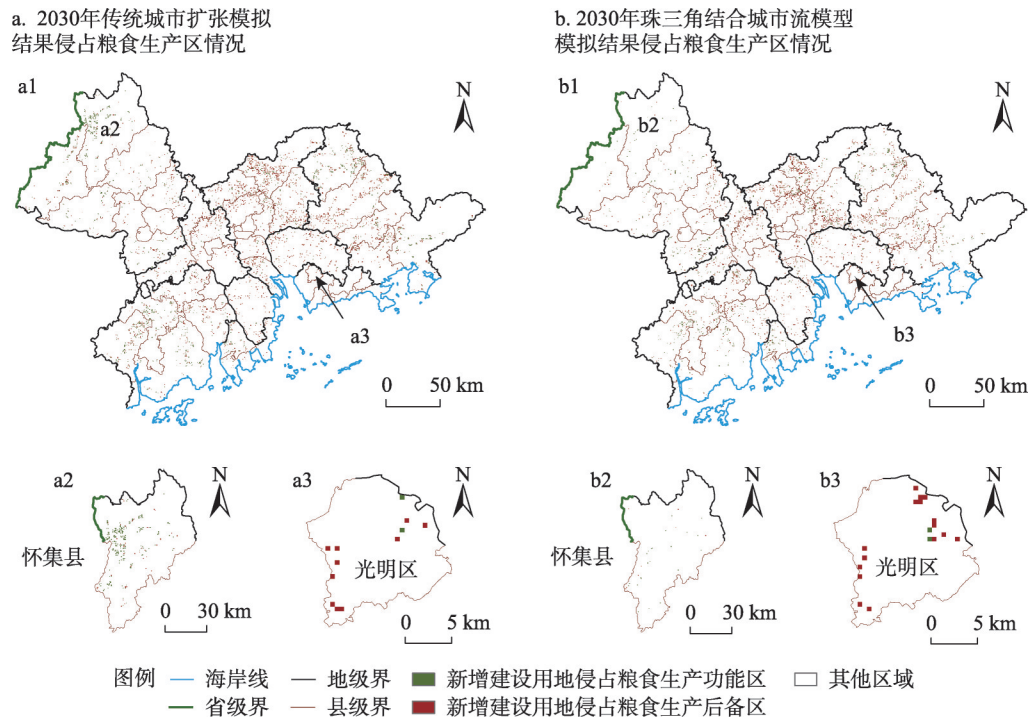


图9 2030年城市扩张预测结果侵占粮食生产区情况

Fig. 9 Predicted urban encroachment on grain production regions in 2030

统的城市扩张预测结果、现实城市扩张情况进行验证对比，证实该方法的合理性。在此基础上，分别对城市独立发展与各城市联动发展两种情景下珠三角城市群2030年的城市扩张情况进行预测。其次，通过珠三角城市群的粮食产量空间化以及耕地种粮成本的量化，利用MARXAN模型划定粮食生产功能区以及粮食生产后备区，并将其与两种城市群扩张预测结果进行叠加分析。进而探讨在城市组团式发展的背景下，如何有效保护耕地和维护粮食安全。根据研究结果可以得到以下结论：

- (1) 结合城市流理论的城市群扩张模拟方法具有较高合理性。本文通过与传统模拟方法、实际扩张情况对比验证后证实考虑城市相互作用下的城市扩张预测结果更符合城市群扩张的实际情况。结果表明未来珠三角城市群的城市扩张主要分布在广州、深圳两大中心城市的周围区域，这对珠三角城市群将来的城市协同规划具有重要参考价值。
- (2) 基于系统保护理念的粮食生产功能区划定在空间规划布局上具有合理性与可行性。粮食生产功能区分布在种粮成本低、集中连片的耕地区域，达到总耕地面积的34.37%，符合广东省划定粮食生产功能区的数量要求；粮食生产后备区分布在种粮成本略高、农业基础较好的区域，占研究区耕地面积的48.89%；其余区域分布在经济发达、种粮成本高、耕地零散的区域，仅占耕地面积的16.74%。
- (3) 在城市组团发展的背景下，发展大城市以集约利用建设用地，可以减少对耕地，特别是优质耕地的侵占。各城市独立发展情景下2030年珠三角城市群扩张预测结果比考虑城市相互作用下的预测结果多侵占粮食生产功能区11600 hm²和粮食生产后备区8050 hm²。针对该研究结果，本文提出在保护粮食安全的同时，应当顾及各个城市的社会经济差异和自然环境差异，因地制宜实现耕地保护与城市发展的动态平衡，推动城市

群内部耕地利用空间优化配置和跨区域非粮化的协同治理。

3.2 珠三角城市群粮食生产区规划建议

本文以珠三角城市群作为研究案例,基于系统保护规划理念,从保护区域粮食安全角度出发,利用MARXAN模型将珠三角城市群的耕地划分为三个区域:粮食生产功能区、粮食生产后备区、其余区域。在各城市相互影响、协同发展的大背景下,为珠三角城市群未来的耕地保护及粮食功能区规划提出以下建议:

(1) 本文划分的粮食生产功能区主要集聚在珠三角东西部地区,耕地集中连片且种植粮食作物成本较低。但由于地处偏远,这些耕地也存在着利用效率低下、农业生产环境较差等问题。因此这些区域应该加快农业基础设施建设,提高农业生产效率,并且重视资源环境的保护,推动粮食安全保护和生态发展齐头并进。政府可加大政策支持力度,提高农业补贴,并引导工商资本下乡,为当地农户提供多元化的农业生产服务。例如:通过改良土壤的方式培肥地力,提高粮食复种指数;将细碎的耕地建设成集中连片的高标准农田,提高农业生产机械化水平和种粮规模;建立粮食生产、加工、运输、销售一体化的经营体系,打造粮食生产产业带,推动一、二、三产业联动发展,突破区域粮食生产经营资金约束的问题,提高粮食作物的经济效益。

(2) 粮食生产后备区大多位于珠三角经济发展水平中等地区,该区域种粮成本较高,但此类型的耕地破碎化程度低且农业生产条件较好。因此,政府应对该类型的耕地进行分类管控管理,根据土地的性质、类型合理配置耕地资源,在确保优质耕地用于种植粮食的情况下,因地制宜,允许一般农地种植特色农作物,优化农业生产布局,提高耕地的利用效率和经济收益。同时,应该发挥该区域的经济资本优势,加大农业人才引进力度,大力推动农业生产技术的创新发展,打造高质量粮食生产示范区,推动区域农业生产的高质量发展。

(3) 未划入粮食生产区的耕地集中在大城市的中心地带,该类型的耕地粮食种植成本高、耕地零散破碎,非粮化类型以蔬菜种植为主。但此类耕地仍需要政府的保护以及管控,不可盲目侵占或改变土地利用用途。可发展都市农业,建立休闲农业园,如广州的香蜜山生态农业公园、珠海斗门的十里莲江农业观光体验园等,提高该区域的农业生产价值、社会经济价值以及生态服务价值。同时,政府也应加强对此类耕地的管理监督,引导经济作物的生态化耕种,预防农药、化肥等投入过度的情况,便于后续粮食复种,推动耕地保护的可持续发展。

(4) 建设用地扩张的同时会造成耕地的流失,但在城市群联动发展的情况下,大城市的组团式发展有利于提高建设用地利用效率,减少对高质量耕地的侵占。提高粮食产量应该充分考虑城市社会经济空间结构特征的影响,完善城市群内部经济发达地区与欠发达地区之间的联动机制,提高城市群内部农业空间资源配置效率。经济发达地区应该加大对欠发达地区的耕地保护和粮食生产的帮扶力度,提供资金和技术支撑,建立和完善种粮区与非种粮区的利益补偿机制,弥补非种粮区经济发展对耕地的占用,保障粮食生产地区的经济发展和人民的生活水平,提高农民种粮的积极性。

本文仍存在部分不足,有待后续深入探讨研究:(1) 本文利用MODIS *EVI*数据将珠三角城市群县区级粮食产量分配到500 m分辨率的空间网格。在未来研究中可进一步获取更精细的粮食产量数据,并结合更多影响粮食产量的因子进行空间化,以提高粮食产

量空间分布模拟结果的精度。(2) 受基础数据的限制, 本文选取的种粮成本评价指标并不完善, 导致结果可能存在一定的误差, 后续研究需进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 曹宇, 李国煜, 王嘉怡, 等. 耕地非粮化的系统认知与研究框架: 从粮食安全到多维安全. 中国土地科学, 2022, 36(3): 1-12. [CAO Y, LIU Y, WANG J Y, et al. Systematic review and research framework of "Non-grain" utilization of cultivated land: From a perspective of food security to multi-dimensional security. China Land Science, 2022, 36(3): 1-12.]
- [2] 孔祥斌. 耕地“非粮化”问题、成因及对策. 中国土地, 2020, (11): 17-19. [KONG X B. Problems, causes and counter-measures of "non-grain" utilization of cultivated land. China Land, 2020, (11): 17-19.]
- [3] KUANG W H, LIU J Y, TIAN H Q, et al. Cropland redistribution to marginal lands undermines environmental sustainability. National Science Review, 2022, 9(1): 66-78.
- [4] 程旭, 杨海娟. 城市扩张对大城市周边基本农田的影响: 以西安市长安区为例. 中国农业资源与区划, 2017, 38(8): 25-34. [CHENG X, YANG H J. Analysis of the effects of urban expansion on the basic farmland around the big city: A case study of Changan in Xian. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(8): 25-34.]
- [5] 刘涛, 史秋洁, 王雨, 等. 中国城乡建设占用耕地的时空格局及形成机制. 地理研究, 2018, 37(8): 1609-1623. [LIU T, SHI Q J, WANG Y, et al. Urban-rural development and occupation of cultivated land in China: Trends, geography, and drivers. Geographical Research, 2018, 37(8): 1609-1623.]
- [6] LIU T, LU H, QI Y J. Construction land expansion and cultivated land protection in urbanizing China: Insights from national land surveys, 1996-2006. Habitat International, 2015, 46: 13-22.
- [7] 王一杰, 邸辛, 辛岭. 我国粮食主产区粮食生产现状、存在问题及政策建议. 农业现代化研究, 2018, 39(1): 37-47. [WANG Y J, DI F, XIN L. The status and problems of grain production in the main grain production areas of China and policy suggestion. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(1): 37-47.]
- [8] 荆旭全. 基于GIS的粮食生产功能区划定研究. 广州: 华南农业大学, 2019. [JING X Q. Study on the delimitation of food production function area based on GIS: A case study in Xinhui district. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019.]
- [9] 王丽, 周勇, 徐涛, 等. 基于物—场模型的“两区”划定空间布局合理性评价. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 116-126. [WANG L, ZHOU Y, XU T, et al. Rational evaluation of the spatial layout of the "Two Zones" Demarcation on object-field model. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 116-126.]
- [10] 张路, 欧阳志云, 徐卫华. 系统保护规划的理论、方法及关键问题. 生态学报, 2015, 35(4): 1284-1295. [ZHANG L, OUYANG Z Y, XU W H. Theory, work frame and hot issues of systematic conservation planning. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1284-1295.]
- [11] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局. 应用生态学报, 2018, 29(9): 3024-3032. [GUO Y, LIANG C, LI X W. Priority conservation pattern of wetlands in the Yellow River Basin on systematic conservation planning. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 3024-3032.]
- [12] 张晓琳, 金晓斌, 吴心怡, 等. 基于系统保护理念的弹性生态保护空间划定: 以广东省茂名市为例. 生态学报, 2021, 41(18): 7393-7405. [ZHANG X L, JIN X B, WU X Y, et al. Delineation of flexible ecological protection space based on the concept of systematic conservation: Take Mao city of Guangdong province as an example. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7393-7405.]
- [13] ZHANG X, VINCENT A C J. Conservation prioritization for seahorses (*Hippocampus* spp.) at broad spatial scales considering socioeconomic costs. Biological Conservation, 2019, 235: 79-88.
- [14] 彭涛. 国家公园选址的空间评价与规划研究. 杭州: 浙江大学, 2019. [PENG T. Spatial evaluation and planning of national park site selection. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.]
- [15] 陈莉. 岷江上游藏族聚居区耕地非农化过程与优先保护区识别. 绵阳: 西南科技大学, 2021. [CHEN L. Non-agriculturalization process of cultivated land and identification of priority protection areas in Tibetan settlement areas in the upper reaches of Minjiang River. Mianyang: Southwest University of Science of Technology, 2021.]
- [16] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27. [LI X, YE J A. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks, China. Geographical Research, 2005, 24(1): 19-27.]

- [17] 肖琳, 田光进, 乔治. 基于Agent的城市扩张占用耕地动态模型及模拟. 自然资源学报, 2014, 29(3): 516-527. [XIAO L, TIAN G J, QIAO Z. An agent-based approach for urban encroachment on cropland dynamic model and simulation. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 516-527.]
- [18] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析. 生态学报, 2018, 38(12): 4341-4350. [LIU J H, LI W F, ZHOU W Q, et al. Scenario simulation balancing multiple objectives for optimal land use allocation of the Beijing-Tianjin-Hebei Mega Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4341-4350.]
- [19] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [20] CLARKE K C, GAYDOS L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(7): 699-714.
- [21] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569, Doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.
- [22] 崔功豪. 城市问题就是区域问题: 中国城市规划区域观的确立和发展. 城市规划学刊, 2010, (1): 24-28. [CUI G H. Urban Issue as the regional issue: The establishment and development of the regional view of urban planning in China. *Urban Planning Forum*, 2010, (1): 24-28.]
- [23] LIN J Y, LI X. Simulating urban growth in a metropolitan area based on weighted urban flows by using web search engine. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(10): 1721-1736.
- [24] LUO X L, SHEN J F. A study on inter-city cooperation in the Yangtze River Delta Region, China. *Habitat International*, 2009, 33(1): 52-62.
- [25] SETO K C, REENBERG A, BOONE C G, et al. Urban land teleconnections and sustainability. *PNAS*, 2012, 109(20): 7687-7692.
- [26] HE C Y, ZHAO Y Y, TIAN J, et al. Modeling the urban landscape dynamics in a megalopolitan cluster area by incorporating a gravitational field model with cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 78-89.
- [27] HU G H, LI X, ZHOU B B, et al. How to minimize the impacts of urban expansion on farmland loss: Developing a few large or many small cities?. *Landscape Ecology*, 2020, 35(11): 2487-2499.
- [28] 何力, 刘耀林. 基于城市流模型的城市群扩张模拟: 以武汉城市圈为例. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2017, 51(2): 224-230. [HE L, LIU Y L. Simulating urban cooperative expansion in the metropolitan region based on improved CA model: A case study of Wuhan Urban Agglomeration, China. *Journal of Central China Normal University: Natural Science*, 2017, 51(2): 224-230.]
- [29] 王子尧, 黄楚梨, 李惊, 等. 耦合InVEST-HFI-PLUS模型的生态分区规划与动态评估: 以博尔塔拉蒙古自治州为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5789-5798. [WANG Z Y, HUANG C L, LI J, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFI-Plus model: A case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5789-5798.]
- [30] 李天润, 陈爽. 1990年以来卢旺达森林转型路径及趋势模拟. 资源科学, 2022, 44(3): 494-507. [LI T R, CHEN S. Forest transition paths in Rwanda since 1990 and trend prediction. *Resources Science*, 2022, 44(3): 494-507.]
- [31] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定. 地球信息科学学报, 2018, 20(4): 532-542. [WU X X, LIU X P, LIANG X, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(4): 532-542.]
- [32] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估. 生态学报, 2021, 41(1): 360-373. [ZHANG Y, SHI X Y, TANG Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 360-373.]
- [33] 王长耀, 林文鹏. 基于MODIS EVI的冬小麦产量遥感预测研究. 农业工程学报, 2005, 21(10): 90-94. [WANG C Y, LIN W P. Winter wheat yield estimation based on MODIS EVI. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10): 90-94.]
- [34] 徐岩岩, 张佳华. 基于MODIS-EVI数据和Symlet 11小波识别东北地区水稻主要物候期. 生态学报, 2012, 32(7): 2091-2098. [XU Y Y, ZHANG J H. Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet 11 wavelet in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2091-2098.]

- [35] 张超,陈婉铃,马佳妮,等.基于时序EVI的2000—2019年吉林省耕地生产力时空分析.农业机械学报,2022,53(2): 158-166. [ZHANG C, CHEN W L, MA J N, et al. Analysis on spatial-temporal changes of cultivated land productivity in Jilin province from 2000 to 2019 based on EVI time series. Transactions of the CSAM, 2022, 53(2): 158-166.]
- [36] 程乾.基于MOD13产品水稻遥感估产模型研究.农业工程学报,2006,22(3): 79-83. [CHENG Q. Models for rice yield estimation using remote sensing data of MOD13. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 79-83.]
- [37] 邓刚,唐志光,李朝奎,等.基于MODIS时序数据的湖南省水稻种植面积提取及时空变化分析.国土资源遥感,2020,32(2): 177-185. [DENG G, TANG Z G, LI Z K, et al. Extraction and analysis of spatiotemporal variation of rice planting area in Hunan province based on MODIS time-series data. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(2): 177-185.]
- [38] 宋小青,欧阳竹.1999—2007年中国粮食安全的关键影响因素.地理学报,2012,67(6): 793-803. [SONG X Q, OUYANG Z. Key influencing factors of food security guarantee in China during 1999-2007. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(6): 793-803.]
- [39] 张颖诗,冯艳芬,王芳,等.广东省耕地非粮化的时空分异及其驱动机制.资源科学,2022,44(3): 480-493. [ZHANG Y S, FENG Y F, WANG F, et al. Spatiotemporal differentiation and driving mechanism of cultivated land non-grain conversion in Guangdong province. Resources Science, 2022, 44(3): 480-493.]
- [40] 李龙,吴大放,刘艳艳.基于四象限法的城市周边永久基本农田划定研究:基于自然质量和建设稳定性.中国农业资源与区划,2020,41(5): 87-97. [LI L, WU D F, LIU Y Y. Study on permanent basic farmland demarcation around the city with the fourquadrant method: Based on natural quality and constuction stability. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(5): 87-97.]
- [41] 何露,闵庆文,张丹.农业多功能性多维评价模型及其应用研究:以浙江省青田县为例.资源科学,2010,32(6): 1057-1064. [HE L, MIN Q W, ZHANG D. Evaluation models for multifunctionality ofagriculture and their applications: A case study on Qingtian county in Zhejiang province, China. Resources Science, 2010, 32(6): 1057-1064.]
- [42] 王静,林春野,陈瑜琦,等.中国村镇耕地污染现状、原因及对策分析.中国土地科学,2012,26(2): 25-30, 43. [WANG J, LIN C Y, CHEN Y Q, et al. Cultivated land pollution at township level in China: Situation, factors and measures. China Land Science, 2012, 26(2): 25-30, 43.]
- [43] 王勇,孙瑞欣.土地利用变化对区域水—能源—粮食系统耦合协调度的影响:以京津冀城市群为研究对象.自然资源学报,2022,37(3): 582-599. [WANG Y, SUN R X. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 582-599.]
- [44] 李雨凌,马雯秋,姜光辉,等.中国粮食主产区耕地撂荒程度及其对粮食产量的影响.自然资源学报,2021,36(6): 1439-1454. [LI Y L, MA W Q, JIANG G H, et al. The degree of cultivated land abandonment and its influence on grain yield in main grain producing areas of China. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1439-1454.]
- [45] 梁晓玲,王璐,黎诚,等.基于数量、质量、生态三位一体的永久基本农田快速优化布局研究.农业资源与环境学报,2021,38(6): 946-956. [LIANG X L, WANG L, LI C, et al. Research on the rapid optimization of the layout of permanent basic farmland based on quantity, quality, and ecology. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 946-956.]
- [46] 顿耀龙,王军,郭义强,等.基于AHP-FCE模型的大安市土地整理可持续性评价.中国土地科学,2014,28(8): 57-64. [DUN Y L, WANG J, GUO Y Q, et al. Sustainability evaluation of land consolidation of Da'an city based on AHP-FCE model. China Land Science, 2014, 28(8): 57-64.]
- [47] 陈星宇,王枫,李灿.珠三角地区耕地多功能空间差异与影响因素分析.地域研究与开发,2017,36(1): 130-136. [CHEN X Y, WANG F, LI C. Spatial differences and influencing factors of arable land multi-functions in Pearl River Delta. Areal Research and Development, 2017, 36(1): 130-136.]
- [48] 张桥,张育灿,郑超,等.广东粮食生产功能区土壤pH值的时空变化特征.土壤通报,2020,51(4): 775-783. [ZHANG Q, ZHANG Y C, ZHENG C, et al. Temporal-spatial changes of soil pH value in the grain production functional areas of Guangdong province. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(4): 775-783.]
- [49] 钱凤魁,王秋兵,边振兴,等.永久基本农田划定和保护理论探讨.中国农业资源与区划,2013,34(3): 22-27. [QIAN F K, WANG Q B, BIAN Z X, et al. Discussion about the permanent basic farmaland planning and protection. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013, 34(3): 22-27.]
- [50] 王敏.基于最小覆盖集模型的天目山自然保护区选址研究.上海:华东师范大学,2015. [WANG M. Study of Tian-

mushan conservation site-selection based on minimum set covering model. Shanghai: East China Normal University, 2015.]

- [51] 张昆, 许世远, 王军. 模拟退火算法在生态保护区空间选址中的应用: 以澳大利亚蓝山保护区为例. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2010, (2): 1-8. [ZHANG K, XU S Y, WANG J. Study on reserve site selection by simulated annealing algorithm: An example from the Great Blue Mountain World Heritage Area. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2010, (2): 1-8.]
- [52] MCDONNELL M D, POSSINGHAM H P, BALL I R, et al. Mathematical methods for spatially cohesive reserve design. Environmental Modeling & Assessment, 2002, 7(2): 107-114.

Predicting the impact of urban agglomeration development on grain production regions: A case study of Pearl River Delta

LU Yi-fan, LIN Jin-yao

(School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The purposes of this study are to explore the zoning of grain production regions based on systematic conservation planning method, to analyze the encroachment of urban agglomeration expansion on high-quality farmland under the two scenarios of coordinated development and independent development of cities within the urban agglomeration, and to provide reference for regional grain production functional area identification, resource allocation optimization and spatial layout planning. The research methods are as follows. Based on the urban flow theory and PLUS model, the expansion of Pearl River Delta urban agglomeration in 2030 under the two development scenarios is simulated and predicted. Based on the concept of system conservation, the functional areas and reserve areas of grain production are identified, and the encroachment of different expansion results on grain production regions is analyzed. The results indicate that: (1) The simulation results of urban agglomeration expansion under the scenario of coordinated development of various cities in the Pearl River Delta are more consistent with the actual development trend. (2) Based on the concept of systematic conservation planning, the farmland in the study area is divided into functional areas for grain production, reserve areas for grain production, and other areas. (3) Compared with the independent development scenario, the expansion of urban agglomeration based on urban interaction will encroach less grain production functional areas and grain production reserve areas. In conclusion, the zoning method of grain production functional regions can coordinate the multiple goals of socio-economic development, farmland protection and food security, and can provide suggestions and basis for optimizing the development and protection pattern of territory space under the background of urban regionalization.

Keywords: grain production regions; systematic conservation planning; urban expansion; urban flows; Pearl River Delta