

多目标协同下农产品主产区县域国土空间格局优化

朱宇婷¹, 丁一^{1*}, 白炜旭¹, 燕思宇¹, 刘光盛^{2,3}

(1. 山西农业大学资源环境学院, 晋中 030800; 2. 华南农业大学公共管理学院, 广州 510640;
3. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510640)

摘要: 优化农产品主产区县域国土空间格局对于实施主体功能区战略和保障国家粮食安全至关重要。该研究从“规模—结构—布局—策略”4个维度构建优化框架, 并以山西省祁县为例, 将粮食安全、生态安全、经济发展、碳减排与社会保障作为优化目标, 耦合灰色多目标模型与 GeoSOS-FLUS 模型进行格局优化。并在此基础上进行县域功能分区, 并提出相应的发展策略。研究表明: 1) 通过结构优化, 到 2035 年, 耕地面积将保持在 38 320.60 hm²; 林地面积将增加至 17 172.40 hm²; 草地面积将减少至 21 485.80 hm²; 水域面积将增加至 159.50 hm²; 建设用地面积将增加至 8 214.70 hm²。经济效益比 2021 年翻 1 番, 碳排放减少 15.00%。2) 通过 GeoSOS-FLUS 模型优化布局, 林地布局更集中提升碳汇能力, 耕地下山提高耕地质量, 建设用地集中促进经济流通, 格局优化为区域可持续发展奠定了空间基础。3) 根据各乡镇的发展潜力, 将县域分为农业生产、经济发展和碳汇功能 3 个区域, 并实施差异化的发展策略。该方法不仅可以保障主体功能区战略和双碳目标在县级层面的落实, 还可以为其他功能县域的国土空间优化提供参考。

关键词: 国土空间格局优化; 农产品主产区; 灰色多目标; Geosos-FLUS

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406024

中图分类号: F301.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-02-0281-10

朱宇婷, 丁一, 白炜旭, 等. 多目标协同下农产品主产区县域国土空间格局优化[J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 281-290. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406024 <http://www.tcsae.org>

ZHU Yuting, DING Yi, BAI Weixu, et al. Optimization of county-level territorial spatial patterns in major agricultural production areas under multi-objective synergy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(2): 281-290. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406024 <http://www.tcsae.org>

0 引言

主体功能区是中国国土空间治理理念与高质量发展的重要组成部分, 实现主体功能区约束与区域发展的协同决策是当前的重要议题^[1]。农产品主产区面积广阔、人口众多, 在保障国家粮食安全方面发挥着重要作用。然而, 随着社会经济的不断发展, 建设用地持续扩张导致耕地面积不断减少, 农产品主产区主体功能与协同发展之间的冲突愈加严重, 资源紧缺、低效利用、城乡差距扩大、环境污染和粮食安全等一系列问题日益突出^[2-4]。如何在保障粮食安全的前提下, 实现农产品主产区社会、经济和生态的良性、可持续发展, 成为亟待解决的难题。国土空间格局是各类要素在空间上的分布和配置, 优化国土空间格局能够有效化解主体功能和协同发展的冲突, 提升开发与保护效率, 为实现可持续发展提供坚实基础^[5]。而县域作为资源、人口和经济活动的主要集聚地, 是落实主体功能区规划的基本单元。优化农产品主产区

县域国土空间格局, 有助于协调耕地保护、生态建设与经济发展的矛盾, 促进资源合理配置与可持续发展, 推动主体功能区战略在市县级层面精准落地。

近年来, 国内外学者在研究尺度、研究视角、研究方法等方面对国土空间格局优化展开了广泛讨论。在研究尺度方面, 学者们主要集中在省市级、流域和城市圈等较大尺度的研究, 更关注区域整体布局与协调发展^[6-8]。相比于宏观尺度, 县级层面的研究相对较少, 优化理论仍需进一步完善^[9]。在研究视角方面, 早期研究多集中于单目标优化。随着可持续发展理念的深化, 研究逐渐转向多目标兼顾或综合效益最大化, 通常根据不同的规划目标和利益需求设定主导目标和约束条件^[10-13]。多目标优化方法在协调土地利用的生态、经济与社会效益方面取得了一定成果, 但在多系统间的协作机制及其未来可持续发展的综合考量上仍显不足, 导致优化方案的实践效果可能受限。在研究方法上, 将数量结构与空间布局优化相结合是当前的核心方向。学者们通常采用多目标规划、马尔科夫模型、遗传算法等进行数量结构优化, 并使用 CA 模型、CLUE-S 模型、PLUS 模型和 FLUS 模型等空间模拟方法, 模拟不同国土空间布局, 评估其优化效果, 为未来空间规划的可行性评估和政策建议提供了坚实依据^[14-18]。综上所述, 当前针对特定功能县域的格局优化研究相对较少, 且约束条件集中于国土空间规

收稿日期: 2024-06-04 修订日期: 2024-09-16

基金项目: 国家社会科学基金项目 (23CGL064); 山西省哲学社会科学规划课题 (2023YY077)

作者简介: 朱宇婷, 研究方向为国土空间规划。

Email: zyt15735151581@163.com

*通信作者: 丁一, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土地可持续利用与国土空间规划。Email: 18235421697@139.com

划设置^[19], 对于承担国家粮食安全任务的县域而言, 相关的优化目标、约束条件以及土地利用之间的内在联系仍需进一步深入研究。

在此背景下, 本文构建农产品主产区县域国土空间格局优化框架, 以功能定位为切入点, 依循“规模—结构—布局—策略”的研究思路, 将粮食安全、生态安全、经济发展、碳减排与社会保障作为优化目标, 耦合灰色多目标和 Geosos-FLUS 模型优化县域国土空间格局, 并提出相应的发展策略。以期在推动农产品主产区县域落实主体功能区战略保障国家粮食安全的同时, 促进国土空间合理利用, 实现县域向绿色、协调、可持续发展方向转型发展。

1 农产品主产区县域国土空间格局优化框架

1.1 农产品主产区县域的功能与优化目标

农产品主产区县域是农业人口和第一产业的主要聚集地, 具备优越的自然条件和较高的农业生产力。在保障国家粮食安全、推动农业现代化和实施乡村振兴战略中具有关键作用。国土空间格局是自然地理演化过程和经济社会发展过程相互耦合的复杂地域系统和历史综合体^[5], 是区域功能和发展方式在空间上的体现, 是实现区域经济社会发展目标的基本载体^[4]。因此, 国土空间发展格局的合理性直接影响农产品主产区县域功能的实现, 以及县域经济社会活动在空间关系上的协调。

根据农产品主产区县域内涵, 可将其功能概括为生产、生态、经济和社会四大功能。其中, 生产功能是保障粮食和其他农产品的有效供给, 在国土空间上主要通过保护耕地的数量和质量得以实现; 生态功能旨在提供生态产品和服务、减少碳排放和维持生态系统平衡与健康, 其在国土空间上可通过优化生态用地配置、强化生态敏感区域的保护与修复得以实现; 经济功能是指通过促进相关产业发展, 推动县域经济稳定增长, 空间上体现在科学规划土地用途和优化用地布局, 以增强经济联动性和促进与周边区域协作发展; 社会功能则涵盖促进乡村振兴和文化遗产, 保障基本服务的可及性与公平性, 可以通过优化社区用地布局、加强农村基础设施建设、改善居住环境来体现。这些功能相互协调共同推动农产品主产区县域的综合发展, 国土空间规划是上述功能得以实现的基本依据。

因此, 根据农产品主产区县域的功能定位, 确定国土空间格局优化目标围绕粮食安全、经济发展、生态保护、碳减排和社会保障 5 个方面展开。其中粮食安全、生态安全、碳排放为约束性目标, 经济发展和社会保障为发展性目标。约束性目标设定发展的基本底线, 而发展性目标在此基础上进一步推进区域协调发展。

1.2 农产品主产区县域国土空间格局优化路径

1.2.1 理论路径

国土空间格局可以分为规模、结构、布局 3 个维度。其中, 规模决定了国土空间的地理范围和区域大小, 结构影响着国土空间内部的组织方式和关系, 而布局涉及

各种要素在国土空间中的位置和分布方式。这三者相互作用, 共同塑造了国土空间的整体格局。优化国土空间格局, 要结合优化目标, 通过数量化和空间化规模、结构和布局 3 维度的要素配置, 从而实现区域经济社会的协调可持续发展^[20]。

因此, 结合上述优化目标, 本文提出“规模—结构—布局—策略”优化框架。在空间规模层面, 表现为底线控制, 具体而言, 确保耕地规模以保障粮食安全, 控制建设用地增长规模, 推动发展方式向以存量发展为主的方向转变^[21], 同时保证生态用地规模, 以支持生态安全和碳减排目标的实现。在空间结构层面, 表现为数量调整, 在实现规模控制的基础上, 调整各地类的数量和比例关系, 确保不同功能地类之间的合理分配与协调, 避免过度发展, 提升空间系统的整体效能, 实现区域综合发展目标。在空间布局层面, 表现为位置优化, 全局统筹各类用地布局, 优化农业、建设和生态用地的空间配置, 充分利用自然资源优势和区位条件, 实现土地的高效利用与可持续发展。通过控制国土空间的规模、结构和布局, 形成具有明确空间特征和突出主体功能的空间格局。在空间策略方面, 表现为分区引导, 根据资源禀赋、经济基础和发展需求将县域内各乡镇划分为不同的功能区, 并针对每个区域的特点制定相应的发展政策, 实现区域的综合协调发展。

1.2.2 技术路径

技术路径分为结构优化和布局优化两部分。结构优化方面利用灰色多目标模型进行, 以耕地保有量、碳排放量、各类用地的发展需求等作为约束条件控制空间规模, 以经济效益最大化为优化目标进行数量结构优化。布局优化方面利用 Geosos-FLUS 模型, 从自然因素和社会因素确定格局变化的驱动因子, 以自然保护区为限制区域, 设定各地类转换规则, 根据结构优化结果进行布局模拟。经过布局模拟形成基本空间格局, 依据自然条件、碳吸收能力和经济发展潜力再对县域内部进行分区。具体优化框架见图 1。

2 材料与方法

2.1 研究区概况与数据来源

2.1.1 研究区概况

祁县位于山西省晋中市 (112°12'5"E~112°39'6"E, 37°4'5"N~37°28'6"N), 地处太原盆地中部, 东邻太谷区, 南接武乡县, 西连平遥县, 北与清徐县接壤, 地理位置优越, 交通便利。县域总面积约 85 353 hm², 下辖昭馥镇、东观镇、古县镇等 7 个乡镇 (图 2), 地势由东南向西北逐渐由山地、丘陵过渡为平原, 地貌类型多样。气候属温带大陆性季风气候, 四季分明, 土壤肥沃, 独特的地形与气候条件为农业生产提供了良好的基础。2014 年《山西省主体功能区规划》将其列为国家级农产品主产区县域, 2022 年粮食总产量达 208 129 t, 位列晋中市第二, 粮食作物以小麦和玉米为主。此外, 祁县还是晋商文化的重要发源地, 拥有丰富的文化遗产和旅游

资源，具有较高的文化和经济价值。近年来，随着城镇化进程加快，祁县耕地面积持续减少，建设用地面积不断扩张，国土空间格局发生显著变化。作为传统农业大县和无煤县，祁县面临如何合理利用有限土地资源、挖掘低碳发展潜力、推动县域转型升级的重大挑战。

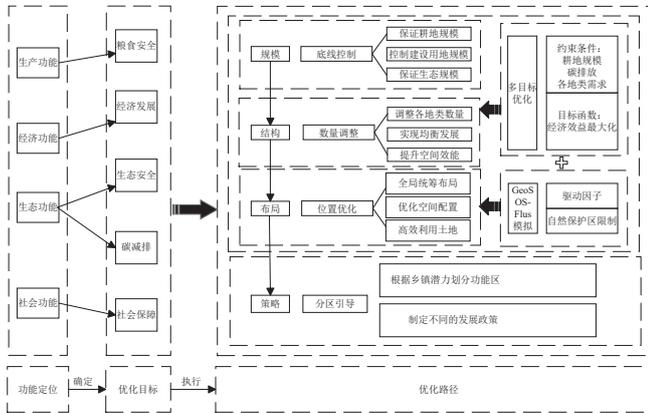


图 1 农产品主产区县域国土空间格局优化技术路线
Fig.1 Technical route for optimizing the spatial pattern of county land in the main producing areas of agricultural products

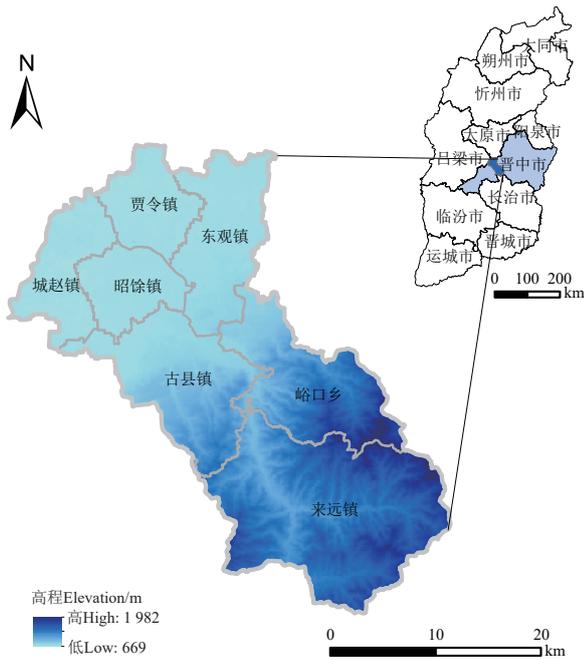


图 2 研究区地理位置图
Fig.2 Geographical location map of the study area

2.1.2 数据来源

本研究使用的基础数据包括：1) 2005—2021 年土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授团队发布的全国土地覆盖数据 CLCD 并将所有土地利用数据根据研究需求分为耕地、林地、草地、水域、建设用地。2) 能源数据来源于 2005—2021 年《中国能源统计年鉴》，人口数据、生产总值来源于 2006—2022 年《山西省统计年鉴》，农作物、粮食播种面积、产量等数据来源于 2008—2022 年《晋中市统计年鉴》。3) DEM 高程数据来源于自 2019 年地理空间数据云平台 (<http://gscloud.cn/>)。4) 2022 年行政区划、2020 年交通、2020 年降水、

2020 年平均气温、2018 年自然保护区、2023 年归一化植被指数 (NDVI)、2020 年人口密度、2020 年 GDP 空间分布数据、2020 年夜间灯光指数均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。5) 2024 年建成区、河流水系数据来源于 OSM 数据库 (<https://www.Openstreetmap.org>)。

河流水系、建成区和道路数据经过缓冲区分析处理，坡度和地形起伏度数据通过 DEM 提取生成。所有地理数据均在 ArcGIS 中完成投影变换、裁剪和重采样等预处理工作，并将所有数据统一为 2000 国家大地坐标系，像元大小统一重采样为 30 m×30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 耕地保有量预测模型

农产品主产区县域主要是为保障粮食安全提供坚实支撑。为此，必须严守耕地“量”的红线，遏制耕地“非农化”、防止“非粮化”，积极推动农业适度规模经营和产业化发展。因此，对耕地的严格保护至关重要。本文从粮食安全角度出发，构建耕地需求量预测模型：

$$S = \alpha \cdot G_p \cdot P / (E \cdot R \cdot U) \tag{1}$$

式中 S 表示确保粮食安全的最低耕地需求量 (hm^2)； α 为区域粮食自给率； G_p 为人均粮食需求量 (kg)； E 为耕地复种指数； R 为粮食作物播种面积占农作物总播种面积的比例； U 为单位面积粮食作物产量 (kg/hm^2)； P 为区域总人口^[22]。

基于县域主体功能，本文以 2035 年粮食安全下的耕地需求量作为耕地约束规模的下限。

2.2.2 土地利用碳排放估算

本文涉及的土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域和建设用地 5 种。其中，建设用地是碳源用地，林地、草地、水域是碳汇用地。耕地既是碳源用地又是碳汇用地，但其碳汇能力高于碳排能力，因此本文将视为碳汇用地。

1) 碳排放量测算

建设用地碳排放量通过化石能源消耗和人口呼吸间接计算^[23]。

$$C_n = C_e + C_p \tag{2}$$

$$C_e = \sum_{i=1}^{12} E_i \cdot X_i \cdot Y_i \cdot \frac{44}{12} \tag{3}$$

式中 C_n 为碳排放总量 (t)， C_e 为能源消费碳排放量 (t)， C_p 为人口呼吸碳排放量 (t)。 E_i 表示第 i 种化石能源的终端消费量， X_i 表示第 i 种化石能源的折标准煤参考系数， Y_i 表示第 i 种化石能源的碳排放系数，44/12 为 CO_2 和 C 的分子量之比。折标准煤换算系数来源于《中国能源统计年鉴》，碳排放系数基于 IPCC 碳排放计算方法，并参考相关学者的研究^[24-25]。根据山西省能源消耗情况，选取的能源有煤炭、焦炭、天然气等 12 种主要能源，祁县能源消费量通过与全省历年 GDP 比值间接测算得出。人口呼吸碳排放则按照每人每天排放 $2.450 \times 10^{-4} \text{ t}$ 碳进行计算^[23]。

2) 碳汇量测算

碳汇测算模型是基于土地利用类型和相应碳排放系数构建的。碳汇量 C_h 计算式如下:

$$C_h = \sum_{i=1}^4 A_i \times a_i \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式中 A_i 为第 i 种土地利用类型 (耕地、林地、草地、水域) 的面积; a_i 为第 i 种土地类型的碳吸收系数。参考其他学者的研究, 结合耕地的碳排放系数和碳吸收系数, 可以得出耕地的净碳吸收系数为 1.216 t/hm^2 ^[26]; 林地的碳吸收系数为 3.810 t/hm^2 ^[27]; 草地的碳吸收系数为 0.948 t/hm^2 ^[27]; 水域的碳吸收系数为 7.000 t/hm^2 ^[27]。

本文利用土地碳排放核算模型分析碳排放变化趋势结合发展需求从而确定减排目标。

2.2.3 基于 GMOP 的国土空间结构优化模型

灰色多目标动态规划模型 (gray multi-objective optimization, GMOP) 是一种将灰色预测理论 GM (1, 1) 与多目标线性规划 (multi-objective optimization, MOP) 相结合的优化框架^[28]。该模型通过建立动态的演化模型, 设定多个目标函数和相应的决策变量限制条件, 以实现最优的目标方案, 并充分反映决策者的意愿。考虑到祁县以保护为主、开发为辅的农业大县的特点, 选择采用 GMOP 模型进行国土数量结构优化。模型包括决策变量设置、确定目标函数、确定约束条件 3 部分。

1) 决策变量的设置

本文以国土利用现状为基础, 综合考虑县域的功能定位以及数据资料的可获取性等因素, 确定 5 个决策变量, 分别是耕地 (x_1)、林地 (x_2)、草地 (x_3)、水域 (x_4)、建设用地 (x_5)。

2) 目标函数的确定

本文以经济效益最大化 E_{max} 为目标, 地类经济效益可用经济产出率乘以用地面积来计算。其中, 耕地对应农业产值; 林地产值对应林业产值; 草地产值对应畜牧业产值; 水域产值对应渔业产值; 建设用地产值则对应第二、三产业产值^[29]。根据祁县历年数据, 计算得出 2007—2021 年各地类的经济产出率, 利用 GM(1, 1) 模型预测 2035 年的经济产出率如下: 耕地、林地、草地、水域和建设用地分别为 11.481、1.865、10.514、2.325、177.985 万元/ hm^2 。目标函数为

$$E_{max} = 11.481x_1 + 1.865x_2 + 10.514x_3 + 2.325x_4 + 177.985x_5 \quad (5)$$

3) 约束条件的建立

本文结合研究区功能定位、各类规划、土地利用情况、发展趋势以及发展目标等, 主要从耕地保护、碳排放、社会经济发展需求等方面建立如下约束条件:

①土地总面积约束: 祁县总面积不变, 各类用地面积之和等于祁县国土空间总面积 $85\,353.00 \text{ hm}^2$ 。

②碳排放约束:

根据土地利用碳排放计算式 (2) ~ (4) 估算, 祁县净碳排放量从 2005 年的 53.740 万 t 增加到 2016 年的

93.130 万 t, 随后在 2021 年下降至 57.503 万 t, 同时据相关研究评估山西省农产品主产区县域碳排放和碳减排潜力大多处于中等水平^[30]。根据历年碳排放变化趋势预测, 如果不采取干预措施, 祁县 2035 年总排放量预计将出现反弹现象约达到 127.200 万 t, 净排放量为 72.770 万 t。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》将“碳排放达峰后稳中有降”列入中国 2035 年远景目标^[31]。因此, 祁县未来一段时间内的首要目标是巩固碳减排成果, 保证祁县实现碳达峰的基础上进一步降低碳排放。2016—2021 年祁县净碳排放量下降 38.29%, 考虑到祁县无煤县的特点和产业发展需求, 人口变化趋势以及碳减排需求及潜力, 研究确定 2035 年祁县净碳排放量比 2021 年最低下降 15.00%, 则 2035 年净碳排不超过 48.878 万 t。

基于耕地、林地、草地、水域的特性, 在一段时期内, 碳汇系数的变化较小, 因此设定研究期内其数值是定值, 直接使用上述研究中的系数^[32]。建设用地碳排放系数各异且动态变化, 根据计算的建设用地碳排放量计算历年建设用地碳排放系数, 并采用 GM (1,1) 模型预测 2035 年建设用地的碳排放系数为 32.480 t/hm^2 。根据上述研究祁县碳排放目标最大为 48.878 万 t, 设定排放约束为

$$(-1.216x_1 - 3.81x_2 - 0.948x_3 - 7.00x_4 + 32.48x_5) \times 44/12 \leq 488\,780 \quad (6)$$

③耕地面积约束:

根据历年数据, 利用 GM (1,1) 模型预测 2035 年祁县的粮食单产约为 $14\,618.20 \text{ kg/hm}^2$, 粮作比为 0.92。考虑到祁县的农业生产条件和技术水平, 本文选取近几年耕地复种指数平均值 0.70 和粮食自给率的平均值 2.00 作为预测依据。人口规模采用平均增长率法、一元线性回归法和对数回归法进行预测, 结合祁县近年来的人口外流趋势、现代农业产业化体系的逐步完善、旅游资源的深度开发以及人口政策影响, 本文最终采用中等预测值 292 567 人。结合其他学者的对中国人均粮食需求量的预测^[33] 以及祁县的主体功能, 预计 2035 年人均粮食消费需求为 475.00 kg 。根据计算式 (1) 计算得出 2035 年祁县确保粮食安全的最低耕地需求量为 $29\,523.60 \text{ hm}^2$ 。设置耕地面积下限为预测的最低耕地保有量。由于城镇化的发展, 短期内耕地面积仍然会保持下降趋势, 因此将 2021 年的耕地面积作为上限。

$$29\,523.60 \text{ hm}^2 \leq x_1 \leq 38\,320.60 \text{ hm}^2 \quad (7)$$

④林地面积约束: 森林作为最大的有机碳库, 重要的生态安全屏障。为了实现区域生态安全和增加碳汇必须继续植树造林扩大林地的面积, 参考祁县十四五规划中确定的 2025 年森林覆盖率增长目标, 并按照保持这一年均增速到 2035 年林地面积为 $16\,061.43 \text{ hm}^2$, 将此设为林地最小面积, 设置最大面积为现状面积上调 20.00%。

$$16\,061.43 \text{ hm}^2 \leq x_2 \leq 17\,172.40 \text{ hm}^2 \quad (8)$$

⑤草地面积约束: 草地不仅有碳汇能力也具有生态价值和经济价值, 当前祁县畜牧业发展势头较足, 防止草地被过度侵占, 要加强草地的生态保护与建设。但是根据历年变化趋势来看, 草地面积呈不断下降趋势, 因此要保证草地面积有限减少, 所以本文设置最大面积为现状面积, 最小面积现状面积下调 20.00%。

$$19\ 651.52\ \text{hm}^2 \leq x_3 \leq 24\ 564.40\ \text{hm}^2 \quad (9)$$

⑥水域面积约束: 祁县水资源匮乏, 水域需要重点保护。分析历年水域变化情况以及考虑到水资源为发展限制约束, 水域最小面积为现状面积, 最大面积为现状上调 20.00%。

$$133.00\ \text{hm}^2 \leq x_4 \leq 159.50\ \text{hm}^2 \quad (10)$$

⑦建设用地需求约束: 由于建设用地转化一般不可逆, 城镇化发展仍持续推进, 建设用地面积仍是增加趋势, 但建设用地是最主要碳源地, 同时农产品主产区县域人口集聚能力不强, 祁县近几年出现了人口流失情况。所以要严控城镇建设用地增量、盘活存量。所以本文设置规划年末建设用地面积约束下限为现状面积, 上限为现状建设用地面积上调 15.00%。

$$8\ 024.71\ \text{hm}^2 \leq x_5 \leq 9\ 228.41\ \text{hm}^2 \quad (11)$$

⑧决策量非负约束: 在模型中, 各约束变量要求为非负值。

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (12)$$

2.2.4 基于 GeoSOS-FLUS 模型的国土空间布局模拟

GeoSOS-FLUS 是进行土地利用模拟的模型, 是对地理模拟与优化系统 (GeoSOS) 的延续, 并基于 FLUS 模型原理而开发的综合分析平台^[19]。本文结合灰色多目标规划模型, 根据结构优化结果, 耦合相关驱动因子与限制性因素, 运用该模型进行布局模拟。布局模拟包括选择驱动因子, 设置相关参数, 模拟精度验证 3 个部分。

1) 驱动因子的选择

国土空间格局的变化是多种因素相互作用的结果, 通常分为自然因素和人为因素。自然因素包括地形条件、气候条件和生态环境, 这些因素在空间格局变化中起着决定性作用。具体而言, 地形条件中的关键因素, 如高程、坡度和地形起伏度, 直接影响气候、水土流失和土壤肥力。气候条件中的关键变量, 如年平均气温和年均降水量, 对农业生产适宜性和作物生长有显著影响。生态环境中的归一化植被指数 (NDVI) 可以反映植被覆盖度和生态健康, 进而影响土地的生产潜力和生态质量。相比自然因素, 人为因素通过影响土地开发的成本和便

利性推动空间格局的变化。人为因素包括区位因素和社会经济因素。具体而言, 距离水源影响灌溉的便利性, 距离主要道路和城镇影响则运输成本和市场辐射。同时, GDP、人口密度和夜间灯光指数可以反映区域经济水平和社会活动强度。

GeoSoS-FLUS 模型结合土地利用数据和高程、坡度、地形起伏度、年平均气温、年平均降水、NDVI、距主要道路距离、距建成区距离、距河流距离、GDP、人口密度、夜间灯光指数这 12 种驱动因子, 采用人工神经网络算法 (artificial neural network, ANN) 估计各种土地利用类型的适宜性概率。

2) 相关设置及模型精度验证

模拟时需要设置邻域因子参数、限制转换区域和转移成本矩阵, 邻域因子参数代表地类的扩张能力, 土地利用转移成本矩阵表示各地类间的转移规则, 本研究参考相关研究^[34]设置转换规则, 同时为了实现县域生态安全目标设置自然保护区为限制变化区域。采用 Kappa 系数对所设模型进行检验, 基于 2007 年土地利用数据模拟 2021 年的土地利用布局, 将模拟结果于 2021 年实际土地利用情况做对比进行精度评价, 结果显示 Kappa 系数为 0.87, 总体精度为 0.91, 表明 GeoSOS-FLUS 模型的模拟精度较高, 适用于研究区域模拟未来土地利用变化。

3 结果与分析

3.1 国土空间利用格局优化结果

基于 Lingo18.0 软件进行结构优化, 结果如表 1 所示, 与 2021 年相比, 2035 年耕地面积保持在 38 320.60 hm², 可以大力保障粮食生产供应能力以满足农产品主产区县域的核心功能需求; 部分草地转为林地, 草地面积从 24 564.40 hm² 降至 21 485.80 hm², 林地面积从 14 310.33 hm² 大幅增加至 17 172.40 hm², 显著改善了区域的生态环境和碳汇能力, 同时仍保留足够的空间支撑祁县畜牧业的发展; 水域面积从 133.00 hm² 增至 159.50 hm², 促进了河流生态系统的修复与恢复, 也为农业以及居民生活提供了的水源支持; 建设用地从 8 024.71 hm² 略增至 8 214.70 hm², 严格控制摊大饼式蔓延, 推动建设用地增量向存量转化, 实现土地资源的集约高效利用。优化后的空间结构使经济效益以 5.20% 的年增长率保持稳定增长, 2021—2035 年从 1 062 675 万元跃升至 2 160 351 万元。同时, 碳排放量从 57.503 万 t 下降至 48.878 万 t, 减少了 15.00%。碳排放强度较 2021 年下降 53.34%, 较 2005 年下降 88.57%。还促进了经济效益、碳减排和生态保护的协调发展。

表 1 2021 年与 2035 年国土空间利用结构对比

Table 1 Comparison of the structure of national space utilization in 2021 and the target year(2035)

年份 Year	耕地 Cultivated land/hm ²	林地 Forest land/hm ²	草地 Grass land/hm ²	水域 Waterbody/hm ²	建设用地 Construction land/hm ²	经济效益 Economic benefit/10 ⁴ 元	碳排放量 Carbon emission/10 ⁴ t
2021	38 320.60	14 310.33	24 564.40	133.00	8 024.71	1 062 675	57.503
2035	38 320.60	17 172.40	21 485.80	159.50	8 214.70	2 160 351	48.878

2035 年土地利用布局模拟结果如图 3 所示, 与 2021 年相比 2035 年东南部的林地变化最为显著, 其空

间布局更加集中, 有助于形成更加完整和连续的生态系统, 提高碳吸收效率, 增强区域碳汇功能。耕地依然分

布在西北平原地区居民生活周边,在将地形起伏较大、坡度较陡的区域转为生态用地,同时在平原地区开垦部分草地为耕地,推动耕地从山区向平原转移,生态用地从平原向山区过渡。优化后的耕地布局在确保粮食安全底线的同时,提高了农业生产效率,为农业发展提供了更为理想的空间基础。建设用地和草地的空间变化较小,仍保持原有的地理格局,但分布更加集中。

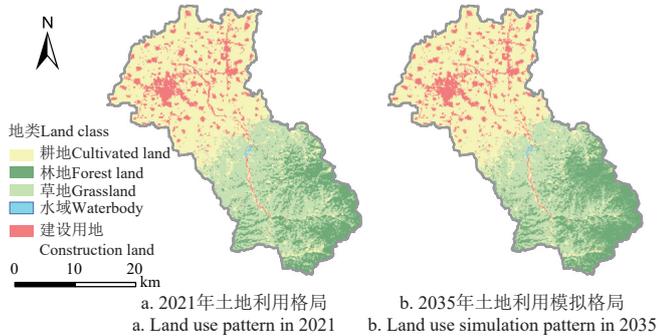


图3 2035年土地利用布局模拟结果

Fig.3 Simulation results of land use layout in 2035

整体来看,结构优化通过合理调控各类用地的比例,可以确保不同功能之间的协调,最大程度实现了粮食生产、生态保护和碳汇能力等多重目标的协同发展。布局优化则通过精准的土地配置,促进地类集中,提高了土地资源的利用效率,使各类土地更加高效地协同运作。结构和布局复合优化为实现县域主体功能和可持续发展奠定了坚实的空间基础。

3.2 县域分区优化

根据县域功能定位,可以把县域内部划分为碳汇功

能、经济发展、农业生产三大区域来实现协调发展。农业生产区域主要负责保障粮食生产和其他农产品的供应;碳汇功能区域则侧重于生态功能的维护,通过保护和恢复生态系统来增强碳吸收能力;经济发展区域则以推动经济功能为核心,促进工业、服务业和农村二三产业的发展。此外,各区域还需兼顾社会功能,提供基本公共服务、改善居民生活质量,并促进社会公平。

三大区域按照各乡镇粮食生产能力等级、碳汇能力等级以及经济发展能力等级进行划分。根据2035年土地布局模拟结果可计算地类在各乡镇的具体分配,粮食生产能力主要依赖于耕地面积,根据耕地面积采用自然断点法将各乡镇农业生产能力分为3级。碳汇能力和经济能力则分别根据乡镇各地类面积结合2035年碳排放系数与经济产出率进行计算,同样分为3级。由图4可知,峪口乡与来远镇碳汇能力最强,经济发展能力一般,农业生产能力较差,因此将其划分为碳汇区域;昭馥镇经济发展能力突出,其余能力较差,将其划分为经济发展区域。东观镇经济发展能力与农业生产能力突出,结合2021—2035年祁县总体国土空间规划将其划分为经济发展区;城赵镇、贾令镇和古县镇粮食生产能力与碳汇能力皆可,考虑到这3个乡镇地势平坦、距离河流较近,耕地质量较高,因此将其划分为农业生产区域。县域分区结果如图4所示,其中碳汇功能区域约占县域总面积的48.00%,经济发展区域占20.00%,农业生产区域占32.00%。通过划定三大区域,分别制定发展策略可确保各乡镇潜能的最大化发挥,实现县域内经济、生态与农业生产的协调可持续发展。

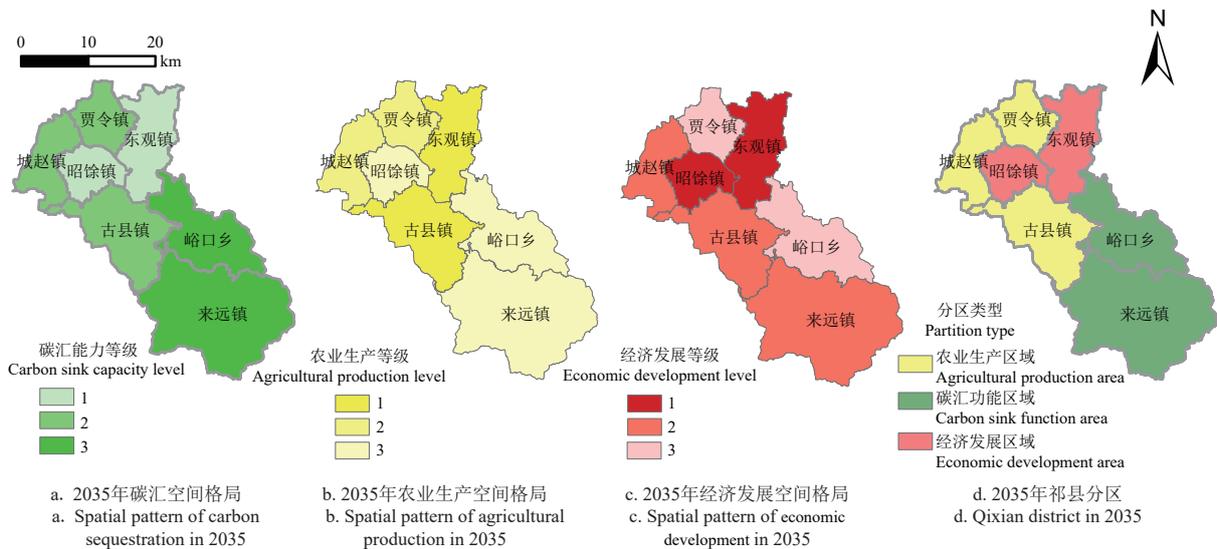


图4 县域分区

Fig.4 County area division

3.2.1 碳汇功能区域

碳汇功能区域拥有良好的自然环境,具备突出的生态功能,是县域内重要的碳汇资源集中区。未来的发展应当以提高碳汇和保护生态系统为导向,加强对城市化和工业化开发的限制,避免因过度开发导致的生态退化。

首先,应依托四县崮自然保护区建立自然保护地体系,利用河流、山脉等自然地形加强区域内的生态连接,构建生态保护廊道。通过恢复植被、优化动物栖息地、限制人类活动等措施,促进不同保护区之间的物种迁徙与基因交流,形成系统的生态保护格局。其次要注重退耕

还林、草地保护、湿地保护等生态工程的实施,提升区域的植被覆盖率和生态系统质量,增强生态系统的碳吸收和储存能力,进一步减少温室气体排放,提升生态环境质量。最后,充分依托当地丰富的生态资源,积极推动低碳旅游业和生态农业的发展。峪口乡要重点关注引导发展特色农业,提高农业生产效率和碳汇功能,以实现农业可持续发展和生态保护的良性循环。

3.2.2 经济发展区域

经济发展区域位于祁县核心位置,其碳排放量相对较高,且经济发展较为迅速。未来,该区域仍将以经济发展为主导,但必须加强土地利用的集约节约性,严格控制建设用地的扩张,推进建设用地发展方式由增量向存量转变。昭馥镇要注重保护传承县城历史文化和风貌,保存传统街区格局打造特色民居古城,同时积极融合现代城市发展需求,推动历史文化与现代设施的有机结合。东观镇经济开发区则注重发展以“食品加工、新能源新材料、文化旅游”为主导的特色产业,高效布局产业园区积极推动食品、碳素、文旅、玻璃等产业集群。同时,加强基础设施建设,提升交通网络与太原的联通性,积极融入太原都市圈,打造区域经济增长极。在发展过程中,要促进经济和产业结构的调整,重点控制碳排放强度,以实现经济可持续发展与碳减排的协调。

3.2.3 农业生产区域

农业生产区域拥有得天独厚的农业生产条件。未来发展应严格控制开发强度,重点要保护基本农田,提升耕地质量。首先,应落实基本农田保护政策,完善耕地保护机制,加强耕地用途管制。推进高标准农田建设,优化,提升耕地质量,推动其可持续利用,确保耕地资源的长期稳定。其次,发展特色农业,推动祁县酥梨品牌化和标准化发展,提升其品质和品牌影响力。加强农产品的加工和深加工产业链,提升酥梨的附加值,从而助力农民增收,推动农业经济的可持续发展。同时,降低农业碳排放强度,着力建设绿色园区和现代农业产业园,加快实施农产品加工、冷链物流设施的低碳化改造,积极推广农产品绿色电商模式,促进绿色低碳循环农业的发展。最后,针对农村居民点分散的特点,应加强农村基础设施建设,建立“多点式”农村公共服务中心,推进村镇协调发展进程。此外,应优化交通网络连接,改善乡村的交通可达性,缩短城乡差距,促进资源的高效流动。

4 结论与讨论

本文以山西省祁县为研究区,以功能定位为视角系统梳理农产品主产区县域国土空间格局优化的理论框架,明确粮食安全、生态安全、经济发展、碳减排和社会保障为优化目标,通过对空间规模、结构、布局的优化形成基本合理的空间格局,在此基础上将县域内部划分为不同功能区并实施相应措施实现差异化发展,从而实现县域主体功能与其他发展目标协同发展。主要研究结论如下:

1) 利用 GMOP 模型进行格局优化,结果显示到 2035 年耕地面积保持不变;草地面积降至 21 485.80 hm^2 ;林地增加至 17 172.40 hm^2 ;建设用地面积增加至 8 214.70 hm^2 。净碳排放较 2021 年减少约 8.625 万 t。经济效益达到 2 160 351 万元,较 2021 年增长 1 097 676 万元。碳排放强度较 2021 年下降 53.34%,较 2005 年下降 88.57%,有助于国家减排目标的实现。

2) 通过 GeoSOS-FLUS 模型进行布局模拟,结果显示 Kappa 指数达到 0.87,总体精度为 0.91,表明模型具备较高精度,结果准确可靠。优化后,林地布局更加集中高效,显著提升了碳汇能力;耕地质量得以提升,进一步保障了粮食安全。建设用地分布趋于集中,有利于促进经济流通。在保障农产品主产区功能的同时,优化布局为区域的可持续发展提供了坚实的空间支撑。

3) 根据各乡镇发展潜力将县域划分为 3 个区域分别实施不同的策略进行发展。来远镇和峪口乡属于碳汇功能区域,应以增加和提高碳汇为导向发展。昭馥镇和东观镇位于祁县核心位置,未来将以经济发展和产业升级为主导,城赵镇、贾令镇和古县镇拥有良好的自然环境和优越的农业生产条件,未来要以增加农业产量为导向进行发展。

农产品主产区县域作为新型城镇化和农业现代化的耦合点,承载着粮食生产和区域发展的多重任务。因此,优化此类县域国土空间格局不仅是保障粮食安全与生态安全的关键环节,也是推动农业现代化和提升区域竞争力的重要手段。本文以农产品主产区县域国土空间格局优化作为研究对象,旨在协调县域粮食安全、经济发展、碳减排、生态安全和社会保障等多重目标,实现县域主体功能与多维发展的有机结合。文中提出的差异化发展策略为地方政府制定国土空间规划和土地利用政策提供了明确的指引。这一研究不仅可以深化对功能县域国土空间优化的理解,也能为其他功能县域的格局优化提供思路借鉴,还可以为农业现代化和“双碳”目标奠定坚实基础。但研究仍具有进一步延伸的可能性:1) 在实际操作中,由于历史数据不足,部分数据存在难获取的问题。例如,在测算能源消耗和碳排放时,由于缺乏精细化的能源使用数据,研究采用 GDP 作为权重进行折算。这种方法虽然在一定程度上简化了计算过程,但可能忽视不同产业结构、能源类型和使用效率的差异,从而影响结果的准确性。因此,未来的研究应当考虑更多的折算系数。此外,土地利用类型可进一步细化,更精确的土地分类能更准确地反映不同用地类型对碳排放的影响,还能更全面地评估土地利用对粮食安全、生态保护和社会福利等多重目标的作用。2) 针对耕地规模可以进行不同情景的预测分析。通过模拟不同情景,可以更好地预测不同政策、经济发展和环境变化对耕地规模的影响。有助于制定更加科学合理的耕地保护政策,确保粮食安全和土地资源的可持续利用。3) 县域空间格局不仅涉及粮食安全、经济发展和社会保障等宏观目标,还要平衡不同社会群体和生态系统的利益。因此,未来的研究需

要进一步考虑利益相关方的需求与反馈,尤其是在区域功能分区的制定过程中,加入更多社会、生态和经济利益的权衡,以保证规划方案的公平性和可持续性。

[参 考 文 献]

- [1] 王亮, 顾伟男, 陈沛然. 主体功能区约束与区域发展协同决策: 逻辑与机制[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(6): 1430-1446.
WANG Liang, GU Weinan, CHEN Peiran. Understanding the synergistic decision-making in Main Function Zoning constraints and regional development: Logic and mechanism[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(6): 1430-1446. (in Chinese with English abstract)
- [2] 贾克敬, 何鸿飞, 张辉, 等. 基于“双评价”的国土空间格局优化[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(5): 43-51.
JIA Kejing, HE Hongfei, ZHANG Hui, et al. Optimization of territorial space pattern based on resources and environment carrying capacity and land suitability assessment[J]. *China Land Science*, 2020, 34(5): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孟宝, 邓伟, 彭立. 基于地理学的空间认识及中国国土空间功能优化方向分析[J]. *生态经济*, 2019, 35(9): 170-176.
MENG Bao, DENG Wei, PENG Li. Understanding of space and optimized of china territory space functional based on geography[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(9): 170-176. (in Chinese with English abstract)
- [4] 龚健, 高静, 陈光, 等. 国土空间格局优化情景分析: 理论与方法[J]. *中国土地科学*, 2024, 38(2): 1-10.
GONG Jian, GAO Jing, CHEN Guang, et al. Scenario analysis of territorial space pattern optimization: Theory and method[J]. *China Land Science*, 2024, 38(2): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郝庆, 郑筱津, 付世华. 国土空间格局优化的总体思路与技术流程——以市县级国土空间规划为例[J]. *经济地理*, 2024, 44(1): 166-173.
HAO Qing, ZHENG Xiaojin, Fu Shihua. General thought and technical process of the territorial space pattern optimization at the county level[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(1): 166-173. (in Chinese with English abstract)
- [6] 赵寿露, 李石华, 许新惠, 等. 耦合 MOP-FLUS 模型的滇中城市群“三生”空间格局优化[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 322-328.
ZHAO Shoulu, LI Shihua, XU Xinhui, et al. Production-life-ecological space pattern optimization of the urban agglomeration in central Yunnan based on coupled MOP and FLUS model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 322-328. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张恩月, 郑君焱, 苏迎庆, 等. 基于情景模拟的流域低碳土地利用格局优化研究——以汾河流域为例[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(2): 203-212.
ZHANG Enyue, ZHENG Junyan, SU Yingqing, et al. Optimization of low-carbon land use pattern based on scenario simulation: A case study of Fenhe River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(2): 203-212. (in Chinese with English abstract)
- [8] 朱从谋, 苑韶峰, 杨丽霞. 耦合 MOP 与 FLUS 模型的杭州市土地利用格局优化及权衡分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 235-244.
ZHU Congmou, YUAN Shaofeng, YANG Lixia. Spatial optimization of land use pattern and trade-off analysis in Hangzhou City by coupling MOP and FLUS model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(16): 235-244. (in Chinese with English abstract)
- [9] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 等. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 288-296.
Gu Hanlong, Ma Tianjun, Qian Fengkui, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(9): 288-296. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谢一茹, 高培超, 王翔宇, 等. 经济发展预期下的粮食产量与生态效益权衡——黑龙江省土地利用优化配置[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 873-881.
XIE Yiru, GAO Peichao, WANG Xiangyu, et al. Exploring the trade-offs between grain yield and ecological benefits in an economic development context: Land-use optimization of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2020, 56(6): 873-881. (in Chinese with English abstract)
- [11] 唐乎媿, 张斌, 鞠登平, 等. 生态-经济权衡下国家中心城市土地利用优化配置——以武汉市为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 416-424.
TANG Hutu, ZHANG Bin, JU Dengping, et al. Optimal allocation of land use in national central cities under ecological economic balance-take Wuhan City as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 416-424. (in Chinese with English abstract)
- [12] 万鼎, 王志远, 谭勇, 等. 基于开发保护综合效益的洞庭湖生态经济区“三生空间”格局优化[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 255-267.
WAN Ding, WANG Zhiyuan, TAN Yong, et al. Optimization of production-living-ecology spatial pattern in Dongting Lake Ecological Economic Zone based on comprehensive benefits of development and protection[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 255-267. (in Chinese with English abstract)
- [13] 游和远, 张津榕, 夏舒怡. 面向碳排放效率的多目标土地利用结构与布局优化研究——以杭州市萧山区为例[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(6): 74-83.
YOU Heyuan, ZHANG Jinrong, XIA Shuyi. Structure and layout optimization of multi-objective land use based on carbon emission efficiency: A case study of Xiaoshan District in Hangzhou City[J]. *China Land Science*, 2023, 37(6): 74-83. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王海军, 曾浩然, 张文婷, 等. 基于改进的 GPU 并行 NSGA-III 的土地利用优化配置[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 283-291.
WANG Haijun, ZENG Haoran, ZHANG Wenting, et al. Land use optimization allocation based on improved NSGA-III by GPU parallel computing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(21): 283-291. (in Chinese with English abstract)
- [15] HUO J G, SHI Z Q, ZHU W B, et al. A multi-scenario simulation and optimization of land use with a Markov-FLUS coupling model: A case study in Xiong'an New Area, China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(4): 2425-2425.
- [16] 梁毅东, 张述清, 朱大明, 等. 主体功能视角下耦合马尔

- 可夫链和 PLUS 模型的城镇开发边界划定研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(7): 1702-1716.
- LIANG Yidong, ZHANG Shuqing, ZHU Daming, et al. Research on urban development boundary delineation using coupled Markov Chain and PLUS Models from the perspective of main functions[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(7): 1702-1716. (in Chinese with English abstract)
- [17] LUAN C, LIU R, ZHANG Q, et al. Multi-objective land use optimization based on integrated NSGA-II-PLUS model: Comprehensive consideration of economic development and ecosystem services value enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434:140306.
- [18] 张考, 黄春华, 王志远, 等. 基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化——以长沙市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 9957-9970.
- ZHANG Kao, HUANG Chunhua, WANG Zhiyuan, et al. Optimization of "production-living-ecological" spaces based on DTTD-MCR-PLUS Model: Taking Changsha City as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 9957-9970. (in Chinese with English abstract)
- [19] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1171-1185.
- CAO Shuai, JIN Xiaobin, YANG Xuhong, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of landuse structure and layout in Jintan district[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1171-1185. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 等. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1137-1147.
- DING Minglei, YANG Xiaona, ZHAO Rongqin, et al. Optimization of territorial space pattern under the goal of carbon neutrality: Theoretical framework and practical strategy[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1137-1147. (in Chinese with English abstract)
- [21] 崔金丽, 朱德宝. “双碳”目标下的国土空间规划施策: 逻辑关系与实现路径[J]. 规划师, 2022, 38(1): 5-11.
- CUI Jinli, ZHU Debao. Territorial spatial policies under carbon emission peak and carbon neutrality visions: Key logic and realization path[J]. Planners, 2022, 38(1): 5-11. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谢树春, 朱建军, 宋永永. 基于粮食安全的宁夏耕地需求量预测[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 663-670.
- XIE Shuchun, ZHU Jianjun, SONG Yongyong. Forecast of the demand of cultivated land in Ningxia based on food security consideration[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 663-670. (in Chinese with English abstract)
- [23] 曹周亮, 张欣蓉, 员学锋, 等. 基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 376-385.
- CAO Zhouliang, ZHANG Xinrong, YUAN Xuefeng, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO₂ emission at county scale in Shanxi Province based on land use change[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 376-385. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1267-1276.
- LI Yuanyuan, WEI Wei, ZHOU Junju, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1267-1276. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李国焯, 王嘉怡, 曹宇, 等. 碳排放约束下的福建省城镇建设土地利用效率动态变化与影响因素[J]. 中国土地科学, 2020, 34(4): 69-77.
- LI Guoyu, WANG Jiayi, CAO Yu, et al. Dynamic changes and influencing factors of urban construction land use efficiency under carbon emission constraint in Fujian Province[J]. China Land Science, 2020, 34(4): 69-77. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨扬, 周浩, 文高辉, 等. 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用变化及其碳效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 390-397.
- YANG Yang, ZHOU Hao, WEN Gaohui, et al. Land use change and its carbon effect in Dongting Lake Basin during 1980-2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 390-397. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘宜卓, 石悦泽, 荆克迪. “双碳”目标下黄河流域九省区横向区域碳补偿机制构建研究[J]. 生态经济, 2024, 40(1): 29-37.
- LIU Yizhuo, SHI Yueze, JING Kedi. Research on the construction of horizontal regional carbon compensation mechanism in nine provinces of the Yellow River Basin with the goal of "Double Carbon"[J]. Ecological Economy, 2024, 40(1): 29-37. (in Chinese with English abstract)
- [28] 马瑞, 范燕敏, 武红旗, 等. 耦合 GMOP 与 PLUS 模型的干旱区土地利用格局模拟[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 143-153.
- MA Rui, FAN Yanmin, WU Hongqi, et al. Simulation of land-use patterns in arid areas coupled with GMOP and PLUS models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(1): 143-153. (in Chinese with English abstract)
- [29] 宋丹. 长春市低碳土地利用分析与结构优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 76-87.
- SONG Dan. Analysis of Low-carbon Land Use and Research on Structure Optimization in Changchun City[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 76-87.
- [30] 李虹, 张红, 贺桂珍, 等. 基于主体功能区的山西省碳排放时空特征及减排评价[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 143-153.
- LI Hong, ZHANG Hong, HE Guizhen, et al. Spatio-temporal characteristics and reduction evaluation of carbon emission from the perspective of Major Function Oriented Zones, Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 143-153. (in Chinese with English abstract)
- [31] 揣小伟. 基于“碳中和”目标的土地利用研究进展与思考[J/OL]. 武汉大学学报(理学版), 2024, 1-11[2024-10-26]. <https://doi.org/10.14188/j.1671-8836.2023.0024>.
- CHUAI Xiaowei. Progress and thoughts on land use under carbon neutrality target[J/OL]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2024, 1-11 [2024-10-26]. <https://doi.org/10.14188/j.1671-8836.2023.0024>. (in Chinese with English abstract)
- [32] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220-229.
- ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 220-229. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张晶. 2035 年中国人粮关系情景分析[J]. 中国农业资源与区划, 2011, 32(3): 26-31.

ZHANG Jing. Scenario analysis of relationship between population and grain in China in 2035[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2011, 32(3): 26-31. (in Chinese with English abstract)

- [34] 杨伟青, 张会兰. 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2022,

29(5): 253-262.

YANG Weiqing, ZHANG Huilan. Ecosystem service value assessment and multi-scenario simulation of Fujiang River Basin based on GeoSOS-FLUS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 253-262. (in Chinese with English abstract)

Optimization of county-level territorial spatial patterns in major agricultural production areas under multi-objective synergy

ZHU Yuting¹, DING Yi^{1*}, BAI Weixu¹, YAN Siyu¹, LIU Guangsheng^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, China; 2. School of Public Administration, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This study aims to optimize the land use spatial pattern in the major agricultural production areas at the county level, in order to implement the national functional zoning and food security. An optimization framework was constructed for the land use spatial pattern of major agricultural production areas, according to the four aspects of "scale-structure-layout-strategy." Taking Qixian County in Shanxi Province as an example, the optimization targets were defined as the food security, ecological security, economic development, carbon reduction, and social security. The grey multi-objective model was coupled with the GeoSOS-FLUS model. The county was further divided into the functional zones. The development strategies were proposed for each zone. The results were as follows: 1) The area of arable land was remained at 38 320.60 hm² by 2035 after structural optimization; The area of forest land increased to 17 172.40 hm², in order to enhance the carbon sequestration; Grassland decreased to 21 485.80 hm² for the optimal land use; The water area increased to 159.50 hm² for the ecological services; The construction land was expanded to 8 214.70 hm². The total economic output was predicted to increase by 1 097 6.76 million yuan, compared with 2021. Net carbon emissions were reduced by approximately 86 250 t, compared with 2021. Carbon intensity was predicted to decrease by 53.34%, compared with 2021, and by 88.57% compared with 2005. These predictions were achieved in the multiple objectives from the agricultural production, ecological protection, and economic development. 2) The GeoSOS-FLUS model was used to simulate the layout of land use. The Kappa index reached 0.87, with an overall accuracy of 0.91, indicating the high precision and reliable optimization. Furthermore, the more concentrated and efficient forest land was significantly improved the carbon sequestration; The quality of arable land was enhanced to further ensure the national food security. More concentrated construction land was also promoted the economic circulation. The optimized layout provided a solid spatial foundation for the sustainable development in major agricultural production areas. 3) According to the development potential of different townships, the county was divided into three zones: agricultural production, economic development, and carbon sequestration. Among them, the carbon sequestration zone aimed to enhance the carbon sequestration and protect ecosystems. The ecological corridors and projects were dominated, such as returning farmland to forest, grassland protection, and wetland restoration, particularly for the low-carbon tourism and ecological agriculture. The economic development zone aimed to promote the industry clusters and infrastructure. The industrial restructure and carbon reduction were then driven to enhance the connectivity with the Taiyuan metropolitan area. The agricultural production zone prioritized the protection and quality of basic farmland and the arable land. Characteristic agriculture was developed to promote the branding of Qixian pear. Green and low-carbon agriculture was implemented to construct the modern agricultural industrial parks and rural infrastructure. The land use spatial pattern was also optimized in the major agricultural production areas at the county level. The county functional zoning and multidimensional development were integrated to coordinate the multiple objectives, such as food security, economic development, carbon reduction, ecological security, and social security. The differentiated strategies were proposed to formulate the land use and territorial spatial planning. The spatial optimization of land use can offer the valuable insights to the functional counties for the agricultural modernization and the carbon neutrality.

Keywords: territorial spatial pattern optimization; agricultural production area; grey multi-objective; GeoSOS-FLUS