doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.013

基于多目标粒子群优化算法的永久基本农田划定模型

王　华[1]　陈梦奇[1]　蔡恩香[2]　刘殿锋[3]　陈学业[4]

(1.郑州轻工业大学河南省食品安全数据智能重点实验室,郑州 450002;
2.河南农业大学资源与环境学院,郑州 450002;
3.武汉大学资源与环境学院,武汉 430079;
4.自然资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室,深圳 518034)

摘要:针对传统的永久基本农田划定方法不能较好地统筹兼顾永久基本农田的耕地质量、空间布局集中连片等目标问题,提出了一种基于粒子群优化算法的多目标永久基本农田划定模型,该模型包括土地适宜性、连片性、稳定性 3 个子目标函数,同时考虑生态保护红线、地形地貌等约束条件。选取河南省浚县为研究区域,根据目标偏好不同设置对照实验。结果表明,该模型在永久基本农田划定工作中具有可操作性,避免了划定过程中主观因素带来的不利影响,且可以提供多情景的永久基本农田布局方案,促进了永久基本农田划定结果的科学合理性。

关键词:永久基本农田;多目标;空间优化;生态保护红线;粒子群优化算法

中图分类号:F301.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0138-09　　**OSID**:

Permanent Basic Farmland Delineation Model Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm

WANG Hua[1]　CHEN Mengqi[1]　CAI Enxiang[2]　LIU Dianfeng[3]　CHEN Xueye[4]

(1. *Henan Key Laboratory of Food Safety Data Intelligence, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou* 450002, *China*
2. *College of Resource and Environment Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*
3. *College of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan* 430079, *China*
4. *Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen* 518034, *China*)

Abstract: The problem of delimiting permanent basic farmland is essentially a multi-objective optimization problem. The traditional delimitation method can not take into account the quality and continuity of permanent basic farmland, and it can not balance the relationship between agriculture and urban development. A multi-objective permanent basic definition model was proposed based on particle swarm optimization algorithm. This model defined the general rules for delineating permanent basic farmland, the formal expression of delineation goals and constraints, and extracted three sub-goals—land suitability, land continuity, and land stability. At the same time, the model took into account four types of constraints, including the total area of permanent basic farmland, land use, terrain basic conditions, and town boundaries. It also described the coding and initialization methods of the algorithm, the particle position and speed update mechanism, the fitness function design, and the overall process. Finally, Xun County, Henan Province, was selected as the research area, and set up control experiments according to different target preferences. The results showed that the model was operable in the study of the delineation of permanent basic farmland, which can effectively reduce the subjectivity and arbitrariness in the delineation process, making the delineation of permanent basic farmland more scientific and reasonable. This would be conducive to improving the quality and production capacity of cultivated land, thereby ensuring national food security and ecological security.

Key words: permanent basic farmland; multi-objective; spatial optimization; red line for ecological protection; particle swarm optimization algorithm

收稿日期:2020-09-28　修回日期:2020-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41771429)、自然资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室开放基金项目(KF-2019-04-038)和河南省科技攻关项目(212102210105)

作者简介:王华(1986—),男,副教授,博士,主要从事国土空间优化决策技术研究,E-mail:whuwanghua@163.com

0　引言

随着我国城市化进程的不断推进，城市快速扩张，导致农用地被侵占。为保障粮食安全、推进现代化农业的发展，我国根据国土空间总体规划的要求，按照人口、经济和社会需求，将一定比例的优质耕地划定为永久基本农田[1]。

从本质上看，永久基本农田划定需要兼顾多方面因素，可将其看作一个多目标空间优化问题。基于现有研究可将永久基本农田划定方法分为 3 类。第 1 类主要通过行政指标的分配进行永久基本农田划定[2]，此类只需满足指标数量要求。第 2 类引入了空间聚集格局[3]、理想解逼近法[4]、层次分析法[4-5]、LESA 体系[6]等定量评价方法，根据耕地的自然条件[7-8]、经济效益[9]、利用水平[10-11]等进行多方面的综合考量。上述方法在一定程度上提高了永久基本农田划定的科学性、严谨性，但多数指标选择和指标赋权仍存在一定的主观性，并且对指标体系的依赖性过强，对多目标优化问题不能兼顾解决。第 3 类方法引入了近些年兴起的人工智能算法，如贝叶斯网络[12]、TOPSIS 算法[13]、人工免疫算法[14]、人工神经网络[15]等，这为永久基本农田的划定提供了新的发展方向。人工智能算法在解决多目标空间规划问题上具有很大的优势，并在土地资源配置[16]、空间布局优化[17-18]、空间选址[19-21]、土地利用分区[22]等方面获得成功应用。其中，粒子群优化（Partial swarm optimization，PSO）算法属于群智能算法，受鸟群觅食活动启发，具有执行迅速、问题维数影响低等优点，对于高维空间优化问题具有较好的适宜性，已广泛应用于多个领域。

国土空间规划高度重视生态空间建设，生态保护红线是保障和维护国家生态安全的底线和生命线，是永久基本农田划定过程中不可忽视的因素。本研究在生态保护红线、地形条件等约束规则下探讨永久基本农田划定这一多目标优化的模型构建问题[23]，定义永久基本农田划定的目标函数体系及多约束条件的形式化表达方式，采用粒子群优化算法求解该多目标空间优化问题，对粒子群优化算法的位置、速度更新公式进行空间化改进，并选取河南省鹤壁市浚县为研究区，验证该模型的可行性及有效性。

1　数据与处理

1.1　研究区概况

浚县位于河南省北部、鹤壁市东部，地理坐标为（35°26′37″～35°50′42″N，114°14′52″～114°45′12″E）（图 1），全县下辖 9 个乡镇、476 个村，农用地面积为 78 711.18 hm^2，其中耕地面积 70 994.60 hm^2，全县总体地形较为平坦，大部分地区为平原，西部部分地区为丘陵和岗地。浚县是省级现代农业产业园，粮食年产量 100 万 t 以上。

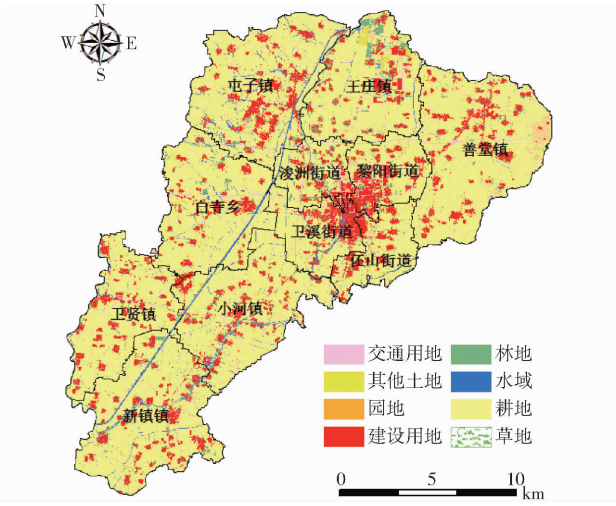

图 1　浚县地理区位及主要土地利用现状

Fig. 1　Location and land use map of Xun County

1.2　数据处理

本研究主要涉及到的数据及其来源如表 1 所示。

表 1　主要研究数据及其来源

Tab. 1　Details of main research data

来源部门	来源文件	数据
农业局	耕地质量等级最新成果、耕地质量更新评价成果、农用地分等定级结果	pH 值、土壤剖层、有机质含量、地形地貌、灌溉设施完善程度等
自然资源局	土地利用变更调查结果、第三次全国国土调查成果、土地利用总体规划调整完善成果	土地利用现状、生态红线、中心城区范围线
交通局	道路分布图、交通规划布局方案	道路通达度
环保局	环境保护“十三五”规划	生态红线与自然保护区等数据

为确保数据一致性，利用 ArcGIS 10.2 软件将研究区域各图层的投影坐标系统一为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_38，将矢量数据转换成栅格数据，得到同一栅格单元不同影响因素的对应值。为保证栅格单元大小适中，使用 100 m × 100 m 作为最小栅格单元，研究区域栅格单元总数为 98 360 个，其中耕地单元数为 73 122 个，并对栅格单元进行编码，增加字段存储相应数据并进行数值映射。主要影响因子空间数据如图 2（图中数值均为因子得分，无量纲）所示。

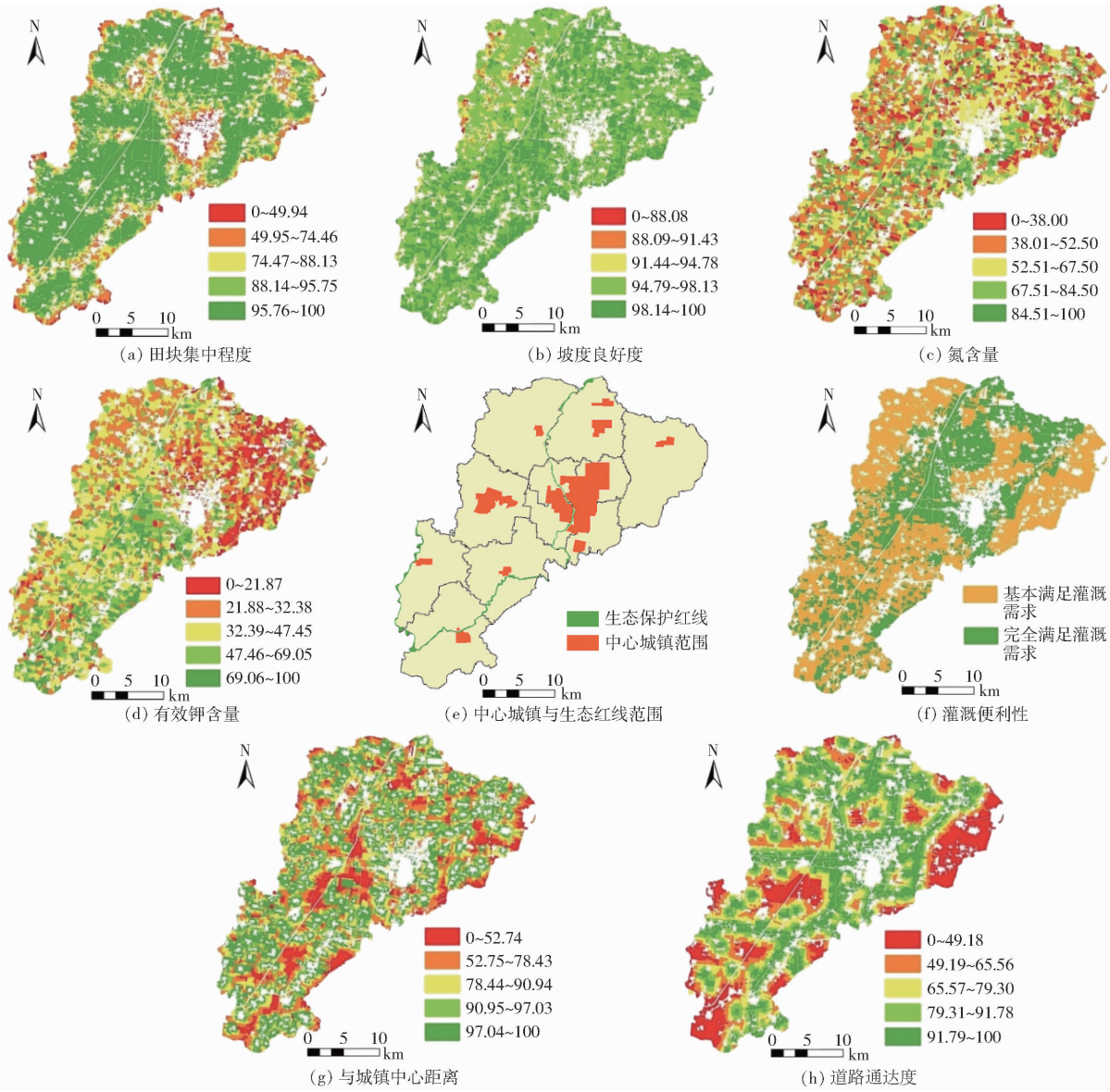

图 2 主要空间因素分布图

Fig. 2 Main spatial factors distribution diagram

2 PSO 模型构建

2.1 目标函数

结合《土地管理法》第三十三条有关永久基本农田划定要求,为实现最终划定的永久基本农田既可以达到耕地质量较优、基础设施完善、集中连片且不易被侵占的目的[14-15],本研究将永久基本农田划定模型的目标体系设置为 3 个子目标:土地适宜性、土地连片性、土地稳定性。

2.1.1 土地适宜性

适宜性主要指耕地质量,综合了耕地自然条件、经济因素、水利设施等因素,是永久基本农田划定工作重要参考标准之一。浚县对应的耕地国家质量等别分别为 5、6、7、8 等 4 个等级,则每一个栅格单元对应的适应性值 s_{ij} 分别为 1.0、0.7、0.4、0.1。根据适应性值和当下入选的栅格单元的决策变量 r_{ij},可以计算整体适宜性。由于本模型采用的是栅格空间数据,每一个土地栅格单元的决策状态只存在 1 和 0 两种状态:$r_{ij}=1$ 代表该单元被选入,未被选中则 $r_{ij}=0$。因此,只计算 $r_{ij}=1$ 的单元即可。土地适宜性指数 f_s 为

$$f_s = \sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n} r_{ij}s_{ij} \tag{1}$$

式中 m——栅格总行数

n——栅格总列数

2.1.2 土地连片性

空间的连片性是指在同一区域内,入选基本农田的农田单元的空间位置相连紧密程度。零散的基本农田会影响工作效率,增加劳动成本,不利于粮食生产。同时,连片性高的土地需要更少的基础设施和其他服务,便于管理。本文参照文献[15]方法,基本农田布局的连片性指数 f_l 计算式为

$$f_l = \frac{L_{\max} - L_{\text{sum}}}{L_{\max} - L_{\min}} \tag{2}$$

式中　L_{sum}——划定的永久基本农田的周长之和

当划定单元全部集中相连，此时周长和最小，为 $L_{\min}$；反之，若选定的单元彼此分离，则周长和最大，为 $L_{\max}$。f_l 越大，代表永久基本农田的土地连片性越高。

2.1.3　土地稳定性

土地稳定性为土地在一定时期内不被侵占、挪用的可能性。近年来，人口、资源大量流入城镇促使城镇规模扩大，迅速向周围扩张，对周边耕地稳定性产生负面影响。但耕地保护不应制约当地经济的发展，在划定过程中，可以将此因素作为负面因素，以提高永久基本农田的稳定性。

栅格中每一单元的土地发展潜力 d_{ij} 取决于该栅格单元与最近公路、铁路、高速公路以及城镇中心的欧氏距离，分别表示为 $D_{\text{Roads}_{ij}}$、$D_{\text{Railways}_{ij}}$、$D_{\text{Expressway}_{ij}}$、$D_{\text{District}_{ij}}$，与之相对应的权重为 μ_b（$b = 1$、2、3、4），并将 d_{ij} 归一化为 D_{ij}，方便后续计算，即

$$d_{ij} = \mu_1 D_{\text{Roads}_{ij}} + \mu_2 D_{\text{Railways}_{ij}} + \mu_3 D_{\text{Expressway}_{ij}} + \mu_4 D_{\text{District}_{ij}} \tag{3}$$

其中　$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 = 1$

$$D_{ij} = \frac{d_{ij} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \tag{4}$$

式中，将 d_{ij} 能达到的最大、最小值分别设为 $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$。D_{ij} 越大，该单元越稳定，适宜选入永久基本农田。D_{ij} 与决策变量 r_{ij} 的乘积和即可表示土地稳定性指数 f_w，计算式为

$$f_w = \sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} r_{ij} D_{ij} \tag{5}$$

综上所述，可以看出永久基本农田划定是一个多目标优化问题，针对上述 3 个子目标，本模型选取线性加权方式来处理目标函数 $f(x)$，$f(x)$ 计算式为

$$f(x) = \text{Max}(\rho_1 f_s + \rho_2 f_l + \rho_3 f_w) \tag{6}$$

其中　$\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 1$

式中　ρ_1——土地适宜性权重

ρ_2——土地连片性权重

ρ_3——土地稳定性权重

2.2　约束条件

（1）入选耕地总面积约束

鹤壁市国土空间总体利用规划下达给浚县的永久基本农田保护目标是 60 246.67 hm^2，保护率达到 84.86%。因此，浚县入选耕地总面积 A 需满足

$$A = \sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} r_{ij} M_{ij} \geqslant 60\,246.67\ \text{hm}^2 \tag{7}$$

式中　M_{ij}——每个土地单元的面积

（2）土地用途约束

根据土地用途转换历史规则，城镇建设用地难以转换为农用地，不能作为备选永久基本农田。在本模型中，预先将城镇建设用地空间单元剔除，不参与模型计算。

（3）地形基础条件约束

根据自然资源部、农业农村部《关于加强和改进永久基本农田保护工作的通知》，当耕地坡度大于 25°时，坡度过陡，极大地限制了此类耕地的利用，要逐步退耕还林还草。为耕地单元设置随机决策变量 c_{ij}，该值越大表明随机入选永久基本农田概率越低，坡度等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ的决策变量映射值分别为 0、0.2、0.4、0.6、1.0。

（4）生态保护红线约束

生态保护红线禁止生产经营活动，永久基本农田划定时需要尽力避免落入生态保护红线区域，如图 2e 中绿色范围。对处于生态保护红线内的决策单元可以提前剔除，不参与模型计算。

（5）城市周边范围约束

依据永久基本农田划定新要求，要求将城镇周边和交通沿线的耕地中，质量较好的部分优先划为永久基本农田。通过城市周边建设用地现状布局和中心城区规划控制范围确定城市周边范围，如图 2e 中红色范围所示。范围线内的耕地单元质量等别超过县域平均质量等别，在随机选择时具有优先权，设置 $c_{ij} = 0.2$，低于平均质量的耕地单元选择概率设置为 0.8。对于主干交通要道周边耕地可采用同样的处理方法。

2.3　算法设计

2.3.1　粒子编码与初始化

如图 3 所示，本文使用的栅格数据中每一候选单元只有 2 种取值可能，使用二进制编码方式，标记栅格单元是否被选入永久基本农田，若单元格不参与计算，则标记为“Null”（图中用 N 表示）。针对粒子自身的位置、速度，粒子的编码方式如图 3b 所示。此外，本模型定义了一个粒子结构体，不仅包含了划定方案信息，还包含了粒子的适应度信息以及粒子当前位置、个体最佳位置、全局最佳位置 4 部分，如图 3c 所示。

对粒子进行初始化时，为避免约束条件限制内的土地单元被选中，在初始化过程中，采用带约束的随机模式对粒子进行初始化。2.2 节中，当该单元坡度大于 25°时本文使用 $c_{ij} = 0.9$ 来标记被限制的土地单元。当粒子开始初始化时，决策变量 r_{ij} 的取

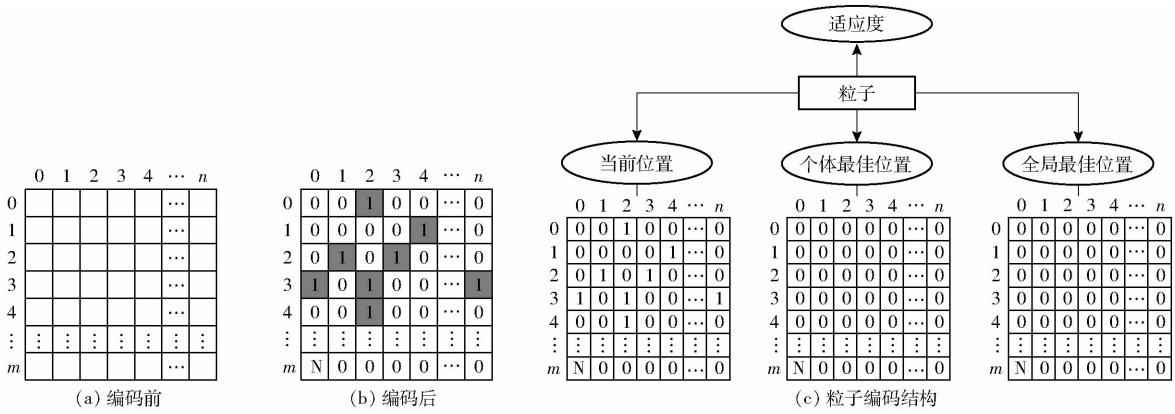

图 3 粒子编码策略

Fig. 3 Particle coding strategy

值根据 c_{ij}来决定。首先,通过 randint( )随机函数生成一个 0 ~ 1 之间的随机数 u_s。如果随机数 $u_s = 1$,则用同样的方式再次生成随机数 u_s。若 $u_s > c_{ij}$,则决策变量 $r_{ij} = 1$,否则决策变量 $r_{ij} = 0$,若 $u_s = 0$,决策变量 $r_{ij} = 0$。在这种生成随机数的方式下,$u_s > c_{ij}$的可能性很小,该单元被选入永久基本农田的概率也就相应降低。

2.3.2 粒子位置、速度更新

对于标准粒子群优化算法,在粒子进行位置更新后,不能保证其更新后为 0 或 1,因此对位置更新函数做出改进。引入模糊函数 Sigmoid(x),由于 x_{ij}取值是 0 还是 1 由速度决定,模糊函数 Sigmoid(x)和位置更新公式为

$$\text{Sigmoid}(v_{ij}) = \frac{1}{1 + \exp(v_{ij})} \tag{8}$$

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \geqslant \text{Sigmoid}(v_{ij}(t+1))) \\ 1 & (\varepsilon < \text{Sigmoid}(v_{ij}(t+1))) \end{cases} \tag{9}$$

式中 ε——0 ~ 1 之间的随机数

x_{ij}——粒子当前位置

v_{ij}——粒子飞行速度

通过式(9)将 $x_{ij}(t+1)$的值域控制为[0,1]。二进制算法中,v_{ij}可以视作概率,若概率 Sigmoid(v_{ij})取值为 1,则 1 - Sigmoid(v_{ij})的概率取值为 0,粒子的概率变化可表示为

$$\rho = \text{Sigmoid}(v_{ij})(1 - \text{Sigmoid}(v_{ij})) \tag{10}$$

对模型的任一粒子,设定最大速度为 $v_{\max}$,避免粒子飞出搜索区域,而在二进制中代表算法允许的概率范围。通过算法测试计算,当 $v_{\max} > 10$ 时,$\text{Sigmoid}(v_{\max}) < 4.53 \times 10^{-5}$,此时算法的位置更新失去意义。通过对 Sigmoid(v_{ij})函数的计算,为了保证粒子的位置能够发生变化,将 $v_{\max}$设定为 6,此时 $0.002\,5 < \text{Sigmoid}(v_{ij}) < 0.997\,5$。

2.3.3 适应度函数

由于约束条件的存在,在限制下对多目标优化问题进行求解,既结合 3 个子目标函数,还应考虑保护区面积规模、城镇边界等约束条件的限制。因此,本文采用外罚函数来处理模型约束条件,将其转换为目标函数的一部分,变成无约束优化问题,外罚函数 $\varphi(x)$表达式为

$$\varphi(x) = f(x) \pm \left(\sum_{i=1}^{p} \gamma_i G_i(x) + \sum_{j=p+1}^{q} c_j H_j(x) \right) \tag{11}$$

其中 $$G_i(x) = \max(0, g_i(x))^{\delta}$$

$$H_j(x) = |h_j(x)|^{\gamma}$$

式中 $G_i(x)$——不等式约束条件函数

$H_j(x)$——等式约束条件函数

p——不等式约束条件总个数

q——等式约束条件总个数

δ——等式约束条件正惩罚系数,取 1 或 2

γ——不等式约束条件正惩罚系数,取 1 或 2

$g_i(x)$——不等式约束条件

$h_j(x)$——等式约束条件

2.3.4 算法流程

基于上述永久基本农田目标函数及约束条件体系的构建,确定本研究模型算法流程如图 4 所示。

3 结果与分析

3.1 模型参数设置

对于永久基本农田划定模型的参数设定,本文参照文献[24 - 25]提出的 PSO 典型参数值设定本模型的主要参数,具体设定粒子群种群规模 Q 为 30,迭代次数 I 为 100,惯性权重最大值 $w_{\max}$为 0.9,惯性权重最小值 $w_{\min}$为 0.4,认知加速度因子 a_1为 2.8,社会加速度因子 a_2为 1.3,飞行范围 b_1为[0,1],飞行范围 b_2为[0,1],最大飞行速度 $v_{\max}$为 6。

为提前筛掉不适宜作为基本农田的土地,提高模型计算效率,将栅格单元重新划分为 6 类:耕地、其他农用地、未利用地、城乡建设用地、交通运输用地、水

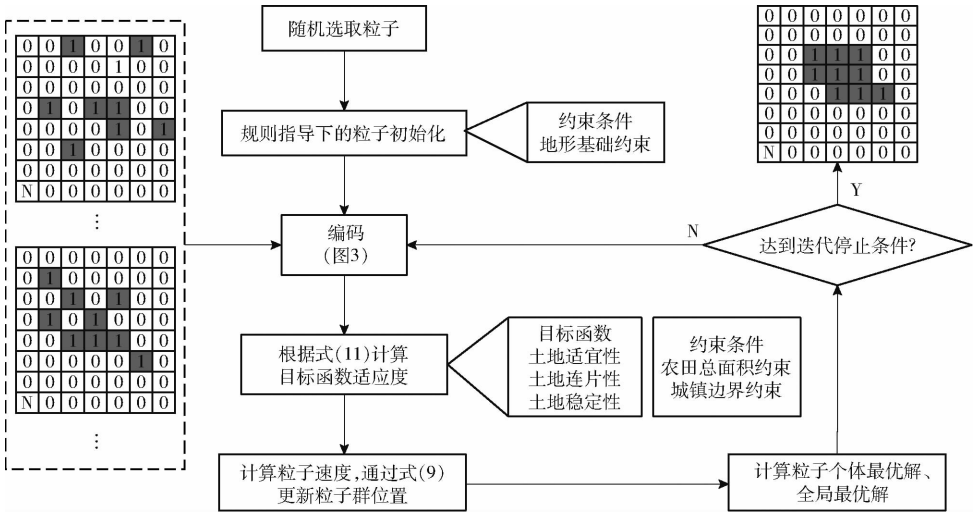

图 4　PSO 模型流程图

Fig. 4　Flowchart of PSO model

域,其中只有耕地单元参与模型的编码、进化过程,其他类型用地单元只作为保护区边界确定的参考单元。

3.2　划定方案对比分析

本模型从土地适宜性、连片性、稳定性 3 方面进行综合考量,对应的权重系数需要提前设定,为探究不同的权重方案对永久基本农田划定结果的影响,本文基于 3 个子目标函数,设定了质量保障型、空间优化型、布局稳定型 3 组优化方案,并分别设置了多组对照实验。

3.2.1　质量保障型方案

质量保障型对比方案中注重对耕地质量的优化,方案 A 将土地适宜性目标权重设为 0.8,其他两个目标函数的权重均为 0.1。永久基本农田应为优质农田,因此适宜性权重不能为 0,设定方案 D 为仅考虑土地适宜性的极端情况,其权重设为 1.00。方案 E 中增加了土地连片性、土地稳定性的权重,为与方案 A 形成对比,将其比例设定为 2∶1∶1。方案 H 同时权衡了 3 个目标,基本平均分配权重系数。权重方案如表 2 所示,其每个子函数的目标函数值的实验运行结果如表 3 所示。

表 2　质量保障型权重组合方案

Tab. 2　Combination scheme of weighting factors for quality assurance type

方案	ρ_1	ρ_2	ρ_3
D	1.00	0	0
A	0.80	0.10	0.10
E	0.50	0.25	0.25
H	0.34	0.33	0.33

从方案 D 可以看出,只考虑土地适宜性目标时,f_s 达到最大值 38 915.8,但土地连片性和土地稳定性指数不高。对比方案 A 与方案 D、E、H,随着连片性、稳定性权重的增加,其对应函数值分别最高增加 16.72% 和 14.20%,而适宜性指数最多降低 12.52%,平均等别由 6.14 降为 6.63。土地适宜性目标会驱动粒子倾向于选择利用等别高的土地单元,与另两个子目标产生矛盾。

表 3　质量保障型不同权重方案下的目标函数值

Tab. 3　Objective function values under different weighting schemes for quality assurance type

方案(对应参数)	f_s	f_l	f_w
D(1.0、0、0)	38 915.8	0.770 6	38 767.47
A(0.8、0.1、0.1)	38 485.3	0.788 5	39 861.17
E(0.5、0.25、0.25)	35 460.5	0.838 3	41 709.38
H(0.34、0.33、0.33)	34 044.2	0.899 5	44 273.32

3.2.2　空间优化型方案

空间优化型对比方案中更注重的是耕地集中连片程度,设定方案 B、F 与方案 H、D 一起比较,具体权重设定如表 4 所示,其每个子目标函数的运行结果如表 5 所示。

表 4　空间优化型权重组合方案

Tab. 4　Combination scheme of weighting factors for space optimized type

方案	ρ_1	ρ_2	ρ_3
B	0.10	0.80	0.10
F	0.25	0.50	0.25
H	0.34	0.33	0.33
D	1.00	0	0

方案 B 是本文设定的空间优化型方案,基本农田布局连片性指数达到 0.963 3。对比方案 B 和方案 F、H,随着适宜性和稳定性权重的增加,其对应的目标函数值分别最多增加 4.07% 和 10%,而连片性指数最多降低 6.62%。连片性目标会引导粒子寻

表 5 空间优化型不同权重方案下的目标函数值

Tab. 5 Objective function values under different weighting schemes for space optimized type

方案(对应参数)	f_s	f_l	f_w
B(0.1、0.8、0.1)	32 712.4	0.963 3	40 378.09
F(0.25、0.5、0.25)	33 484.1	0.917 0	42 010.85
H(0.34、0.33、0.33)	34 044.2	0.899 5	44 273.32
D(1.0、0、0)	38 915.8	0.770 6	38 767.47

找空间集中的区域,但不可避免会划入耕地质量不好或邻近交通城区的土地,导致土地适宜性和耕地稳定性降低。选取研究区中典型区域进行分析(图 5),随着连片性目标权重逐渐增加,该区域也产生了较为明显的集中连片效果。

3.2.3 布局稳定型方案

布局稳定型对比方案主要分析永久基本农田是

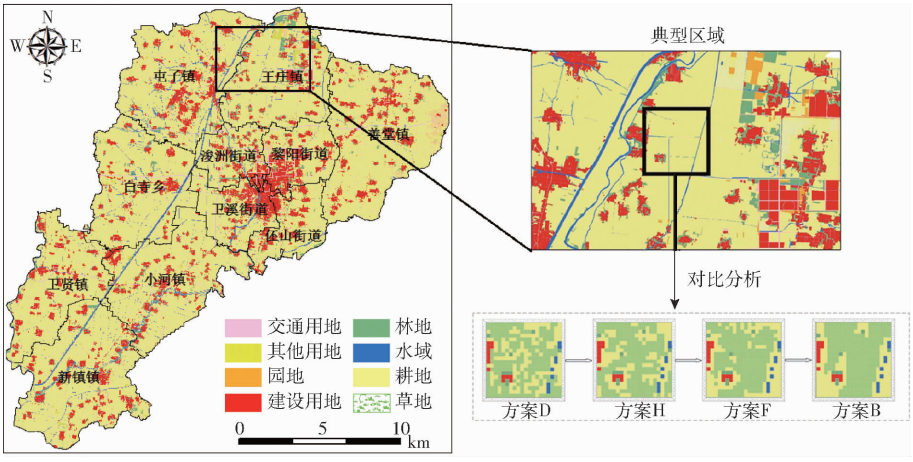

图 5 连片性权重影响的典型区域空间格局变化

Fig. 5 Changes in spatial pattern of typical regions affected by contiguous weights

否能够长期稳定而不被侵占,设定方案 C、G 与方案 H、D 一起比较,具体权重设定如表 6 所示,其每个子函数的目标函数值的运行结果如表 7 所示。

表 6 布局稳定型权重组合方案

Tab. 6 Combination scheme of weighting factors for layout stable type

方案	ρ_1	ρ_2	ρ_3
C	0.10	0.10	0.80
G	0.25	0.25	0.50
H	0.34	0.33	0.33
D	1.00	0.00	0.00

表 7 布局稳定型不同权重方案下的目标函数值

Tab. 7 Objective function values under different weighting schemes for layout stable type

方案	f_s	f_l	f_w
C(0.1、0.1、0.8)	32 832.2	0.793 6	49 025.24
G(0.25、0.25、0.5)	32 708.9	0.846 0	46 622.65
H(0.34、0.33、0.33)	34 044.2	0.899 5	44 273.32
D(1.0、0、0)	38 915.8	0.770 6	38 767.47

方案 C 是本文设定的布局稳定性最佳方案,此时稳定性指数达到了 49 025.24。对比方案 C 和方案 G、H,随着适宜性和连片性权重的增加,其对应目标值分别上涨了 3.69% 和 13.34%,稳定性指数随之下降,最高达到 10%。

稳定性目标引导粒子远离交通发达、城镇人口密集地区,从而避免耕地被侵占使用的可能,但这些地区可能与其他两个目标产生矛盾。稳定性权重的增加,使粒子远离城镇、道路,但这与约束条件中的城镇周边范围约束相互矛盾,产生制约。在研究区中分别选取城镇周边、主要交通道路周边两组典型区域(图 6),从方案 D、H、G、C 的结果可以看出,当稳定性权重较小时,粒子空间飞行较为依赖土地质量,又因城镇边界限制,入选农田多聚集在城镇、道路周围,随着稳定性权重逐渐增加,入选区域逐渐远离城镇和道路,产生远离城镇交通、降低侵占可能性的效果。

综上分析,不同的权重组合产生的适应度值差异较为明显,反映了永久基本农田划定的 3 个目标函数之间相互制约,决策时可以根据需求权衡调配系数以得到适合的结果。

3.3 浚县永久基本农田划定结果

本研究选择综合性权重方案 H(0.34、0.33、0.33)永久基本农田划定方案结果进行分析,利用本模型得到如图 7 所示的浚县永久基本农田划定空间方案。

由于粒子群优化算法在搜索解空间时具有随机性,这会让粒子在空间上的分布较为分散,在引入约束条件和考虑连片性、稳定性目标后,最终的划定方案仍存在部分不理想的空间区域。在质量保障方面,因为土地适宜性目标函数的引导,划定的永久基本农田对高等别的农田有一定的趋近性,国家利用

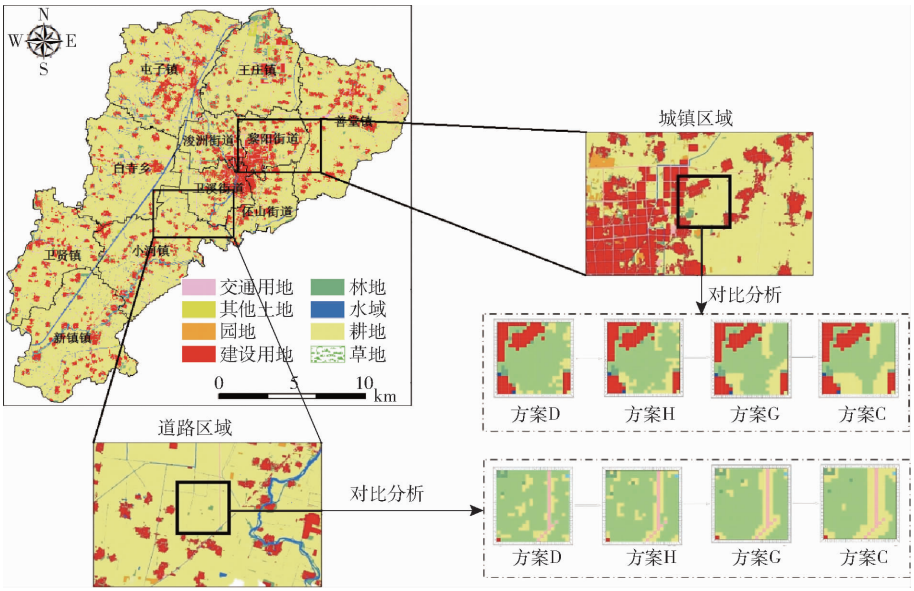

图 6　稳定性权重影响的典型区域空间格局变化

Fig. 6　Changes in spatial pattern of typical regions affected by stability weights

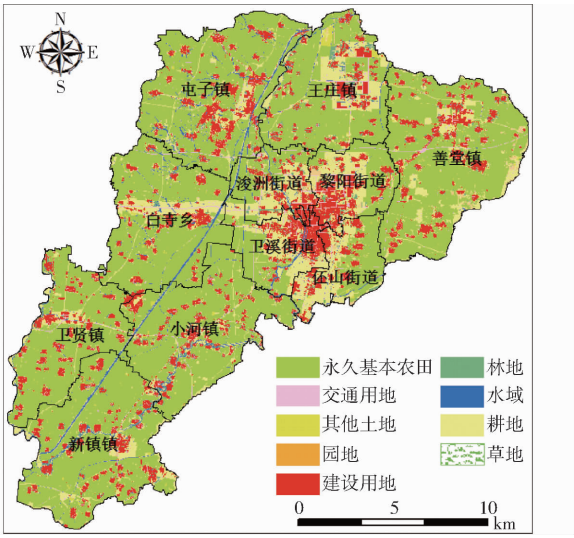

图 7　浚县永久基本农田空间布局图

Fig. 7　Spatial scenario of permanent basic farmland protection area for Xun County

等别为 5 等的耕地以及 6 等耕地几乎都被划入永久基本农田中。在空间连片方面，研究区域四周以及邻近城镇、交通要道的区域集中连片性较差，这些区域的耕地多为碎片状态，互不相连，未被划入永久基本农田中，但总体空间连片程度较为理想。在布局稳定方面，土地稳定性的划定目标与约束条件(4)产生一定冲突，城镇发展边界以及主干交通道路 1.5 km 缓冲范围内优质耕地划入永久基本农田的比例达到 86% 以上，但在该范围线以外出现了明显的永久基本农田空白区，说明模型在稳定性目标函数的引导下使部分基本农田避开了乡镇中心以及主干道，在一定程度上起到控制城镇化进一步扩张的作用。该方案在保证永久基本农田耕地质量的基础上，也保证了保护区的连片程度和长期稳定性。

根据实验结果，统计各乡镇选入的永久基本农田面积及其对应等级，如表 8 所示。其中，永久基本农田面积最大的是善堂镇、屯子镇和新镇镇，面积均高于 8 000 hm^2，这 3 个镇均地势平坦，土地平整，耕地聚集连片，但灌溉设施不足，交通略闭塞，且善堂镇和新镇镇部分耕地耕作距离较远，耕地质量较低。卫贤镇也缺少灌溉设施，且防护较差，城关镇是浚县县政府所在地，四周被黎阳镇包围，是全县政治中心、经济核心，人口大量流入，城镇扩张速度快且交通道路横纵交错，没有耕地入选永久基本农田。最

表 8　浚县各乡镇永久基本农田划定结果

Tab. 8　Delimitation results of permanent basic farmland in each township of Xun County

行政区		耕地面积/hm^2			平均
代码	名称	水浇地	旱地	小计	等级
410621100	城关镇	0	0	0	
410621101	善堂镇	10 797.49	0	10 797.49	7.13
410621102	屯子镇	8 757.84	334.16	9 092.00	6.73
410621104	新镇镇	8 873.71	2.92	8 876.63	6.03
410621105	小河镇	7 701.26	0	7 701.26	5.93
410621106	黎阳镇	3 519.24	0	3 519.24	6.68
410621107	卫贤镇	6 027.56	8.03	6 035.59	5.88
410621200	王庄乡	5 804.17	2.92	5 807.09	6.21
410621201	白寺乡	8 307.58	60.95	8 368.53	6.28
410621203	黎阳镇政府(镇)	0	0	0	
410621204	浚县林场(镇)	0	0	0	
410621205	善堂乡林场(镇)	0	0	0	
410621206	浚县农场(镇)	17.94	0	17.94	8.00
410621208	原林场六队(镇)	14.95	0	14.95	8.00
410621209	原林场六队(镇)	43.03	0	43.03	6.00
合计		59 864.77	408.98	60 273.75	6.40

终划定结果实现了浚县永久基本农田面积60 246.67 hm^2的保护目标。

4 结论

(1)构建了基于粒子群优化算法的永久基本农田划定模型,方案对比分析结果表明,土地适宜性、土地连片性、土地稳定性目标之间会产生冲突,任一子目标值的提升都是以降低另两个子目标值为代价,可以根据具体的决策目标对相应权重进行调配以得到更加满意的划定方案。

(2)随着实验中连片性、稳定性对应权重的提高,连片性目标会引导粒子寻找空间集中的区域,逐渐产生较为明显的集中连片效果,稳定性目标使得入选区域由城镇周边逐渐变得远离城镇和道路,降低城镇再次扩张产生侵占的可能性。

(3)PSO 算法解决多目标问题的空间搜索能力和全局优化能力较强,减少人工干预。同时利用 Arcgis 10.2 将不同方案的空间优化结果形式化表达,便于对比分析,提高工作效率,具有很强的可操作性,为永久基本农田划定成果及其质量提供了有利保障。

参 考 文 献

[1] 吴宇哲,许智钇. 休养生息制度背景下的耕地保护转型研究[J]. 资源科学,2019,41(1):9-22.
WU Yuzhe, XU Zhiwei. Study on the transformation of cultivated land protection under the background of rehabilitation and restraint system[J]. Resources Science, 2019, 41(1):9-22. (in Chinese)

[2] LI X, YEH A. Zoning land for agricultural protection by the integration of remote sensing, GIS, and cellular automata[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(4):471-477.

[3] 姜广辉,张瑞娟,张翠玉,等. 基于空间集聚格局和边界修正的基本农田保护区划定方法[J]. 农业工程学报,2015,31(23):222-229.
JIANG Guanghui, ZHANG Ruijuan, ZHANG Cuiyu, et al. Approach of land use zone for capital farmland protection based on spatial agglomeration pattern and boundaries modification[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 222-229. (in Chinese)

[4] 杨绪红,金晓斌,贾培宏,等. 多规合一视角下县域永久基本农田划定方法与实证研究[J]. 农业工程学报,2019,35(2):258-267.
YANG Xuhong, JIN Xiaobin, JIA Peihong, et al. Demarcation method and empirical study of permanent basic farmland in county area from the perspective of multi-regulation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 258-267. (in Chinese)

[5] 曾吉彬,邵景安,魏朝富,等. 西南山地丘陵区永久性基本农田的多目标决策划定方法[J]. 农业工程学报,2014,30(16):263-274.
ZENG Jibin, SHAO Jing'an, WEI Chaofu, et al. Delimitation of permanent basic farmland in mountain and hill areas in Southwest China based on multiple-objective decision model[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16):263-274. (in Chinese)

[6] 刘彦文,刘成武,何宗宜,等. 基于像元尺度耕地质量局部空间自相关的基本农田划定[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):267-275,326.
LIU Yanwen, LIU Chengwu, HE Zongyi, et al. Basic farmland delineation based on local spatial autocorrelation of cultivated land quality based on pixel scale[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 267-275,326. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190530&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.030. (in Chinese)

[7] 张雅芹,闫弘文,赵贤锋,等. 半岛丘陵区城市周边永久基本农田划定研究——以山东省海阳市为例[J]. 中国生态农业学报,2018, 26(7): 1080-1088.
ZHANG Yaqin, YAN Hongwen, ZHAO Xianfeng, et al. Study on the definition of permanent basic farmland around the city in the hilly area of the peninsula—taking Haiyang City, Shandong Province as an example[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(7): 1080-1088. (in Chinese)

[8] 董秀茹,尤明英,王秋兵. 基于土地评价的基本农田划定方法[J]. 农业工程学报,2011,27(4):336-339.
DONG Xiuru, YOU Mingying, WANG Qiubing. Demarcating method of prime farmland based on land evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4):336-339. (in Chinese)

[9] 董光龙,赵轩,刘金花,等. 基于耕地质量评价与空间集聚特征的基本农田划定研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 133-142.
DONG Guanglong, ZHAO Xuan, LIU Jinhua, et al. Prime cropland assignment based on cultivated land quality evaluation and spatial cluster pattern[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):133-142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2002015&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.015. (in Chinese)

[10] 任艳敏,孙九林,刘玉,等. 县域永久基本农田划定方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):135-141.
REN Yanmin, SUN Jiulin, LIU Yu, et al. Delineation method of permanent basic farmland on county scale[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):135-141. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170417&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.017. (in Chinese)

[11] 胡飞,柯新利,柴明,等. 权衡城市扩张与永久基本农田保护的城市增长边界划定——以武汉市为例[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(3):72-77.
HU Fei, KE Xinli, CHAI Ming, et al. Delimitation of urban growth boundary for urban expansion and permanent basic farmland protection: a case study of Wuhan City[J]. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(3): 72-77. (in Chinese)

[12] 关小东,何建华. 基于贝叶斯网络的基本农田划定方法[J]. 自然资源学报,2016,31(6):1061-1072.
GUAN Xiaodong, HE Jianhua. Basic farmland delineation method based on Bayesian network[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(6):1061-1072. (in Chinese)

[13] 杨建宇,张欣,徐凡,等. 基于 TOPSIS 和局部空间自相关的永久基本农田划定方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):172-180.
YANG Jianyu, ZHANG Xin, XU Fan, et al. Designation method of permanent basic farmland delineation based on TOPSIS and local spatial autocorrelation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 172-180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180420&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.020. (in Chinese)

(下转第 171 页)