

Optimized Allocation of Land Resource Based on MAS and PSO Model

Rongbao Zheng^{1,2*}, Meizhao Chen³, Yaqi Zhang³

¹The open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Land and Resources, Shenzhen Guangdong

²College of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

³School of Politics and Public Administration, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou Guangdong
Email: zhengrongbao@gdut.edu.cn

Received: Apr. 8th, 2018; accepted: Apr. 21st, 2018; published: Apr. 28th, 2018

Abstract

The optimal allocation of land resources is very important to achieve sustainable utilization of land resources, but it is very difficult to realize the harmonization of multi-interest between different subjects. This paper takes the maximization of social, economic and ecological benefits as the goal, and adopts the method of multi-agent system (MAS) and particle swarm optimization (PSO), comprehensively considers the interrelationship between agents, and obtains a number of land resources optimization configuration program, and a comprehensive evaluation of different projects. Results show that: 1) The combination of MAS and PSO can be used to allocate different land use types into different spatial units in the multi-objective constraints in the planning period, so as to realize the optimal allocation of regional land resources. 2) Gray-related method and gray multi-objective decision making method are used to evaluate the different projects, and results show that scheme 2 is most valuable solution, and its value reaches 0.951, so it has been proved to be the optimal scheme.

Keywords

Land Resource, Optimized Allocation, Multi-Agent System, Particle Swarm Optimization, Huangpu District

基于MAS与PSO算法的土地资源决策优化配置研究

郑荣宝^{1,2*}, 陈美招³, 张雅琪³

¹国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室, 广东 深圳

*通讯作者。

²广东工业大学管理学院, 广东 广州

³广东外语外贸大学政治与公共管理学院, 广东 广州

Email: zhengrongbao@gdut.edu.cn

收稿日期: 2018年4月8日; 录用日期: 2018年4月21日; 发布日期: 2018年4月28日

摘要

土地资源优化配置对实现土地资源可持续利用具有重要意义, 其难点是实现不同主体之间利益间的协调统一。本文以社会、经济和生态效益最大化为目标, 采取多智能体系统(MAS)与微粒群算法(PSO)相结合方法, 综合考量智能体之间的相互关系, 得出多个土地资源优化配置方案, 并对不同方案进行了综合评价。研究表明: 1) MAS与PSO相结合的方法能够将规划期内的不同土地利用类型以多目标约束的方式配置到不同的空间单元格中, 从而实现区域土地资源的空间优化配置; 2) 采用灰色关联投影法与灰色多目标决策进行优化方案选择, 其中方案2的投影值最大, 达到0.951, 结果证明其为最优方案。

关键词

土地资源, 优化配置, 多智能体系统, 微粒群算法, 黄埔区

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

如何实现土地资源优化配置已经成为土地科学研究的热点与重点内容[1], 其研究的主要目的是通过一定的科学技术手段, 在不同尺度上合理安排各类土地利用布局与结构, 以提高土地利用效益[2]。上世纪90年代以来, 国内外众多学者从不同侧面对土地资源优化配置开展了深入研究, 如 Wang Xinhao 等基于 GIS 技术实现了流域尺度上的土地资源优化配置[3]; Fuhu Ren 等耦合了 GIWIN-LRA 模型, 在土地适宜性评价的基础上对土地资源优化配置进行研究[4]; Jerry M. Faris 构建 ULAM 模型、Chuvieco 运用线性规划模型实现了土地利用结构的优化配置[5][6]; 周宗丽等人基于线性规划模型实现了农业用地的优化配置[7]; 柯新利等人建立了基于粮食安全模型的多种土地资源优化配置方案[8]; 魏伟等人以干旱区内陆河流域为例, 建立了基于 CLUE-S 模型的土地利用优化配置分区方法[9]; 黎夏、刘小平、杨青生等人将 CA 模型与神经网络、多智能体系统、蚁群算法等相结合模拟预测城市用地扩展过程, 以实现土地资源的时空配置[10]-[15]。从相关研究看, 多数学者将人工智能、数理统计与 GIS 相结合以构建土地资源时空配置优化决策模型, 取得了一定的研究成果, 但较少将土地利用优化配置与区域土地利用总体规划相结合, 难以获得土地利用规划约束指标下的最优布局方案, 从而确保土地资源可持续利用。本文以经济快速发展地区广州市黄埔区为例, 探讨不同限制条件下土地资源时空配置的技术与方法, 为区域土地资源合理利用提供政策建议。

2. 思路与方法

2.1. 典型样区选择——广东省广州市黄埔区为例

广州市新黄埔区地处广州市中部, 位于珠三角洲中心地区, 介于东经 113°23'29"~113°36'2", 北纬

23°1'57"~23°24'57"，东西宽约 17.4 km，南北长 13.5 km，其中陆地面积占全区总面积的 77%，水域面积约为 23%。它是新一轮对外开放“一带一路”重点发展区域，“三大战略枢纽”关键枢纽，“一江两岸三带”宜居城市建设重叠区域，是粤中向粤东、粤北辐射的过渡地域。

2.2. 研究思路

以土地利用总体规划主要参数为参考标准，以经济、社会和生态效益最大化为目标，以参与土地利用优化配置的主要主体为研究对象，定义多智能体土地利用优化配置过程中行为主体决策，最后将多智能体系统(Multi-Agent System, 简称 MAS)与微粒群算法(Particle Swarm Optimization, 简称 PSO)相结合，以帕累托验证寻求模型最优解，从而实现土地利用时间与空间上的优化配置。

2.3. 土地利用优化模型

2.3.1. 变量设定

模型中，首先将黄埔区的 2015 年土地利用现状图合并为 k 种土地利用类型，并分割为 $N \times M$ 个 10×10 m 大小的单元，各土地利用类型面积用 S_k 表示， k 为土地利用类型代码。

2.3.2. 目标函数

1) 经济效益。主要通过实现各类土地利用在经济方面以低成本高收益为主的优化配置。因此，选取土地利用经济总产出最大化区域和最小化区域所转化的成本作为经济效益优化目标结果。

$$MaxF_1 = \sum_{k=1}^k W_k S_k \tag{1}$$

式中： F_1 代表区域经济总产出， W_k 为各种土地利用类型经济产出系数。

$$MinF_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^k C_{ijk} X_{ijk} \tag{2}$$

式中， F_2 表示土地利用转换总成本； C_{ijk} 为土地利用单元 (i, j) 位置上土地利用类型 k 的成本输出； X_{ijk} 为二值变量，即空间单元 (i, j) 的土地利用类型为 k 时，其值为 1 或 0。

2) 社会效益。是指为社会发展所提供的社会保障服务，本文以社会基本保障功能作为社会效益目标优化的结果。

$$MaxF_3 = \sum_{k=1}^k G_k S_k \tag{3}$$

式中： F_3 为区域社会功能保障的总值； G_k 代表土地利用类型 k 单位面积提供社会功能保障的价值系数。

3) 生态效益。指土地利用优化配置对生态环境友好度和生态服务功能的影响。因而，该目标以对生态环境的兼容性和对生态系统的服务功能的总价值为优化对象。

$$MaxF_4 = \sum_{k=1}^k P_k S_k \tag{4}$$

式中， F_4 为土地利用对生态系统功能总值； P_k 为某一土地利用类型 k 在单位面积上的生态服务功能价值系数值。

$$MinF_5 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^k \sum_{i'=1}^N \sum_{j'=1}^M \sum_{k'=1}^k L_{ij,i'j'} H_{k,k'} \tag{5}$$

式中， F_5 为区域生态环境与土地利用兼容性的总和； $L_{ij,i'j'}$ 为二值变量，即空间单元与 $(i', j')(i, j)$ 之间

存在邻接,其值为 1 或 0。 $H_{k,k'}$ 为土地利用类型 k 空间单元与 $k'k'$ 空间单元 (i', j') 之间的生态环境兼容性。

2.3.3. 约束条件

约束条件为实现设定目标函数所需的限制因素, 本文主要从以下方面进行设定:

1) 人口总量是土地承载总人口不应该超过国家规定预期人口数量:

$$M_1 S_f + M_2 S_u \leq P \quad (6)$$

式中, M_1 为农用地的人口密度; M_2 为城市建设用地人口密度; S_f 表示农用地面积; P 为未来规划区域人口总数。

2) 土地面积为各种土地利用类型面积之和为研究区域总面积:

$$\sum_{k=1}^K S_k = S \quad (7)$$

式中, S 为研究区域总面积。

3) 劳动力资源为不同土地利用类型从事相关职业的劳动力数量:

$$\sum l_{ak} S_k \leq L_a \quad (8)$$

$$\sum l_{ck} S_k \leq L_c \quad (9)$$

式中, l_{ak} 表示第 k 种农业用地单位面积所承载劳动力数量; l_{ck} 表示第 k 种非农业用地单位面积所承载劳动力数量; L_a 表示从事农业的劳动力数量; L_c 从事非农业的劳动力数量。

4) 粮食安全

$$S_g f_2 f_3 f_4 \geq P f_0 f_1 \quad (10)$$

式中, S_g 表示可以确保期限内粮食安全的耕地需求面积; f_0 表示规定人均食用粮食的标准; f_1 表示研究区域粮食自给率; f_2 表示研究区域粮食单位面积产量; f_3 表示研究区域粮食作物占全部种植农作物比重; f_4 表示研究区域复种指数。

5) 生态环境

$$S_e \cdot c \geq S \cdot r S_e \cdot c \geq S \cdot r \quad (11)$$

式中, S_e 表示土地利用规划期林地面积; c 表示林地面积转换的系数; r 表示规划期内确保的森林覆盖面积。

6) 市场经济

$$S_{k1} \geq S_{k0} \quad (12)$$

$$S_{w1} \geq S_{w0} \quad (13)$$

式中, S_{k1} 表示城镇建设用地、工矿用地、交通设施用地等在土地利用规划期末的面积; S_{k0} 表示上述类型土地在土地利用规划基期的面积; S_{w1} 表示研究区域土地利用规划末期末利用土地面积; S_{w0} 表示研究区域土地利用规划基期末利用土地面积。

7) 土地利用公平性

a) 土地利用规划期末的各类土地生态能力总和不得低于基期:

$$(EP_0^k - EP_C^k) \times (P_k) \geq EP_0^k \quad (14)$$

式中, EP_0^k 表示农用地类型 k 在土地利用规划基期的生态生产力; EP_C^k 表示农用地类型 k 在土地利用规

划期内最大能承受的生态产出损失； P_k 表示农用地类型 k 的生态产出系数。

b) 耕地非农化时序约束条件：

$$\sum_{t=1}^n q_t = Q \tag{15}$$

式中， q_t 表示在土地利用规划期内 t 时间点耕地非农化面积； Q 表示在土地利用规划期限内允许耕地非农化面积。

8) 空间布局

a) 空间单元所含至少一种土地类型：

$$\sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \tag{16}$$

b) 新增建设用地在空间扩展时的紧凑性：

$$\sum_{i,j \in \Omega} B_{ijk} \geq 2 \tag{17}$$

式中， B_{ijk} 表示为二值变量，即空间单元 (i, j) 为建设用地时，其值为 1 或 0； Ω 空间单元 (i, j) 存在邻接的集合，确保新增建设用地空间单元 (i, j) 相邻的单元建设用地空间单元不少于 2，从而避免建设用地的无限扩展[16]。

2.4. 多智能体及决策行为

土地资源优化配置的核心主体具有明显的层次性，第一层次是对土地配置起宏观主导作用的上级政府，第二层次是对土地配置进行合理引导的地方政府，第三层次为各土地利用实际主体，三者之间的决策行为具有承上启下的作用。

2.4.1. 上级政府 Agent (Agent₁) 决策

Agent₁ 依据国家政策和区域总体发展目标，凝练区域土地利用战略，并在土地利用规划中分解各项规划指标的限制性因子。本文采用层次分析法对各因子依次赋予权重，并进行多因素综合分析模型，确定 112 个行政村(社区)占黄埔区的比例，并依据(公式 19)确定各行政村的指标。

$$F_j = \sum W_{ys} \sum W_{yz} \times M_{ij} \tag{18}$$

式中， F_j 表示第 j 个行政村(社区)指标分值； W_{ys} 和 W_{yz} 表示每个因子的权重； M_{ij} 表示每个因子的标准化数值。

$$ZB_j = F_j \times ZB_{sum} \tag{19}$$

式中， ZB_j 表示第 j 个行政村(社区)指标； F_j 表示行政村(社区)指标分值； ZB_{sum} 表示全区的总指标。

2.4.2. 地方政府 Agent (Agent₂) 决策

借鉴美国学者约翰逊提出的“生态位”的思想，将 Agent₂ 所组织的黄埔区不同土地利用类型对各种资源的需求构成 n 维资源空间，公式如下：

$$ES = \left(\prod_{k=1}^n ES_k \right)^{1/n} \tag{20}$$

式中， ES 表示不同类型土地利用在多维资源结构中的生态适宜水平； ES_k 表示资源中某一种资源生态适宜水平； n 表示资源空间的维数。

通过地方政府 $Agent_2$ 的发展目标可以计算不同维度的资源需求类型，而后根据不同的发展目标，确定生态因子适宜水平 ES_k ，最后依照生态适宜水平单元评价结果为基础，以适宜水平最高值所对应土地类型为标准，结合黄埔区实际划分的土地利用功能区，并划定出不同功能区中相应的土地主导类型和空间管制规则。

2.4.3. 利用主体 $Agent_3$ 决策

该决策从土地利用主体之间的合作与竞争为基础，采用微粒群优化算法(PSO)设定使用主体 $Agent_u$ 的领域，但不能与其他领域中的 $Agent_u$ 产生合作与竞争的操作，需要与适应能力最强的 $Agent_u$ 在群体中实现信息共享，因而需设计 $Agent_u$ 三种算子实现空间决策，其中包括合作与竞争、自学习和适应性算子，而所有的 $Agent_u$ 均分布在 $N \times M$ 的土地利用网格上。

1) $Agent_u$ 合作与竞争算子

为确保 $Agent_u$ 在模型中的交互性和自治性以及空间检索能力，实现 $Agent_u$ 顺畅的信息交流。本文结合 PSO 算法的全局空间检索能力，设计 $Agent_u$ 合作与竞争算子，以完成 $Agent_u$ 在空间上的决策。

区域土地利用优化配置模型将每个解都看成为一个 n 维空间中粒子。 $L_{i,j}$ 的空间解表示的土地空间优化配置的位置向量表示为 $L_{i,j} = (L_{i,j,1}, L_{i,j,2}, \dots, L_{i,j,n})$ ，其中， $L_{i,j,1}, L_{i,j,2}, \dots, L_{i,j,n}$ 代表 $L_{i,j}$ 对目标的决策偏好，因 $Agent_u$ 具有适应性，因而随着模型的变化，产生迭代变化，从而推进模型趋向于最优化。 $L_{i,j}$ 粒子的飞行速度 $V_{i,j} = (v_{i,j,1}, v_{i,j,2}, \dots, v_{i,j,n})$ 。在众多适应度中 $M_{i,j}$ 为 $Agent_u$ 所拥有的最大适应度，记作。 $P_m P_m$ 表示领域间竞争概率， P_c 表示领域间合作概率， $U(0,1)$ 表示均匀分布的随机常数。当 $U(0,1) < P_m$ ，则模型执行竞争算子；当 $U(0,1) < P_c$ ，则模型执行合作算子。

a) 竞争算子。当 $L_{i,j}$ 满足公式 21 时，其空间解的位置不变，否则 $L_{i,j}$ 的空间解的位置将按照公式 22 进行修正，且当 $L_{i,j}$ 所在网格的土地类型将调整的与 $M_{i,j}$ 保持一致。

$$Fit(L_{i,j})^* \geq Fit(M_{i,j})^* \quad (21)$$

$$l_{i,j,k} = m_{i,j,k} + rand(-1,1) \cdot (m_{i,j,k} - l_{i,j,k}), k=1, \dots, n \quad (22)$$

式中， $rand(-1,1)$ 表示为 $(-1,1)$ 之间的随机常数量。当 $l_{i,j,k} < x_{k \min}$ ，则 $l_{i,j,k} = x_{k \min}$ ；当 $l_{i,j,k} > x_{k \min}$ ，则。

$x_{\min} = (x_{1 \min}, x_{2 \min}, \dots, x_{n \min})$ $x_{\min} = (x_{1 \min}, x_{2 \min}, \dots, x_{n \min})$ 表示优化解的可行空间下限，

$x_{\max} = (x_{1 \max}, x_{2 \max}, \dots, x_{n \max})$ 表示可行解上限。

b) 合作算子。在 $M_{i,j}$ 和 $L_{i,j}$ 选择随机交叉点，并将交叉点后半部分进行交换，同时在交叉点处进行交叉，从而获得新的 Agent。假设 $M_{i,j}$ 和 $L_{i,j}$ 在 k 点进行交叉，而后所产生的两个 Agent 分支则为：

$$M'_{i,j} = (m_{i,j,1}, m_{i,j,2}, \dots, m'_{i,j,k}, l_{i,j,k+1}, l_{i,j,k+2}, \dots, l_{i,j,n}) \quad (23)$$

$$L'_{i,j} = (l_{i,j,1}, l_{i,j,2}, \dots, l'_{i,j,k}, m_{i,j,k+1}, m_{i,j,k+2}, \dots, m_{i,j,n}) \quad (24)$$

式中， $M'_{i,j} = m_{i,j,k} + \beta(l_{i,j,k} - m_{i,j,k})$ ， $l'_{i,j,k} = v_{i,j,k} + \beta(u_{i,j,k} - v_{i,j,k})$ ， $u_{i,j,k}$ 和 $v_{i,j,k}$ 为 $l_{i,j,k}$ 的取值范围， β 为 $[0,1]$ 之间的随机常数。

在迭代过程中，但用公式 25 和公式 26 对 $Agent_u$ 的空间解和速度的位置进行不断更新：

$$v_{i,j,k}^{d+1} = w \cdot v_{i,j,k}^d + \phi_1 \cdot rand() \cdot (P_{i,j,n} - l_{i,j,n}^d) + \phi_2 \cdot rand() \cdot (G_{i,j,n} - l_{i,j,n}^d) \quad (25)$$

$$l_{i,j,n}^{d+1} = l_{i,j,n}^d + v_{i,j,n}^d \quad (26)$$

式中， d 为模型迭代次数， w 表示为惯性常数， ϕ_1 和 ϕ_2 表示为学习因子，用于调节个体极值点和值点的飞

行步长; $rand()$ 为(0, 1)之间的随机常数。 $l_{i,j,n}^d$ 表示 $L_{i,j}$ 第 d 次迭代时的 n 维分量; $v_{i,j,n}^d$ 表示 $L_{i,j}$ 第 d 次迭代速度 n 维分量; $P_{i,j,n}$ 表示 $L_{i,j}$ 自身寻求最优 Agent 的 n 维分量; $G_{i,j,n}$ 表示模型中最优 Agent 的 n 维分量, 而后通过全局最有交换, 可加快环境中的信息快速传递, 提高 POS 的收敛性。

2) Agent_u 自学性算子

Agent_u 自学性算子主要用于模型中自适应性最强的 Agent_u, 学习检索的半径为小于 5-10 个空间单元 (T), 并以此为中心, 检索产生 $T \times T$ 的单元合集, 进而对 Agent_u 执行竞争和合作算子, 经过不断迭代, 该 Agent_u 的自学性将会进一步提高。

3) Agent_u 适应性算子

区域土地利用优化配置模型中, 通过适应性调整 Agent_u 的适应能力, 而 Agent_u 又可用适应度的数值表示大小, 用 $Z(x)(x=1,2,\dots,n)$, 表示自适应度函数, n 为目标个数; 对于每个不同的目标 x , Agent_u $L_{i,j}(i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M)$ 会通过优劣生成可行解排序 Y , Agent_u 初始自适应度公式如下:

$$F_x(L_{i,j}) = \begin{cases} (N - Y_x(L_{i,j}))^2, Y_x(L_{i,j}) > 1; \\ kN^2, Y_x(L_{i,j}) = 1; \end{cases} \tag{27}$$

$$Fit(L_{i,j}) = \sum_{x=1}^n W_x F_x(L_{i,j}) \tag{28}$$

式中, $Y_x(L_{i,j})$ 表示 $L_{i,j}$ 所有 Agent_u 对目标 i 的优劣排序序号; $F_x(L_{i,j})$ 表示 $L_{i,j}$ 对目标 x 的适应水平; W_x 表示 $L_{i,j}$ 目标 x 的决策偏好; $Fit(L_{i,j})$ 表示 $L_{i,j}$ 对所有目标初始适应水平总和。

在优化配置过程中, $L_{i,j}$ 的适应水平会受时间 t 的空间单元对 K 土地类型的适宜性 $S_{i,j}^K$ 的影响, 周围空间单元对 (i, j) 在时间 t 转化为 K 土地类型的影响 $N_{i,j}^K$, Agent_u 在时间对 $(i, j)(i, j)$ 实行土地引导 $F_{i,j}^K$ 以及随机干扰项 V 的互相影响, 综合考虑上述影响后的 $L_{i,j}$ 自适应性函数如下:

$$Fit(L_{i,j})^* = Fit(L_{i,j}) \cdot S_{i,j}^K \cdot N_{i,j}^K \cdot F_{i,j}^K \cdot V \tag{29}$$

式中, $Fit(L_{i,j})^*$ 为多因素影响 Agent_u $L_{i,j}$ 的自适应性总和。

4) Pareto 寻优策略

在 Agent_u 的空间决策中, 一方面为了提高模型在时序上的动态调节性以确保土地利用状态达到最大功能, 另一方面则为可以提供多种优化配置方案, 满足不同需求下的土地利用状态, 达到因地制宜的效果。本文采用动态 Pareto 寻求最优解以获得最优策略, 同时排除非 Pareto 最优解, 从而保证 Pareto 库中均为最优解。

3. 结果与分析

3.1. 模型简化

3.1.1. 上级政府 Agent₁ 的决策行为选择

根据广州市在规划期内下达的土地利用约束性与预期性指标, 确定黄埔区土地利用优化配置的主要控制指标(表 1), 并将其落实到具体的行政村。

3.1.2. 地方政府 Agent₂ 的决策行为选择

根据 Agent₁ 制定的黄埔区土地利用规划战略目标, 从黄埔区实际情况出发, Agent₂ 当下需要组织的黄埔区土地利用功能主要包含四种类型: 城镇发展结合部、新兴产业园区拓展部、高产农业发展区、原始生态保护区。针对不同类型的发展战略目标, 城镇发展的生态适宜水平、工业类的生态适宜水平、农

业发展生态适宜水平以及生态保护的适宜水平评价因子体系如表 2。

以 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的栅格作为黄埔区生态位适宜水平评价单元, 先将数据进行统一标准化, 然后针对不同土地利用功能所对应的土地需求类型的方法可以得到多个生态位适宜水平值 ES_k , 而后将不同发展战略下的 ES_k 代入公式 20, 从而获得不同土地利用功能土地在不同评价单元生态适宜水平 ES 。初步规划黄埔区土地利用功能区, 再根据黄埔区经济社会发展战略目标、土地资源现状、土地利用政策等以及 Agent_2 下达给各行政村(社区)及各部门的指标进行局部调控, 最终将黄埔区分为 4 种类型的土地利用功能区: 城镇发展区(引导建设区)、新兴产业园区(引导建设区)、高产农业发展区(限制建设区)、原始生态保护区(禁止建设区)(图 1), 分别对应的土地利用类型位: 城镇建设用地、独立工矿用地、农业用地(耕地和园地)、生态用地(林地、水域和未利用地)。

3.1.3. 利用主体 Agent_3 的决策行为选择

根据 2007 年的土地利用分类标准, 将 Agent_3 分为耕地、园地、林地、牧草地、城镇建设用地、农村居民点用地、独立工矿用地、交通运输用地、水利设施用地等 9 大类 Agent , 其中未利用土地没有相对应的土地利用行为, 因而暂不考虑。每一个网格上只能分配唯一土地利用类型, 可容纳的 Agent_3 也只能为一个。在这里 Agent_3 仅能反映的是简单的比例关系, 在本文的实际含义为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的网格上可容纳的实际使用单位或个人的平均值, 将不同类型的 Agent_3 配置在 2015 年土地利用网格上, 随着 Agent_3 之

Table 1. Main indicators of land use optimization allocation in Huangpu (hm^2)

表 1. 黄埔区土地利用优化配置主要控制指标

	指标名称	2020 年	指标属性
总量指标	耕地保有量	2800	约束性
	基本农田面积	2007	约束性
	建设用地总规模	23,506	预期性
	城乡建设用地规模	18,933	约束性
	城镇工矿用地规模	17,410	预期性
增量指标	新增建设用地规模	3964	预期性
	建设占用农用地	3216	预期性
	建设占用耕地	1449	约束性

Table 2. Factors of niche-fitness evaluation for land use function zoning

表 2. 土地利用功能的生态适宜水平因子评价体系

功能类型	评价因子内容
城镇发展的生态适宜水平	①地理环境: 地基条件、坡度、地质灾害; ②区位条件: 距城镇中心距离、人口密度、交通通达度、建设用地密度;
新兴产业园区的生态适宜水平	①地理环境: 地基条件、坡度、地质灾害; ②区位条件: 距已有产业园区距离、交通通达度、建设用地密度、工业产值密度、独立工矿用地密度;
农业发展生态适宜水平	①地质条件: 土壤类型、有机质含量; ②地理环境: 坡度; ③区位条件: 农用地密度、距基本农田保护区距离;
生态保护的适宜水平	①地质条件: 土壤类型; ②区位条件: 距水体距离、林地密度、水体密度; ③生物环境: 多样性; 景观价值; 敏感度。

间的合作、竞争和自学性行为的迭代，将会引起 Agent₃ 的不断变化。

Agent₃ 通过合作、竞争和自学性行为运算进行的空间决策须按照公式 29 计算 Agent₃ 的自适应水平。确定 Agent₀ 模型设定目标的观测值以及、 $'N_{i,j}^k$ 、 $'F_{i,j}^k$ 、 VV 。 $'F_{i,j}^k$ 以 (i,j) 空间单元拟被转化的 k 土地类型与 (i,j) 所在功能区兼容性程度越强， $'F_{i,j}^k$ 数值越大，采用 Delphi Method 求得各种土地利用类型的与功能区的兼容性如表 3。Agent₃ 对目标(1)~(5)的观测值所在的经济产出、转换成本、生态功能服务功能价值、生态环境兼容性和社会保障功能总和得到。

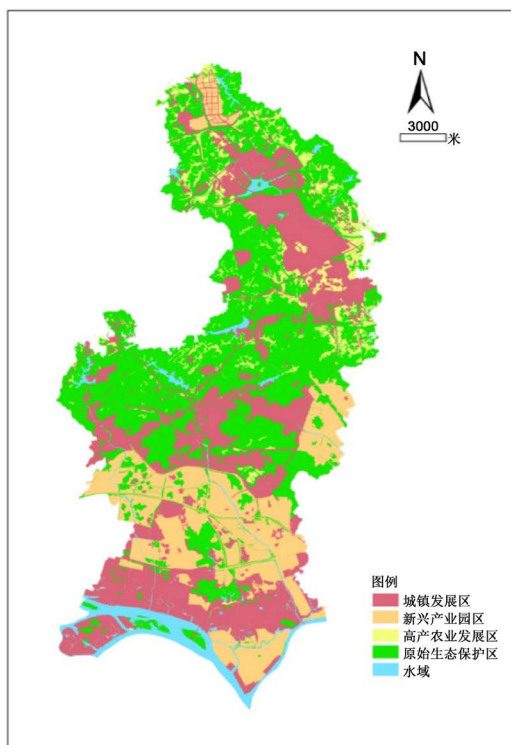


Figure 1. Land use function zones of Huangpu
图 1. 黄埔区土地利用功能分区图

Table 3. Compatibility between land use types and function zones
表 3. 土地利用类型与功能区的兼容性

	城镇发展区	新兴产业园区	高产农业发展区	原始生态保护区
耕地	0.362	0.391	1.000	0.284
园地	0.385	0.363	1.000	0.296
林地	0.336	0.427	0.761	1.000
牧草地	0.291	0.227	1.000	0.254
城镇建设用地	1.000	0.893	0.472	0.079
农村居民点用地	0.438	0.263	0.699	0.176
独立工矿用地	0.674	1.000	0.571	0.036
交通运输用地	1.000	1.000	0.872	0.109
水利设施用地	1.000	1.000	0.893	0.177
水域	1.000	1.000	1.000	1.000
未利用地	1.000	1.000	1.000	1.000

3.2. 结果与分析

经过最终求解，土地利用优化配置模型共获得 6 个帕累托最优解。因而得到黄埔区土地利用优化配置方案共计 6 个，如图 2 和表 4 所示。

为更好的辅助决策规划，根据所建立模型的目标函数设置，严格遵循可操作性、科学性和整体性的原则，选取经济产出、转换成本、生态功能服务功能价值、生态环境相容性、社会保障功能、人均耕地面积、人均建设用地面积、景观聚集水平以及景观平均斑块等 9 个评价指标体系，采用灰色关联投影法

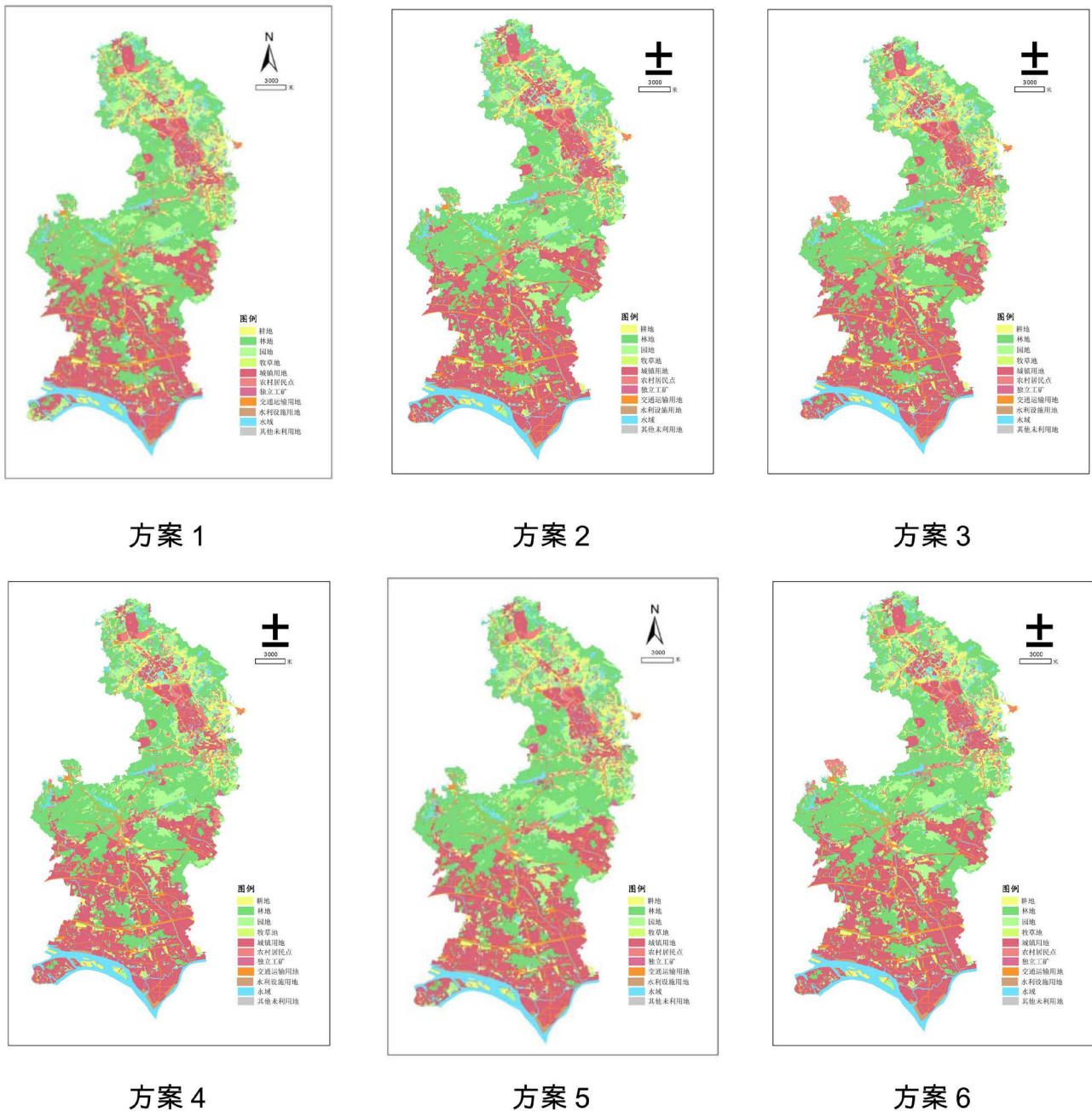


Figure 2. Comparison of spatial patterns of alternative sustainable land use optimization
图 2. 土地利用优化配置方案空间对比

Table 4. Comparison of structures of alternative land use optimization allocation (hm²)
表 4. 土地利用优化配置方案数量结构对比(hm²)

一级地类	二级地类	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
农用地	耕地	2841.76	2797.64	2960.61	2803.22	2834.62	2543.67
	园地	92.44	115.76	101.16	116.68	90.72	90.62
	林地	15,619.6	15,712.55	15,134.92	15,739.48	16,425.64	15,076.72
	牧草地	27.01	26.43	26.69	26.76	27.24	26.52
建设用地	城镇	17,746.79	17,473.69	16,151.74	17,535.26	17,651.38	19,017.43
	农村居民点	2671.19	2598.26	3014.21	2576.53	2642.01	2617.66
	独立工矿	480.77	470.26	481.8	473.68	480.63	479.05
	交通运输用地	2073.58	2375.62	2465.71	2364.19	2174.28	2272.63
	水利设施用地	1601.61	1675.13	1733.93	1627.63	1617.88	1674.26
未利用地	其他未利用地	1576.82	1570.6	2574.6	1532.36	1610.11	1543.67
	水域	3685.43	3601.06	3771.63	3621.21	2862.49	3074.77

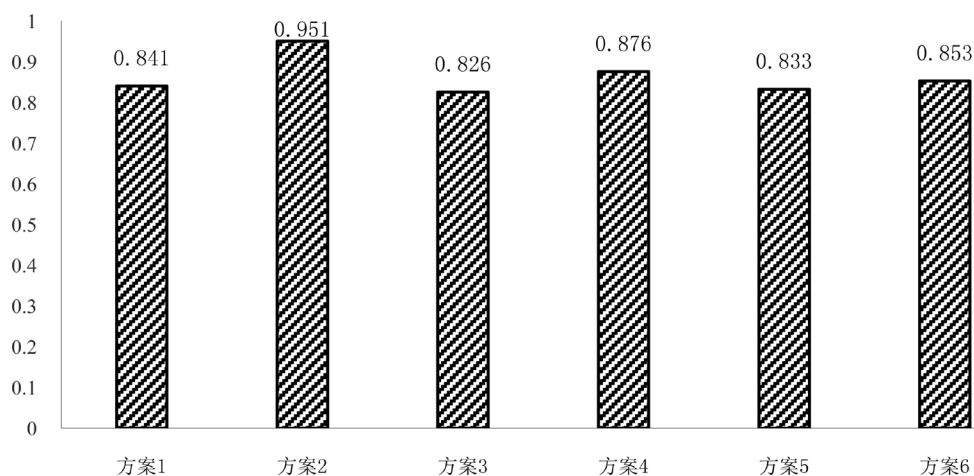


Figure 3. Preferred result of sustainable land use optimization allocation in Huangpu
图 3. 黄埔区土地利用优化配置方案择优结果

优化方案选择，投影值越大，说明模型所得方案与理想方案越接近，在社会、经济和生态效益上的契合度以及产值上就越高。其基本思路是：结合灰色关联投影的方法和原理，构造对比矩阵并对所选指标进行统一标准化，然后采用 SPSS 进行关联度计算与判别矩阵的构建，对指标再次进行正交变换最终构造出理想方案，最后对图 2 和表 4 中的方案进行投影确定最优方案，结果如图 3 所示，从中可以看出，最终优方案排序为：方案 2 > 方案 4 > 方案 6 > 方案 3 > 方案 5 > 方案 1。方案 1 和方案 5 需要配置的建设用地较少，不能满足黄埔区未来经济和社会发展中所需用地，虽然耕地和生态用地较多，满足了区域的生态效益，但忽略了区域经济效益和社会效益；方案 3 绝大多数未利用地被全部转换为耕地且部分低效工业用地通过复垦转变为农用地，城镇建设用地和独立工矿以及交通设施用地配比较小，该方案能够有效保障黄埔区粮食安全，短期内提高了社会效益，但从长远区域经济发展角度来看，耕地过多，对支持经济快速发展的力度较小；方案 6 中，建设用地配置相比较其他方案来说最多，但耕地和林地面积相对较少，能够有效满足社会、经济效益，但忽略了区域生态效益；方案 2 和方案 4 为最接近模

型所构建的黄埔区土地利用规划功能分区。方案 4 中的林地配置较为充沛, 能够满足区域生态效益的发展, 但是耕地保有量未能达到规划中土地利用规划控制标准; 方案 2 中农用地和建设用地数量配置最为合理, 土地利用规划的控制指标达到规划要求, 且空间分布紧凑, 是众多方案中社会、经济和生态效益最大的方案。

方案 2、4、6 的灰色关联的投影均在 0.85 以上, 其中方案 2 的投影值达到 0.951, 非常接近理想值 1, 这说明模型的建立能够实现社会发展可接受、经济发展可满足、环境发展可承载的土地利用格局。为了进一步验证各方案的可行性和科学性, 在公式 1 模型目标和约束条件下结合元胞自动机模型和线性规划对 3 个方案数量和空间进行第二阶段的优化配置, 采用上述灰色关联投影法对上述 3 个较优方案进行最终评价, 方案 2、4、6 的灰色关联投影值依次为 0.697、0.654、0.631, 从而再次印证了方案 2 为最佳方案。

4. 结论与讨论

1) 本文以我国经济快速发展地区广州市黄埔区为例, 以土地利用经济、社会和生态效益最大化为目标, 定义了三个不同类型的智能体, 通过嵌入帕累托最优算法与 POS 优化算法相结合, 构建了不同的土地资源优化配置的决策方案, 结果表明该研究思路是基本可行的, 为区域土地资源优化配置提供了一种新思路, 研究结果可为区域土地资源合理利用提供参考建议。

2) 多智能体系统(MAS)与微粒群算法(PSO)“自下而上”的集群模型在其它领域的应用已日趋成熟, 该模型的关键是如何准确地获得各 Agents 的决策行为及规则, 并通过量化方法进行表达, 如果准确确定公式中的参数非常困难, 需要开展更多的实验论证。

3) 土地资源的优化配置是一项系统工程, 其配置的合理与否关键是要实现社会、经济和生态效益等综合效益的最大化, 本文的研究思路中, 对社会与经济因素考虑的较多, 对环境因素, 如地形、河流等考虑较少, 对模型运行的多种方案的综合比较可能还不够合理, 今后还需要对研究思路与方法作进一步的改进以提高其运行精度。

基金项目

国家自然科学基金项目(批准号: 41001054); 教育部人文社会科学(批准号: 13YJJCZH016、13YJA840009、14YJA630053); 国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室开放基金资助课题(批准号: KF-2016-02-003)项目资助。

参考文献

- [1] 郑荣宝, 董玉祥, 陈梅英. 基于 GEOM 与 CA+ANN 模型的土地资源优化配置与模拟[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 1-13.
- [2] Benabdallah, S. and Wright, J.R. (1992) Multiple Subregion Allocation Models. *Journal of Urban Planning and Development*, **118**, 24-40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(1992\)118:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(1992)118:1(24))
- [3] Wang, X.H., Yu, S. and Huang, G.H. (2004) Land Allocation Based on Integrated GIS-Optimization Modeling at a Watershed Level. *Landscape and Urban Planning*, **66**, 61-74. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00095-1)
- [4] Ren, F.H. (1997) A Training Model for GIS Application in Land Resource Allocation. *ISPRS Photogrammetry and Remote Sensing*, **2**, 261-265. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(97\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(97)00021-X)
- [5] Faris, J.M. (1999) Geography Information System (GIS) and Urban Land Use Allocation Model. *Land Use and Policy*, **3**, 121-126.
- [6] Chuvieco, E. (1993) Integration of Linear Programming and GIS for Land Use Modeling. *International Journal of Geographical Information System*, **7**, 71-83. <https://doi.org/10.1080/02693799308901940>
- [7] 周宗丽, 宁大同, 杨志峰. 三峡库区秭归县土地资源优化配置[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 1999, 35(4): 536-541.

- [8] 柯新利, 孟芬, 马才学. 基于粮食安全与经济发展区域差异的土地资源优化配置——以武汉城市圈为例[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1572-1578.
- [9] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 等. 基于生态安全格局的干旱内陆河流域土地利用优化配置分区[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 9-17.
- [10] 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[J]. 地理研究, 2005, 24(1):19-27.
- [11] 黎夏, 叶嘉安. 基于元胞自动机的城市发展密度模拟[J]. 地理科学, 2006, 26(2): 165-172.
- [12] 黎夏, 叶嘉安, 刘涛, 等. 元胞自动机在城市模拟中的误差传递与不确定性的特征分析[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 443-451.
- [13] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 基于多智能体的居住区位空间选择模型[J]. 地理学报, 2010, 65(6): 695-707.
- [14] 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J]. 地理学报, 2006, 61(10): 1101-1111.
- [15] 黎夏, 刘小平, 何晋强, 等. 基于耦合的地理模拟优化系统[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 1009-1018.
- [16] 刘静怡. 区域土地可持续利用优化方法与规划支持研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015: 100-104.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7311, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mm@hanspub.org