

引用格式:王越, 宋戈, 吕冰. 基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 729-739.  
[Wang Y, Song G, Lv B. Optimization of land-use pattern based on multi-agent particle swarm optimization in the Song-Nen Plain region[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 729-739.] DOI: 10.18402/resci.2019.04.10

# 基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化

王越<sup>1</sup>, 宋戈<sup>2</sup>, 吕冰<sup>1</sup>

(1. 沈阳师范大学管理学院, 沈阳 110034; 2. 东北大学土地管理研究所, 沈阳 110169)

**摘要:**土地利用格局优化是实现土地资源合理配置的重要方式。本文以松嫩平原典型区域巴彦县为研究区, 运用GIS和RS技术, 采用Matlab编程, 结合多智能体(MA)和粒子群算法(PSO), 建立土地利用格局优化模型, 以粮食生产、生态安全和社会经济发展为优化目标, 设计政府、职能部门和个体三类智能体(Agent), 并结合研究区土地利用格局优化目标的决策偏好确定其优化方案。结果表明:①基于多智能体改进粒子群优化算法建立土地利用格局优化模型, 实现了研究区土地利用类型数量结构在时空上的合理匹配及其空间构型和空间组合方式合理配置, 建立的土地利用格局优化模型可行;②3个优化方案中, 方案1更加偏向于生态安全优化目标的实现, 方案2更加偏向于社会经济发展目标的实现, 方案3更加偏向于粮食生产目标的实现;在研究区土地利用格局子目标决策偏好的实现上, 3组土地利用格局优化方案对实现粮食生产、生态安全、社会经济发展等优化目标的决策偏好具有显著差异;③研究区土地利用格局不同优化方案呈现不同土地利用结构, 在空间布局上有显著的分异特征。本文完善和丰富了土地利用格局优化的理论基础和研究方法, 可为土地利用规划提供有力的技术支持。

**关键词:**土地利用; 格局优化; 多智能体粒子群算法; 松嫩平原

DOI: 10.18402/resci.2019.04.10

## 1 引言

自然条件变化和人类活动深刻地改变着生态环境<sup>[1]</sup>, 直接作用的结果是土地利用类型或地表植被状况的改变<sup>[2]</sup>, 各种土地利用类型通过竞争相互消长, 最终形成土地利用格局<sup>[3]</sup>。土地利用格局优化是在明确土地利用格局、功能和过程相互作用的基础上, 通过协调不同土地利用类型的数量结构和空间布局, 使其产生最大的自然生态效益和社会经济效益, 是实现土地资源合理配置的重要方式。

目前, 关于土地利用格局模拟的研究大多为格局预测或格局优化<sup>[4-6]</sup>。在研究方法上, 国内外学者最初主要运用空间统计分析方法、Markov模型和元胞自动机模型对土地景观格局演变进行分析<sup>[7,8]</sup>, 在此基础上, 众多学者采用多源遥感数据融合和GIS

技术相结合等手段, 运用经验统计模型(Logistic回归、贝叶斯分析及ABM模型等)、CLUE-S模型、地理加权回归模型、智能体模型、粒子群算法、DLS模型等方法模拟土地利用格局动态变化<sup>[1,9-12]</sup>, 为建立土地利用格局优化模型提供科学方法依据。已有研究表明, 阐明土地利用格局与其驱动因子之间的关系是土地利用格局优化模拟的基础, 但传统研究土地利用格局动态模拟大多包含于土地利用/覆被变化模拟中, 大部分研究是从自然生态环境、社会经济、人口变化等宏观条件下的土地利用数量结构及其空间变化的模拟<sup>[13,14]</sup>, 以微观驱动因子及其空间分异为基础的模拟方法尚少见, 因此, 突破已有研究的局限, 充分考虑驱动因子影响的空间不稳定性和驱动因子间作用的空间分异特征, 具有一定的

收稿日期: 2018-05-27 修订日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571165); 辽宁省社科规划基金项目(L17CGL007); 辽宁省教育厅科学研究项目(WQN201709)。

作者简介: 王越, 女, 黑龙江哈尔滨人, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为土地利用与管理。E-mail: ywmath@163.com

通讯作者: 宋戈, E-mail: songgelaoshi@163.com

学术价值。松嫩平原是国家重要的粮食主产区和商品粮生产基地,是黑龙江省黑土分布比较集中的区域,该区域土地利用类型多样,土壤类型复杂,土地利用情况严峻,包括水土流失、土壤侵蚀、土地退化等生态环境问题,以上问题已成为阻碍区域发展的瓶颈,区域土地利用格局亟待优化,鉴于此,本文选取位于松嫩平原中部偏南的巴彦县为研究区,建立土地利用格局优化模型,设立粮食生产、生态安全和社会经济发展3个优化目标,以驱动土地利用格局变化的影响因子为约束条件,设计政府、职能部门和个体三类智能体(Agent),并结合研究区土地利用格局优化目标的决策偏好确定其优化方案。该研究成果对于促进区域土地可持续利用及实现土地资源合理配置具有重要意义。

## 2 研究区概况及数据来源与处理

### 2.1 研究区概况

松嫩平原位于黑龙江省西部黑土分布比较集中的区域。本文选取位于松嫩平原中部偏南的巴彦县为研究区,研究区地理坐标为 $126^{\circ}45'53''\text{E}$ — $127^{\circ}42'16''\text{E}$ , $45^{\circ}54'28''\text{N}$ — $46^{\circ}40'18''\text{N}$ ,辖18个镇(乡)116个行政村,2015年县域土地面积为31.360万 $\text{hm}^2$ ,总人口为70.73万。研究区旱地面积为21.867万 $\text{hm}^2$ ,水田面积为2.136万 $\text{hm}^2$ ,林地面积为3.428万 $\text{hm}^2$ ,草地面积为0.558万 $\text{hm}^2$ ,建设用地面积为2.079万 $\text{hm}^2$ ,水域面积为0.486万 $\text{hm}^2$ ,其他用地面积为0.803万 $\text{hm}^2$ ,园地面积为0.003万 $\text{hm}^2$ ,园地在数量上几乎可以忽略不计,但其在研究区农业生产上具有重要地位。研究区各种土地利用类型分布较为分散,水土流失、土壤侵蚀和土地退化等区域生态环境问题日益凸显<sup>[15]</sup>(图1)。

### 2.2 数据来源与处理

选取研究区2015年Landsat TM遥感影像(30 $\text{m} \times 30\text{m}$ ),为确保遥感影像的清晰程度,考虑研究区的自然物候特点,主要选择6—9月份的影像,其影像的云覆盖率低于影像面积的10%,以获取研究区土地利用类型及各类植被指数数据。本文选取影响研究区土地利用格局变化中可空间化的自然条件和社会经济要素,包括地形地貌、高程、坡度、坡向、年日照时数、年均气温、年降水量、土壤有机质含量、土壤全氮、土壤速效磷、土壤速效钾、耕层厚

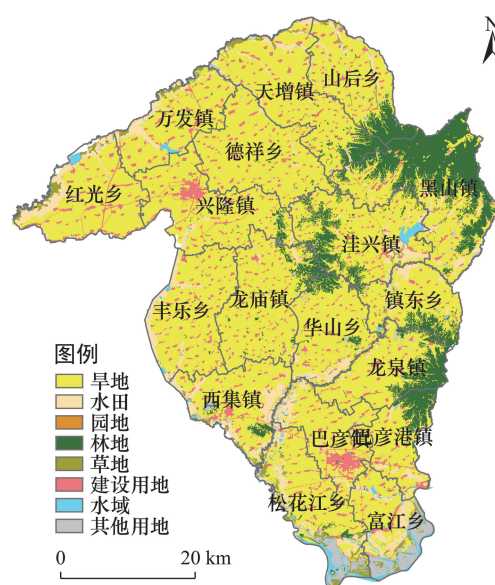


图1 2015年研究区土地利用现状

Figure 1 Land use in the study area, 2015

度、NDVI、DVI、土地利用强度、GDP、人口、政策法规等,其中,年日照时数、年均气温、年降水量、GDP和人口等数据来源于“中国科学院信息化建设专项——人地系统主题数据库”的成果。

本文通过几何校正、裁剪、数据融合与影像增强等处理,以研究区1:5万数字化地形图作为参考图,采用控制点纠正方式,结合第二次全国土地调查数据及野外实地考察,运用监督分类方法将研究区土地利用类型解译为旱地、水田、园地、林地、草地、建设用地、水域和其他用地8个一级类,土地利用解译数据精度达到94%以上。根据作者前期研究成果<sup>[16]</sup>,运用GA-BP因子降维法,2015年研究区土地利用格局时空变化的关键性影响因子有9个,分别为土壤速效钾、土壤全氮、耕层厚度、土壤速效磷、NDVI、土壤有机质、土地利用强度、人口、高程,其作用大小分别为:0.8302、0.8274、0.8258、0.8228、0.8209、0.8186、0.8168、0.8133、0.8056,这9个影响因子对2015年研究区土地利用格局时空变化的影响极大,是影响研究区土地利用格局时空变化最重要的因子。在此基础上,建立研究区土地利用数据库,运用ArcGIS软件工具箱中的Feature to raster功能将研究区2015年的土地利用及其影响因子的矢量数据栅格化,取像元分辨率为30 $\text{m} \times 30\text{m}$ 的正方形栅格作为基本单元,其行列数为2430 $\times$ 2829,栅格

2019年4月

数据为GRID格式。

### 3 多智能体粒子群土地利用格局优化模型

本文建立的土地利用格局优化模型,设立粮食生产、生态安全和社会经济发展3个优化目标,以驱动土地利用格局变化的影响因子为约束条件,提出运用多智能体改进粒子群优化算法(MA-PSO),设计政府Agent、职能部门Agent和个体Agent,以栅格Agent为基础,构建栅格Agent全局环境,在研究区土地利用格局变化最优时空尺度下<sup>[17,18]</sup>,为实现政府Agent对土地利用格局安全的宏观调控和协调作用,并实现职能部门Agent在各种关键性因子影响下所获取的各种土地利用类型适宜性程度上的组织和引导作用,构建栅格Agent局部环境,执行PSO算法中的适应度函数、竞争与合作操作、自学习操作,实现研究区土地利用类型数量结构在时空上的合理匹配及其空间构型和空间组合方式合理配置,根据土地利用格局优化子目标的实现利好不同,获得研究区不同土地利用格局优化方案。

#### 3.1 研究区土地利用格局优化目标

本文共设置3种土地利用格局优化目标函数,以实现区域粮食生产、生态安全和社会经济发展土地利用多目标优化。

##### 3.1.1 粮食生产目标函数

采用粮食总产量最大化作为粮食生产的优化目标函数,公式为:

$$\text{Max } F_1 = \sum_{k=1}^H W_h S_h \quad (1)$$

式中: $F_1$ 表示区域土地利用粮食总产量, $W_h$ 表示各地类粮食单产系数, $S_h$ 表示各地类 $h$ 的面积( $k=1, 2, \dots, H$ ),此公式中只有旱地、水田参与运算。

##### 3.1.2 生态安全目标函数

为保障研究区土地利用格局生态安全,采用最大化的土地生态承载力和最小化的土地生态相容性共同作为生态安全的优化目标函数。

(1)建立土地生态承载力模型作为生态安全的优化子目标函数,公式为:

$$\text{Max } F_2 = \sum_{h=1}^H S'_h r_h y_h \quad (2)$$

式中: $F_2$ 表示区域土地生态承载力; $S'_h$ 表示不同类

型生物生产性土地面积,包括可耕地(旱地、水田、园地)、林地、草地、建设用地、水域和其他用地; $r_h$ 表示当量因子; $y_h$ 表示产量因子<sup>[19]</sup>。

(2)土地生态相容性可以体现土地利用类型在空间上的相容关系(式3)。土地生态相容性是指在转换的过程中,优化后的土地利用类型与优化前的土地利用类型在空间上能够兼容,若空间上相容,则土地利用类型予以转换;若空间上不相容,则不予以转换,公式为:

$$\text{Min } F_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^H \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^J \sum_{k'=1}^H D_{ij,i'j'} E_{h,h'} \quad (3)$$

式中: $F_3$ 表示区域各地类的生态相容性总和; $D_{ij,i'j'}$ 表示土地利用空间单元 $(i,j)$ 和土地利用空间单元 $(i',j')$ 之间的相容关系,若相容,其值为1,若不相容,其值为0,其中, $I$ 表示栅格行数、 $J$ 表示栅格列数; $E_{h,h'}$ 表示地类为 $h$ 的土地利用空间单元 $(i,j)$ 与地类为 $h'$ 的土地利用空间单元 $(i',j')$ 之间的土地生态相容性程度。

#### 3.1.3 社会经济发展目标函数

采用最大化的土地利用经济产出和最小化的地类间转变总成本作为研究区社会经济发展的目标函数。

(1)土地利用的经济总产出是体现区域社会经济发展的重要因素,公式为:

$$\text{Max } F_4 = \sum_{h=1}^H O_h S_h \quad (4)$$

式中: $F_4$ 表示区域土地利用经济总产出; $O_h$ 表示地类 $h$ 的经济产出系数。

(2)土地利用类型间转变总成本反映区域各种土地利用类型之间转换的总费用,公式为:

$$\text{Min } F_5 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^H C_{ijh} V_{ijh} \quad (5)$$

式中: $F_5$ 表示区域地类间转变总成本; $C_{ijh}$ 表示在土地利用空间单元 $(i,j)$ 位置上转变为地类 $h$ 时的成本; $V_{ijh}$ 是二值变量,若土地利用空间单元 $(i,j)$ 位置上的地类为 $h$ ,其值为1,否则为0。

### 3.2 优化的约束条件

#### 3.2.1 数量结构约束

(1)土地总面积约束。研究区各种土地利用类型的面积总和等于研究区总面积,公式为:



$$\sum_{h=1}^H S_h = S_{\text{total}} \quad (6)$$

式中:  $S_{\text{total}}$  表示研究区土地总面积。

(2) 宜农土地面积约束。宜农土地的判断一般以土壤养分含量来判定, 公式为:

$$(A_{\text{Corg}} \cap A_N \cap A_P \cap A_K) \cup S_{h_1} \cup S_{h_2} \geq S_{h_f} \quad (7)$$

式中:  $A_{\text{Corg}}$ 、 $A_N$ 、 $A_P$ 、 $A_K$  分别表示在第二次土壤普查中研究区土壤有机质、土壤全氮、土壤速效磷和土壤速效钾的肥力分级在三级以上的面积; 其中, 土壤有机质含量应大于 20 g/kg, 土壤全氮含量应大于 1 g/kg, 土壤速效磷含量应大于 10 mg/kg, 土壤速效钾含量应大于 100 mg/kg;  $S_{h_1}$ 、 $S_{h_2}$  分别表示研究区旱地、水田的面积;  $S_{h_f}$  表示研究区基本农田面积。

### 3.2.2 空间布局约束

(1) 基本栅格约束。规定每个土地利用空间单元( $i, j$ )上只存在一种土地利用类型, 公式为:

$$\sum_{h=1}^H X_{ijh} = 1 \quad (8)$$

式中:  $X_{ijh}$  表示各种土地利用类型。

(2) 土地利用空间转换约束。在基本农田、水域等区域范围内, 禁止不适宜的土地利用类型间的转换, 公式为:

$$TP(X_{ij}) = 0, \text{ if } ((i, j) \in \Omega) \quad (9)$$

式中:  $TP(X_{ij})$  表示土地利用空间单元转换概率;  $\Omega$  表示基本农田、水域等空间管制区域。

(3) 新增建设用地扩展空间紧凑性约束。为促进建设用地集中增长、避免无序扩张, 确定新增建设用地空间单元( $i, j$ )邻域内建设用地单元个数不得小于 2, 公式为:

$$\sum_{i, j \in \delta} B_{ijh} \geq 2 \quad (10)$$

式中:  $B_{ijh}$  为二元变量, 若土地利用空间单元( $i, j$ )的地类  $h$  为建设用地, 其值为 1, 否则为 0;  $\delta$  表示土地利用空间单元( $i, j$ )的邻域范围。

### 3.3 多智能体及其决策行为

区域土地利用优化配置具有层次性<sup>[20]</sup>。本文将研究区土地利用格局优化的决策主体分为政府 Agent、职能部门 Agent 和个体 Agent 三类智能体, 其决策行为规则具有上下承接关系。政府 Agent 对区域土地利用格局的变化起宏观调控和协调作用, 职

能部门 Agent 对区域土地利用格局的变化起着组织和引导作用, 个体 Agent 对区域土地利用格局的变化起着分配作用, 职能部门 Agent 向政府 Agent 提出用地请求, 在政府 Agent 的协调下, 对与其他职能部门 Agent 产生冲突的土地进行协商<sup>[20]</sup>, 采用动态随机效用模型<sup>[21]</sup>及离散选择模型<sup>[22]</sup>模拟职能部门 Agent 对土地利用空间单元进行决策。本文区别于以往研究对职能部门 Agent 空间属性的确定方法, 将各种土地利用类型的适宜性程度评价结果作为职能部门 Agent 的空间属性, 其计算方法为: 结合 2015 年研究区土地利用格局变化关键性影响因子, 运用多因素综合评价法<sup>[23]</sup>, 对研究区土地利用适宜性程度进行评价。在 ArcGIS 平台下, 采用 Classified 功能中的自然断点法将研究区土地利用适宜性程度评价结果划分为 7 个等级, 即 1~7 级由高等级到低等级土地利用适宜性程度依次递减, 从而确定研究区各种土地利用类型的适宜性等级(图 2)。

### 3.4 决策过程设计

根据 MA-PSO 算法原理, 在  $I$  行、 $J$  列的每一个土地利用格网上都分布着一个栅格 Agent, 每个栅格 Agent 与其邻域栅格 Agent 进行空间决策, 为此, 构建栅格 Agent 自适应度函数、竞争与合作算子和自学习算子对土地利用格局进行优化。

(1) 栅格 Agent 自适应度函数的建立。将土地利用格局的优化目标函数打包成自适应度函数获取栅格 Agent 的初始自适应度(式 11、式 12), 并获得各个栅格 Agent 对优化目标的决策偏好, 公式为:

$$F_x(L_{ij}) = (G - Y_x(L_{ij}))^2 / G^2 \quad (11)$$

$$Fit(L_{ij}) = \sum_{x=1}^n l_x F_x(L_{ij}) \quad (12)$$

式中:  $F_x(L_{ij})$  表示  $L_{ij}$  对目标  $Z(x)$  的初始自适应度;  $Y_x(L_{ij})$  表示  $L_{ij}$  对目标  $Z(x)$  的观察值在模型中所有 Agent 对目标  $Z(x)$  的优劣排序集合中相应的序号;  $Fit(L_{ij})$  表示  $L_{ij}$  对全部目标初始自适应度的总和;  $l_x$  表示  $L_{ij}$  对目标  $Z(x)$  的决策偏好,  $n$  为优化目标的个数。

本文将公众 Agent 以栅格 Agent 的形式落实在土地利用空间上, 其自适应度还受政府 Agent 的宏观调控和职能部门 Agent 的引导(式 13), 公式为:



2019年4月

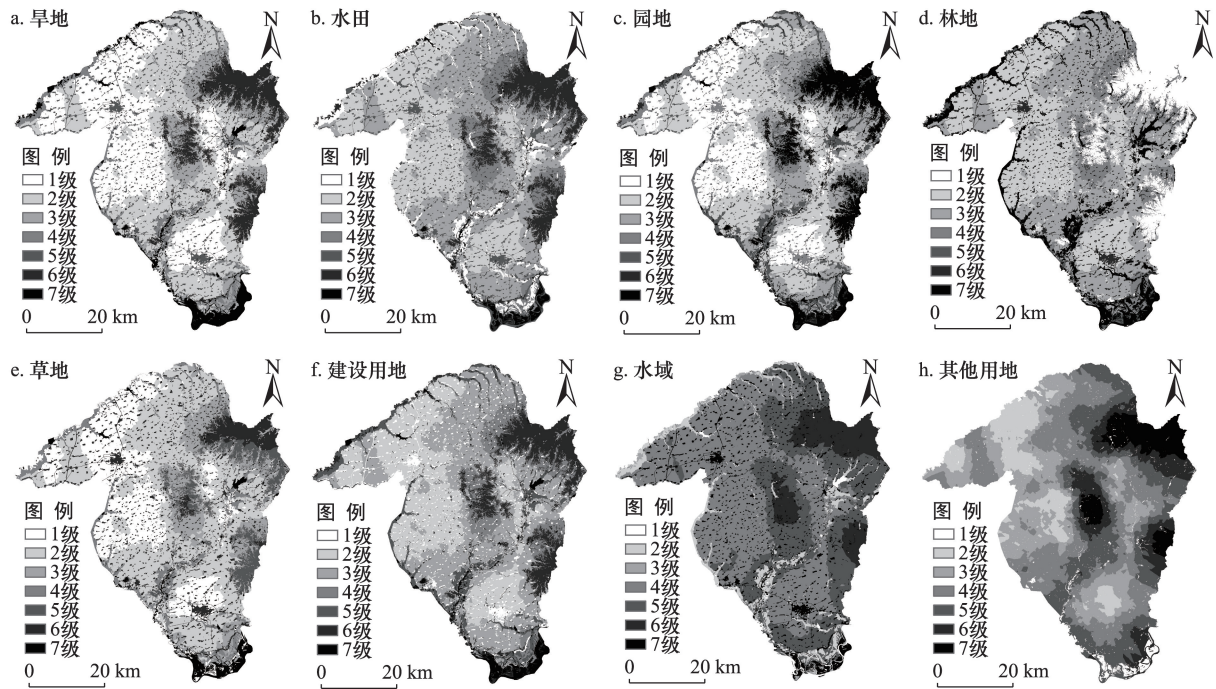


图2 研究区各种土地利用类型的适宜性等级

Figure 2 Suitability level of land-use types in the study area

$$Fit(L_{ij})^* = Fit(L_{ij}) \cdot S_{ij}^k \cdot Q_{ij}^k \cdot V \quad (13)$$

式中:  $Fit(L_{ij})^*$  表示综合考虑政府、职能部门和个体 Agent 的栅格 Agent  $L_{ij}$  的自适应度。

(2) 栅格 Agent 竞争与合作操作。在每次迭代过程中,采用粒子群优化算法(PSO)中的速度、位置更新公式,对每个栅格 Agent 在土地利用格局优化解空间中的速度(式14)和位置(式15)进行更新,公式为:

$$v_{ij,n}^{d+1} = \omega v_{ij,n}^d + \phi_1 \zeta (p_{ij,n}^d - l_{ij,n}^d) + \phi_2 \eta (p_{g_{ij,n}}^d - l_{ij,n}^d) \quad (14)$$

$$l_{ij,n}^{d+1} = l_{ij,n}^d + v_{ij,n}^d \quad (15)$$

式中:上标  $d$  表示迭代次数;  $v_{ij,n}^d$  表示栅格 Agent  $L_{ij}$  第  $d$  次迭代时微粒速度的  $n$  维分量;  $l_{ij,n}^d$  表示栅格 Agent  $L_{ij}$  第  $d$  次迭代时微粒当前空间位置的  $n$  维分量;  $\omega$  是惯性权重,表示保持原始速度的系数;  $\phi_1$  为学习因子1,表示微粒追随自身历史最优值的权重系数,通常设为2;  $\phi_2$  为学习因子2,表示微粒追随群体最优值的权重系数,通常设为2;  $\zeta$ 、 $\eta$  表示区间  $[0,1]$  内服从均匀分布的随机数;  $p_{ij,n}^d$  表示栅格 Agent  $L_{ij}$  自身在作比较的过程中寻找到的最优

Agent 当前位置的  $n$  维分量,  $p_{g_{ij,n}}^d$  表示栅格 Agent  $L_{ij}$  全部微粒搜索到的最优 Agent 当前位置的  $n$  维分量。

(3) 栅格 Agent 的自学习操作。假设栅格 Agent  $L_{ij}$  在解空间的位置为  $L_{ij} = l_1, l_2, \dots, l_n$ , 构造栅格环境大小为  $sL_{size} \times sL_{size}$  ( $sL_{size}$  为正整数), 本研究前期研究成果确定土地利用格局变化最优的空间尺度是  $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}^{[17]}$ , 即确定自学习搜索半径为30个空间单元;根据自学习操作公式(式16)确定栅格 Agent 环境中各个栅格 Agent 的位置,初始化自学习操作的栅格 Agent 环境,公式为:

$$sL_{ij} = \begin{cases} L_{ij} & i=1, j=1 \\ LL_{ij} & \text{others} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $LL_{i',j'} = ll_{i',j',1}, ll_{i',j',2}, \dots, ll_{i',j',n}, ll_{i',j',i}$ , 计算公式为:

$$ll_{i,j,t} = \begin{cases} x_{t_{\min}} & l_t \cdot \text{rand}(1-sR, 1+sR) < x_{t_{\min}} \\ x_{t_{\max}} & l_t \cdot \text{rand}(1-sR, 1+sR) > x_{t_{\max}} \\ l_t \cdot \text{rand}(1-sR, 1+sR) & x_{t_{\min}} \leq l_t \cdot \text{rand}(1-sR, 1+sR) \leq x_{t_{\max}} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $sR$  表示小范围的局部搜索半径,  $sR \in [0, 1]$ ,  $\text{rand}(1-sR, 1+sR)$  是介于  $(1-sR, 1+sR)$  之间的随机

数,设置随机数种子是与系统时间相关的,要避免产生相同的随机数。

在栅格 Agent 的自学习操作中,栅格 Agent  $L_{i,j}$  当前在解空间的位置即为它所拥有的知识,实质上以  $sR$  为局部搜索半径是构造了另外一个智能体系统,小范围地扩展了该搜索空间,在该搜索空间内,对栅格 Agent 与其邻域进行竞争与合作操作,有效地节约了计算时间,进一步提高了栅格 Agent 的自适应度(图3)。

## 4 结果与分析

### 4.1 模型参数选择及其多目标决策结果

经多次调试参数发现,当设置模型的局部环境大小分别为 5、6、7,自学习小范围局部搜索半径分别为 0.1、0.5、0.6,自学习内部循环次数分别为 3、5、6,速度更新公式中的“惯性常数”为 0.5,速度更新公式中的“学习因子 1”为 2,速度更新公式中的“学习因子 2”为 2 时(以上参数无量纲),研究区土地利用格局优化模型均能较好地实现优化目标,并能够根据不同优化目标的决策偏好,对比不同优化决策偏好对土地利用格局的影响。本文每个优化方案对研究区各个土地利用格局优化子目标均能够实现,只是相对地对研究区某一个土地利用格局优化子目标的实现更好一些,研究区土地利用格局优化决策偏好相对程度的利好规定以 0.2 为界限,当决策偏好  $\geq 0.2$  时,优化方案对该土地利用格局优化子目标实现有利,当决策偏好  $< 0.2$  时,优化方案对该土地利用格局优化子目标实现不利。因此,3 组优化方案中,优化方案 1 的 5 个土地利用格局优化子目标

的决策偏好分别为:粮食生产为 0.1317、土地生态承载力为 0.2563、土地生态相容性为 0.2833、土地利用经济产出为 0.0984、土地利用类型间转变总成本为 0.0762,说明该结果对土地生态承载力、土地生态相容性 2 个子目标的实现更加有利;优化方案 2 的 5 个土地利用格局优化子目标的决策偏好分别为:粮食生产 0.1203、土地生态承载力 0.0996、土地生态相容性 0.0659、土地利用经济产出 0.2915、土地利用类型间转变总成本 0.3369,说明该结果对土地利用类型间转变总成本、土地利用经济产出 2 个子目标的实现更加有利;优化方案 3 的 5 个土地利用格局优化子目标的决策偏好分别是:粮食生产 0.2065、土地生态承载力 0.2047、土地生态相容性 0.0638、土地利用经济产出 0.1994、土地利用类型间转变总成本 0.0547,说明该结果对粮食生产、土地生态承载力 2 个子目标的实现更加有利(表 1)。对于研究区土地利用优化目标的决策偏好,优化方案 1 的研究区土地利用格局优化结果对实现生态安全较好,研究区土地利用优化格局更能够满足生态安全的需要;优化方案 2 的研究区土地利用格局优化结果对实现社会经济发展较好,研究区土地利用优化格局更能够满足社会经济发展的需要;优化方案 3 的研究区土地利用格局优化结果对实现粮食生产较好,研究区土地利用优化格局更能够满足粮食安全的需要。

### 4.2 土地利用格局数量结构优化分析

在数量结构上,研究区不同土地利用格局优化方案呈现不同土地利用结构,3 种土地利用格局优化方案中,各种土地利用类型增减变化明显(表 2)。

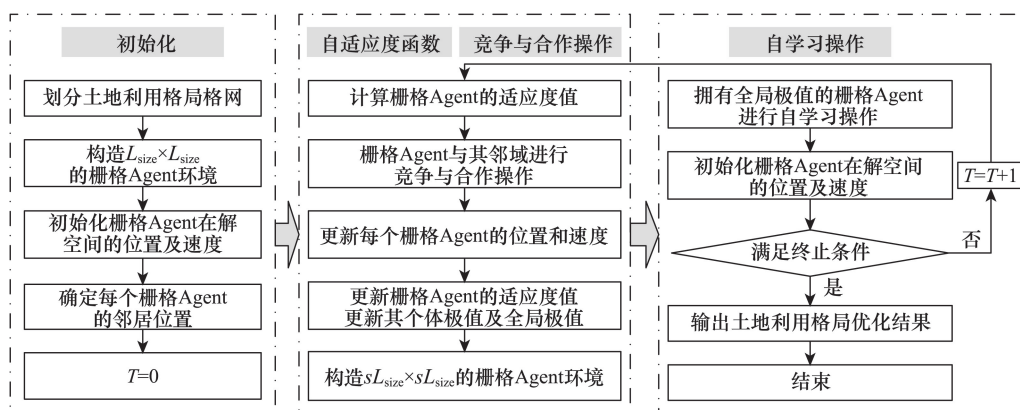


图3 土地利用格局优化多智能体粒子群算法(MA-PSO)流程

Figure 3 Flow chart of multi-agent particle swarm optimization (MA-PSO) procedure for land-use pattern optimization

表1 研究区土地利用格局优化目标决策偏好比较

Table 1 Comparison of decision preferences of land-use pattern optimization objectives in the study area

优化目标	子目标决策偏好	优化方案1	优化方案2	优化方案3
粮食生产	粮食生产	0.131 7	0.120 3	<b>0.206 5</b>
生态安全	土地生态承载力	<b>0.256 3</b>	0.099 6	<b>0.204 7</b>
	土地生态相容性	<b>0.283 3</b>	0.065 9	0.063 8
社会经济发展	土地利用经济产出	0.098 4	<b>0.291 5</b>	0.199 4
	土地利用类型间转变总成本	0.076 2	<b>0.336 9</b>	0.054 7

注:对实现研究区土地利用格局优化子目标有利的结果加粗显示。

表2 研究区土地利用格局现状与3组优化方案土地利用数量结构统计与对比

Table 2 Quantitative structure of land-use pattern at present and under the three optimization schemes in the study area

土地利用 类型	现状		优化方案1		优化方案2		优化方案3	
	栅格数/个	百分比/%	栅格数/个	百分比/%	栅格数/个	百分比/%	栅格数/个	百分比/%
旱地	2 429 817	69.73	2 292 238	65.78	2 259 753	64.85	2 393 303	68.68
水田	237 186	6.81	272 719	7.83	253 935	7.29	243 597	6.99
园地	417	0.01	339	0.01	68	0.00	149	0.00
林地	380 861	10.93	395 797	11.36	355 046	10.19	345 655	9.92
草地	62 128	1.78	39 988	1.15	31 948	0.92	39 160	1.12
建设用地	230 952	6.63	395 085	11.34	507 469	14.56	376 562	10.81
水域	54 117	1.55	35 015	1.00	30 316	0.87	34 327	0.99
其他用地	89 360	2.56	53 657	1.53	46 303	1.32	52 085	1.49

对3组优化方案进行比较分析发现,在旱地和水田的总面积方面,方案3最大,方案1其次,方案2最小;在园地面积上,方案1最大,方案3其次,方案2最小;在林地面积方面,方案1最大,方案2其次,方案3最小;在草地面积方面,方案1最大,方案3其次,方案2最小;在建设用地面积方面,方案2最大,方案1其次,方案3最小;在水域面积方面,方案1最大,方案3其次,方案2最小;在其他用地面积方面,方案1最大,方案3其次,方案2最小。3种优化方案中,旱地和建设用地的面积变化频繁,其中,旱地面积均较现状面积减少,分别减少3.95%、4.88%、1.05%,建设用地面积均较现状增加,分别增加4.71%、7.93%、4.18%;水田、林地和其他用地的面积变化较为频繁,其中,水田面积均较现状面积略有增加,分别增加1.02%、0.48%、0.18%,林地面积在优化方案1中较现状面积增加了0.43%、在优化方案2和优化方案3中较现状面积分别减少了0.74%和1.01%,其他用地面积均较现状面积略有减少,分别减少1.03%、1.24%、1.07%;园地、草地和水域面积变化较为不明显,其中,园地面积较现状面积基本没

有变化,草地面积均较现状面积稍有减少,分别减少了0.63%、0.86%、0.66%,水域面积均较现状面积稍有减少,分别减少了0.55%、0.68%、0.56%。研究区土地利用格局3个优化方案的ROC值分别为0.83、0.75、0.86,表明多智能体粒子群算法能够得到合理的土地利用格局优化方案,具有良好的有效性和可靠性。

4.3 空间结构优化分析

研究区土地利用格局不同优化方案在空间布局上有显著的分异特征。3组土地利用格局优化方案中,旱地在空间位置上变化不明显,其他土地利用类型的增减大多以旱地为“基质”;草地在研究区中部及南部水域附近被优化为水田的情况较多,降低了草地的生态功能。优化方案1和2中,水田在研究区北部、西部县界处以及中部水域呈线状分布,在研究区南部河流沿岸建设高标准的水田极为有利。优化方案1中,林地的发展不会在内部开始退化,完好地保护了林地的水土保持能力和维持生态功能的能力;优化方案2中,林地对于区域生态环境的保护有减弱的趋势。优化方案3中,水田在研



究区现状水田邻近的空间位置上稍有增加;林地的发展不会在内部开始退化,而是会受到其他土地利用类型的侵蚀,对于区域生态环境的保护有减弱的趋势。优化方案1和3中,建设用地分别在巴彦县政府、兴隆镇政府、西集镇政府和洼兴镇政府驻地,巴彦县政府驻地和兴隆镇政府驻地将成为县域经济社会发展的重心,需加快其基础设施的建设;优化方案2中,巴彦县政府驻地、兴隆镇、西集镇和洼兴镇政府驻地以及各村屯增加的建设用地对于社会经济发展和基础设施的建设有显著优势(图4)。

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

本文采用粒子群算法对土地利用栅格实行更新策略,实现土地利用多智能体系统的整体进化,提高了多智能体粒子群算法的并行搜索能力,经多次调整参数,多智能体粒子群算法能得到合理有效

的土地利用格局优化方案,具有良好的可靠性和科学性。研究区土地利用格局优化结果与2006—2020年研究区土地利用总体规划中各类土地利用类型面积相比,规划主要用地控制指标中,优化方案1和优化方案2中耕地面积占比较规划耕地指标略少,优化方案3中耕地面积占比较规划耕地指标略多,3个优化方案中林地、其他用地面积占比均稍低于规划指标面积;3个优化方案中草地、建设用地面积占比均略高于规划指标面积,优化土地利用结构与规划土地利用结构基本相符。产生这种微小差异的主要原因是:本文建构的土地利用格局优化模型是从自然条件和人类活动等微观驱动因子对土地利用格局的影响进行优化,其优化过程具有客观性,而土地利用总体规划是以历年土地利用结构为预测指标,并辅以人为调控,没有考虑到各种微观因素对土地利用格局产生的影响,规划结果较为

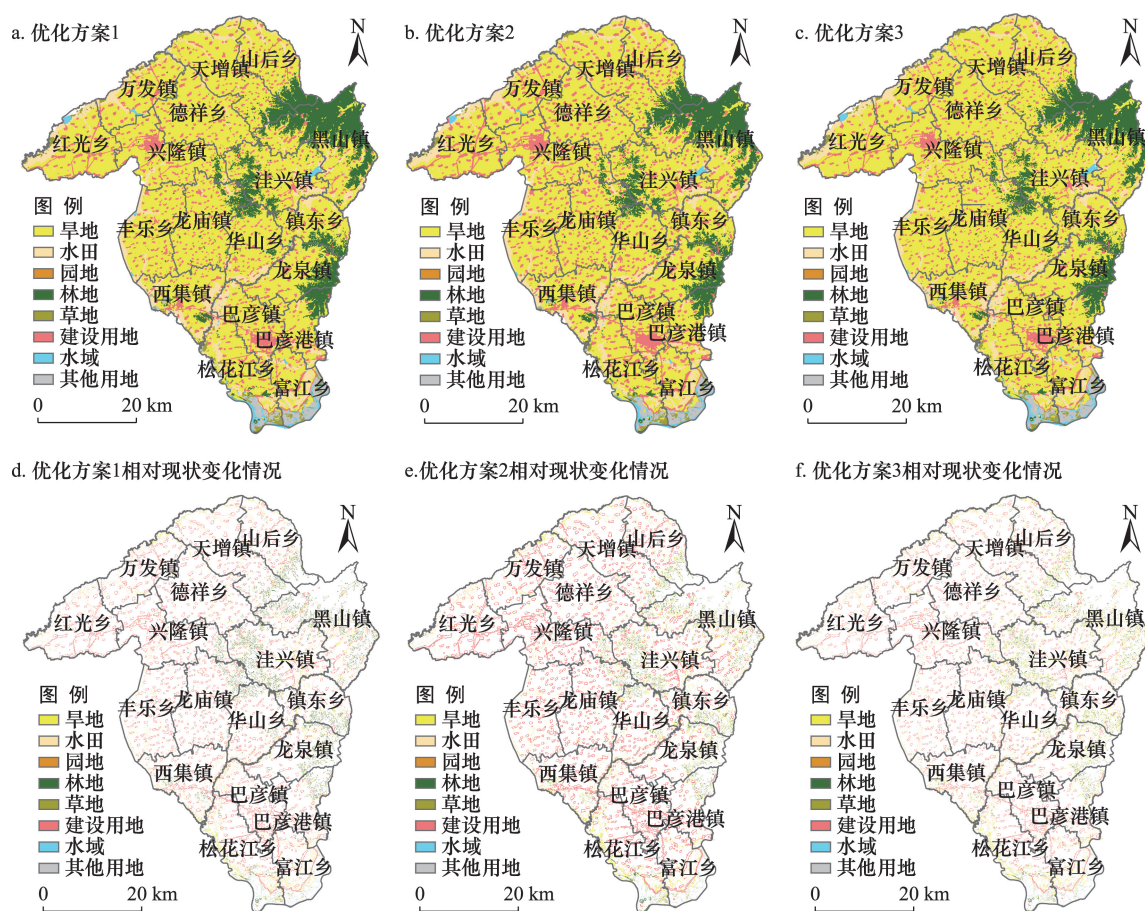


图4 研究区土地利用格局3种优化方案图及其相对现状的变化情况

Figure 4 The three optimization schemes and changes relative to the present situation of land-use pattern in the study area

2019年4月

主观。

国内外以往在土地利用格局优化模型的研究中,以系统动力学模型、元胞自动机模型和多智能体系统的应用最为广泛,这些方法融合了复杂系统理论和人工智能技术,其在空间计算和时空动态复杂性研究方面具有优势<sup>[20]</sup>,但众多方法尚无法确定土地利用格局优化各子目标的决策偏好,并且对于土地利用格局及其关键影响因素之间的时空匹配关系尚无更好的解决办法<sup>[24]</sup>,由于情景优化过程中不可能达到所有优化目标均最优,其土地利用优化情景的多目标冲突会减弱相应优化情景的主导作用<sup>[25]</sup>。本文建立的土地利用格局优化模型不仅实现了政府、职能部门和个体等多行为主体决策,而且突破已有研究的局限,在智能体行为决策的过程中,充分考虑了自然条件和人类活动等驱动因子影响的空间不稳定性及驱动因子间作用的空间分异特征,不需要人为设定土地利用优化情景,通过模型参数的修正,实现针对优化目标决策偏好的多目标土地利用格局优化,对土地利用格局优化方案的选择提供了多种可能,完善和丰富了土地利用格局优化的理论基础和研究方法,可为土地利用规划提供有力的技术支撑。以土地利用格局优化方法为基础,建构符合区域实际的土地利用格局优化模式是下一步的重要研究方向。

## 5.2 结论

本文建立了土地利用格局优化模型,确定了研究区土地利用类型数量结构和空间布局的时空合理优化配置方案,得到结论如下:

(1)基于多智能体改进粒子群优化算法(MA-PSO)建立土地利用格局优化模型,在满足土地利用数量结构及其空间布局等各类约束条件下,可达到粮食生产、生态安全和社会经济发展的土地利用格局优化目标,实现研究区土地利用类型数量结构在时空上的合理匹配及其空间构型和空间组合方式合理配置,研究方法可行。

(2)3个优化方案中,优化方案1更加偏向于生态安全优化目标的实现;优化方案2更加偏向于社会经济发展目标的实现,优化方案3更加偏向于粮食生产目标的实现;在研究区土地利用格局子目标决策偏好的实现上,3个优化方案对研究区各个土地

利用格局优化子目标均能够实现。其中,优化方案1对于土地生态承载力和土地生态相容性的实现较为有利,优化方案2对于土地利用经济产出和土地利用类型间转变总成本的实现较为有利,优化方案3对于粮食生产和土地生态承载力的实现较为有利。

(3)在数量结构上,研究区不同土地利用格局优化方案呈现不同土地利用结构,3种优化方案中,旱地和建设用地的面积变化频繁,水田、林地和其他用地的面积变化较为频繁,园地、草地和水域面积变化较为不明显;在空间布局上有显著的分异特征,各种优化方案更合理地配置各种土地利用类型的数量结构和空间布局。

## 参考文献(References):

- [1] 任志远,李冬玉,杨勇.关中地区土地利用格局模拟与驱动力分析[J].测绘科学,2011,36(1):105-108. [Ren Z Y, Li D Y, Yang Y. Simulation and driving force analysis of land use pattern in Guanzhong region, Shaanxi Province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(1): 105-108.]
- [2] 肖思思,吴春笃,储金宇.1980-2005年太湖地区土地利用变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2012,28(23):1-11. [Xiao S S, Wu C D, Chu J Y. Land use changes and driving forces in Tai Lake region from 1980 to 2005[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(23): 1-11.]
- [3] 倪九派,邵景安,李阳兵,等.近10年重庆土地利用平衡及未来情景分析[J].资源科学,2011,33(8):1591-1599. [Ni J P, Shao J A, Li Y B, et al. Land-use balances over the recent 10-year and their future scenarios in Chongqing[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1591-1599.]
- [4] 杨国清,刘耀林,吴志峰.基于CA-Markov模型的土地利用格局变化研究[J].武汉大学学报,2007,32(5):414-418. [Yang G Q, Liu Y L, Wu Z F. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 414-418.]
- [5] 蒙古军,燕群,向芸芸.鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J].中国沙漠,2014,34(2):590-596. [Meng J J, Yan Q, Xiang Y Y. The optimization of ecological security pattern based on land use and assessment of schemes in Ordos, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 590-596.]
- [6] 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[J].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 megaregion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4341-4350.]
- [7] 王慧, 丁忠义, 侯湖平, 等. 高潜水位煤矿区土地利用景观格局分析与模拟预测研究: 以沛北煤矿区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 574-582. [Wang H, Ding Z Y, Hou H P, et al. Research on the change and simulation of landscape pattern in mining area with higher level of underground water: A case study of Peibei mining area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(3): 574-582.]
- [8] 冯宇, 毕如田, 王瑾, 等. 流域矿业开采引发的土地利用空间冲突及优化配置[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(11): 32-40. [Feng Y, Bi R T, Wang J, et al. Spatial conflict of land use caused by mining exploitation and optimal allocation scheme of land resources in river basin[J]. *China Land Sciences*, 2016, 30(11): 32-40.]
- [9] 摆万奇, 张永民, 阎建忠, 等. 大渡河上游地区土地利用动态模拟分析[J]. *地理研究*, 2005, 24(2): 206-212. [Bai W Q, Zhang Y M, Yan J Z, et al. Simulation of land use dynamics in the upper reaches of the Dadu river[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(2): 206-212.]
- [10] 盛晟, 刘茂松, 徐驰, 等. CLUE-S模型在南京市土地利用变化研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(2): 235-239. [Sheng S, Liu M S, Xu C, et al. Application of CLUE-S model in simulating land use changes in Nanjing metropolitan region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(2): 235-239.]
- [11] 欧定华, 夏建国. 基于粒子群算法的大城市近郊区景观格局优化研究: 以成都市龙泉驿区为例[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 553-572. [Ou D H, Xia J G. Landscape pattern optimization in peri-urban areas based on the particle swarm optimization method: A case study in Longquanyi District of Chengdu[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 553-572.]
- [12] 杨微, 徐艳. 基于沙漠化和适宜性的农牧交错带土地利用优化研究: 以内蒙古科尔沁左翼后旗为例[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(3): 95-105. [Yang W, Xu Y. Optimization of land use structure in the farming-grazing transitional zone based in desertification status and land adaptability: A case study of Horqin Left Wing Rear Banner, Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(3): 95-105.]
- [13] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 378-391. [Huang J C, Lin H X, Qi X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 378-391.]
- [14] 方玮轩, 杨惠, 方斌. 基于通勤行为的小城镇土地利用与格局优化对策研究: 以扬中市为例[J]. *中国土地科学*, 2017, 31(2): 40-47. [Fang W X, Yang H, Fang B. Research on the land use structure optimization strategy in small towns based on the commute behavior: Take Yangzhong as an example[J]. *China Land Sciences*, 2017, 31(2): 40-47.]
- [15] 宋戈, 王越. 松嫩高平原土地利用格局变化时空分异[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 225-233. [Song G, Wang Y. Spatial and temporal distribution of land use pattern change in Songnen high plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(18): 225-233.]
- [16] 宋戈, 王越, 雷国平. 松嫩高平原黑土区耕地利用系统安全影响因素作用机理研究: 以黑龙江省巴彦县为例[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 13-26. [Song G, Wang Y, Lei G P. Effect mechanism research of influential factors of cultivated land use system security of black soil region in Songnen high plain: A case study of Bayan county in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 13-26.]
- [17] 宋戈, 王越. 松嫩高平原土地利用格局空间尺度识别及其关联关系研究[J]. *中国土地科学*, 2017, 31(1): 88-96. [Song G, Wang Y. Study on spatial scale recognition and its relationships of land use pattern in Songnen high plain[J]. *China Land Sciences*, 2017, 31(1): 88-96.]
- [18] 王越, 宋戈. 松嫩高平原土地利用格局变化时间尺度特征研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1797-1807. [Wang Y, Song G. Study on time scales characteristics of land use pattern change in Songnen high plain[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1797-1807.]
- [19] 苗世龙, 程婕, 刘捷, 等. 天津市生态承载力分析[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1546-1551. [Miao S L, Cheng J, Liu J, et al. Ecological capacity analysis of Tianjin City[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1546-1551.]
- [20] 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用[J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 972-984. [Zhang H H, Zeng Y N, Tan R, et al. A model for regional land use optimization allocation based on Multi-agent system and its application[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 972-984.]
- [21] Quigley J M. Housing demand in the short run: Analysis of polytymous choice[J]. *Exploration in Economic Research*, 1976, 23(3): 76-102.
- [22] 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): 1101-1112. [Liu X P, Li X, Ai B, et al. Multi-agent systems for simulating and planning land use development[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10): 1101-1112.]
- [23] 倪九派, 李萍, 魏朝富, 等. 基于AHP和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 202-209. [Ni J P, Li P, Wei C F, et al. Potentialities evaluation of regional land consolidation based on AHP and entropy weight method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 202-209.]
- [24] 王越, 宋戈, 张红梅. 黑龙江省县域土地利用格局优化研究[J]. *经济地理*, 2016, 36(8): 147-151. [Wang Y, Song G, Zhang H M. The research of land use pattern optimization on country level in



Heilongjiang Province[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(8): 147–151.]  
[25] Kim D S, Chung H W. Spatial diffusion modeling of new residen-

tial area for land-use planning of rural villages[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2005, 131(3): 181–194.

## Optimization of land-use pattern based on multi-agent particle swarm optimization in the Song-Nen Plain region

WANG Yue<sup>1</sup>, SONG Ge<sup>2</sup>, LV Bing<sup>1</sup>

(1. School of Management, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

2. Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** Land-use pattern is an important indicator for the evaluation of land use and useful for analyzing and explaining the spatial phenomena, processes, and mechanisms of regional land use. The main aims of this study were to establish the optimization model of land-use pattern in a typical area of the Song-Nen Plain region Bayan County based on GIS and remote sensing technologies, Matlab programming, and multi-agent particle swarm optimization (MA-PSO); to optimize grain production, ecological security, and socioeconomic development with three agents of government, authorities, and individuals; and to assess the optimization schemes of land-use pattern based on the decision of land-use pattern optimization subgoals. The results indicated that the optimization model of land-use pattern based on GIS and remote sensing technologies, Matlab programming, and MA-PSO model could achieve a reasonable matching of the quantitative structure of land-use types in time and space and the rational allocation of spatial configuration and combination. The optimization objective functions of scheme I, II, and III were ecological security, socioeconomic development, and improved grain production, respectively, and the three optimization schemes had significant differences in the realization of the optimization subgoals. The different optimization schemes of land-use pattern had different land-use structures and spatial distribution characteristics. The study has enriched the theoretical basis and research methods of land-use pattern optimization, which can provide powerful technical support for land-use planning.

**Key words:** land use; pattern optimization; multi-agent particle swarm optimization; Song-Nen Plain