

王海鹰,秦奋,张新长,等.基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型[J].地理科学,2017,37(3):426-436.[Wang Haiying, Qin Fen, Zhang Xinchang et al. The Spatial Planning Model of Urban Ecological Land Based on Ant Colony Optimization Algorithm. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(3): 426-436.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.03.013

# 基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型

王海鹰<sup>1,2</sup>, 秦奋<sup>1,2</sup>, 张新长<sup>3</sup>, 张传才<sup>4</sup>, 李培君<sup>1</sup>

(1. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475001; 2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475001;  
3. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 4. 安徽理工大学测绘学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**城市生态用地规划是城市生态系统保护的重要基础和前提。针对传统空间规划方法的不足,提出基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型。研究对蚁群优化算法的空间禁忌策略、选择策略进行改进,考虑了城市生态用地的生态效益和空间集约性,在规划目标函数中引入生态适宜性、空间紧凑度和最邻近距离指数,并设计最邻近距离指数的栅格计算方法。以广州市为例,分别模拟城市生态用地占广州市面积15%、30%和50%情景下的生态用地规划方案,取得了较好的效果。研究表明:基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型能够合理的对城市生态用地的空间布局进行配置,明显提高了城市生态用地生态效益和空间集约性。

**关键词:**蚁群优化算法;城市生态用地;空间规划模型

**中图分类号:**F293.2      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2017)03-0426-11

## 引言

在发展中国家,城市化过程往往伴随着城市空间的急剧扩张,使得人类对于各种资源的开采、利用达到前所未有的强度,人与自然环境的矛盾日益突出<sup>[1,2]</sup>。在巨大的发展压力和较为脆弱的生态条件下,如何有效地维护和恢复城市的生态系统服务,协调城市发展和生态保护之间的矛盾<sup>[3]</sup>,已经成为紧迫而现实的问题。因此,保护必需的城市生态用地对于维持城市生态系统健康、改善城市居民生活质量和城市可持续发展具有重要作用和意义<sup>[4]</sup>。城市生态用地是为实现城市可持续发展的目标,保护城市生态环境而划定的非建设用地空间<sup>[5,6]</sup>。一般包括:农业保护区、水源保护区、生态保护区以及城市长远发展需要控制的绿化隔离带等非城市建设用地。城市生态用地规划是城市生态系统保护的重要基础和前提,其本质是一种复杂的NP-hard组合优化问题,不仅要保证规划指标

的数量,还要确保生态效益、集约性和完整性和城市发展空间等一系列空间目标和布局约束。

目前,国内外已有的城市生态用地规划方法主要分为传统规划方法和智能计算方法两种类型。传统规划方法包括生态安全格局<sup>[3,4,7-10]</sup>、生态适宜度评价<sup>[11-17]</sup>和生态网络规划<sup>[18-22]</sup>等方法,以上这些方法具有考虑因素全面、计算操作简单等突出优势,但也存在权重确定主观、未考虑因子之间相互作用、角度单一片面、调整不灵活等缺点,越来越难以满足城市社会、经济、生态目标的要求。另一类方法是智能计算方法,近年来已成为空间优化的一个发展方向<sup>[23,24]</sup>。这类模型主要包括遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[25-27]</sup>、模拟退火算法(simulated annealing, SA)<sup>[28,29]</sup>、禁忌算法(Taboo Search)<sup>[30,31]</sup>、蚁群优化算法<sup>[32-34]</sup>(Ant colony Optimization, ACO)和多智能体模型<sup>[35,36]</sup>等,这类算法都是基于自底而上的算法框架,考虑了全局性目标和空间约束,具有优异的全局寻优性能。近年来

**收稿日期:**2016-05-18; **修订日期:**2016-08-12

**基金项目:**国家自然科学基金青年项目(41401457)、国家科技支撑计划项目(2013BAC05B01)、国家自然科学基金重点项目(41431178)、河南省高等学校重点科研项目计划(15A170003)资助。[Foundation: National Nature Science Foundation of China (41401457), National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs (2013BAC05B01), State Key Program of National Natural Science Foundation of China (41431178), Colleges and Universities Key Scientific Research Projects of Henan Province (15A170003).]

**作者简介:**王海鹰(1980-),男,河南洛阳人,博士,讲师,硕导,主要研究方向为城市地理信息系统、空间智能优化与决策。E-mail: whyhdgis@163.com

已被陆续应用到空间选址<sup>[23,24,37-40]</sup>、土地利用优化<sup>[41-45]</sup>、土地利用模拟<sup>[46,47]</sup>、城市与人口模拟<sup>[48,49]</sup>和自然保护区规划<sup>[50-52]</sup>等地理空间问题。其中,黎夏等利用地理模拟与优化系统(GeoSOS)提取了广州市的生态保护区空间范围,基于博弈论解决了生态保护区的空间冲突问题。刘小平等改进了蚁群优化算法的选择策略和信息素扩散和更新机制,提取了东莞市生态保护区的范围。虽然国内外在城市模拟和优化上取得了丰硕成果,但是对城市生态用地规划方面的研究还比较少。

鉴于此,本研究以广州市为研究区,提出了基于蚁群优化算法的城市生态用地规划模型(Urban Ecological Land Plan Model, UELPM),对蚁群优化算法的空间禁忌策略、选择策略进行了改进,在规划目标函数中引入了生态适宜性、空间紧凑性和最邻近距离指数,实现城市生态用地向生态效益最大化和适度空间集约化,以期城市生态用地规划提供理论模型和分析工具。

## 1 城市生态用地规划模型

### 1.1 规划问题描述

对城市生态用地的规划问题进行概念描述,简要分析如下:

1) 城市生态用地效益一般受绿地覆盖度、固碳量、绿地空间位置、景观形态等指标的影响。而生态适宜性研究是生态效益的重要基础和前提,两者具有紧密的联系。为了简化研究问题,本研究利用生态适宜性来代表生态效益,将生态效益问题转化为获取研究区的生态适宜性之和的最大化问题。即,生态用地规划的目标是在一定的面积条件之下要获得尽量多的生态适宜性,即  $\max \sum_{k=1}^m f_{eco}(k)$ 。 $f_{eco}$  表示栅格单元生态适宜性函数, $k$  为第  $k$  个栅格单元, $m$  为栅格单元总数。

2) 城市生态用地需满足最大空间紧凑度,即  $\max f_{ci}$ ;最小最邻近距离,即  $\min f_{dist}$ 。 $f_{dist}$  表示最邻近距离函数。以上指标可使规划目标形成适度聚集的空间分布格局,保障了生态系统的完整性。

以外,还可以根据不同情况调整定义空间约束条件。如:城市发展空间、水域隔离、生态廊道、斑块大小等。

### 1.2 构建规划目标函数

根据空间约束条件建立单一性复合目标函数,该函数表达多目标空间约束条件下的城市生

态用地分布。研究从生态适宜性、空间分布集聚度、空间紧凑度3个方面进行考虑,建立目标函数如下:

$$\max f_{goal} = \frac{f_{ci}^{k_c} \times \left[ \sum_{k=1}^m f_{eco}(k) / m \right]^{k_e}}{f_{dist}^{k_d}} \quad (1)$$

式中,  $\max f_{goal}$  代表目标函数最大化,  $\sum_{k=1}^m f_{eco}(k) / m$

表示蚂蚁的平均生态适宜性,  $f_{dist}$  表示最邻近空间距离,  $f_{ci}$  表示紧凑度指数。理论上,当  $f_{dist}$  小于1时,样本点成聚集状态,当  $f_{dist}$  接近于0时,样本点接近完美聚集。 $f_{ci}$  在(0,1]之间,当  $f_{ci}$  越大,说明空间形态越紧凑,当  $f_{ci}$  接近于1时,空间形态将达到最紧凑状态,  $k_c$ 、 $k_d$ 、 $k_e$  分别代表各因子的调节系数。

1) 城市生态适宜性。城市生态适宜性由自然因子、社会因子、生态保护因子综合构成。研究利用归一化植被指数NDVI、改进归一化差异水体指数MNDWI表示自然因子。利用距已有城市距离和城市发展密度表示社会因子,城市发展密度利用城市建设用地密度表示。利用水源及水库保护、绿地保护、大于25°坡地、超过50 m高地保护表示生态保护因子。

根据生态适宜性概念模型,城市生态适宜性的表达式为:

$$f_{eco} = w_1 n + w_2 s + w_3 p \quad (2)$$

式中,  $n$ 、 $s$ 、 $p$  分别表示自然因子、社会因子、生态保护因子,  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  表示各自权重。

2) 最邻近距离指数。对于点状目标在空间的分布特征和相互关系,可以用样方内点数均值变差、点间最近距离均值、点密度距离函数等方法来度量,根据实际观察值与均空间分布条件下的理论值比较,判断点格局的是均匀、聚集,还是随机分布<sup>[53]</sup>。

由于蚂蚁在栅格空间表示为栅格点,由其构成的蚁群在栅格空间形成了点的空间分布格局。因此,可以以上方法进行空间度量。本文将点间最近距离均值方法扩展到平面栅格空间,用来度量蚁群在栅格空间的分布格局,栅格扩展计算方法如下:

$f_{dist}$  表示最邻近距离指数(Nearest Distance In-

dex)。检验每个点所点据的面积,即通过比较计算最邻近的点对的平均距离与随机分布模式中最邻近的点对的平均距离,  $f_{\text{dist}}$  用其比值判断其与随机分布的偏离。

$$f_{\text{dist}} = \frac{d(nn)}{d(ran)} \quad (3)$$

式中,  $d(nn)$  为最邻近距离;  $d(ran)$  为随机分布条件下的理论平均距离。一般情况,  $f_{\text{dist}} \in [0, \infty)$ 。当  $f_{\text{dist}} < 1$  时, 样本点呈集聚分布; 当  $f_{\text{dist}} = 0$  时样点呈完美聚集; 当  $f_{\text{dist}} > 1$  时, 样本点呈分散分布。

$$d(nn) = \sum_i^n \frac{\min(d_{ij})}{n} \quad (4)$$

式中,  $n$  为样本点数目, 即蚁群空间大小;  $d_{ij}$  为第  $i$  点到第  $j$  点的距离;  $\min(d_{ij})$  为  $i$  到最邻近点的距离。

$$d(ran) = 0.5 \sqrt{A/N} \quad (5)$$

式中,  $A$  为研究区域面积。

由于  $f_{\text{dist}} \in [0, \infty)$ , 为避免分母零除现象等极端情况出现。利用 Logit 函数, 将其映射到 (0,1) 的区间。此时, 指数值越大说明空间聚集程度越高。修改后最邻近距离指数公式如下:

$$f_{\text{mod\_dist}} = 2 - \frac{2}{1 + \exp(-f_{\text{dist}})} \quad (6)$$

式中,  $f_{\text{mod\_dist}}$  表示修正后的最邻近距离指数。此时, 将目标函数修正为(式 7):

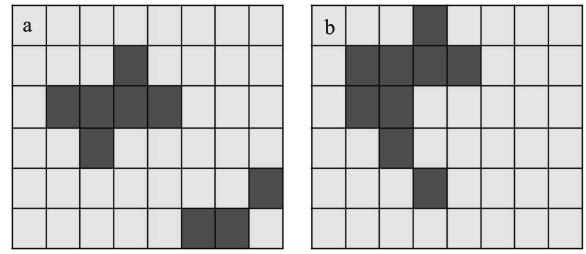
$$\max f_{\text{goal}} = f_{\text{ci}}^{k_e} \times \left[ \sum_{k=1}^m f_{\text{eco}}(k) / m \right] \times f_{\text{mod\_dist}}^{k_d} \quad (7)$$

相同的  $f_{\text{dist}}$  在栅格空间里可以表现出不同的空间聚集形态, 这在空间分布格局的形态评估中有重要意义。如图 1 所示, 两个相同的栅格空间中均有 9 个栅格单元(红色表示), 在空间中组成不同的空间分布格局。在随机条件下二者的理论平均距离相同, 最邻近距离均约为 1.046。由式 3 可知, 图 1a、b 的最邻近距离指数相等。

3) 空间紧凑度。空间紧凑度是一种用于度量地物形态信息的重要指标<sup>[35,37]</sup>。目前常用于城市空间形态的评价。一个空间分布格局较为紧凑的生态用地更加有利于区域生态环境保护。

$$f_{\text{ci}} = \frac{2\sqrt{\pi \times A}}{P} \quad (8)$$

其中,  $P$  表示斑块的周长,  $A$  表示斑块的面积。  $f_{\text{ci}}$  表示空间紧凑度, 介于 0~1 之间, 其值越大, 斑块的



a. 分散型; b. 紧凑型

图 1 相同最邻近距离指数值的两种不同空间分布格局

Fig.1 Two different spatial distribution patterns with the same NNI index

空间形态越紧凑。

因此, 将目标函数(式 7)修改为:

$$\max f_{\text{goal}} = \left[ \frac{2\sqrt{\pi \times A}}{P} \right]^{k_e} \times \left[ \sum_{k=1}^m f_{\text{eco}}(k) / m \right]^{k_e} \times f_{\text{mod\_dist}}^{k_d} \quad (9)$$

### 1.3 模型结构设计

1) 定义蚂蚁结构体。定义蚂蚁结构体数组  $\text{Ant}[]$ , 存储蚂蚁的属性信息, 包括: 蚂蚁坐标位置、蚂蚁适应性值等。每次迭代后, 蚂蚁结构体数组随着禁忌矩阵动态更新信息。

2) 禁忌表和禁忌矩阵设计。禁忌表  $\text{Taboo}$  是蚁群算法的一个重要机制。在本模型中,  $\text{Taboo}$  记录蚁群所占的栅格位置。设计了蚂蚁禁忌矩阵  $\text{Taboo Matrix}$ , 该矩阵大小为栅格空间的行列数, 该矩阵可以实现蚂蚁禁忌位置与栅格空间的快速映射, 使蚂蚁在解空间搜索和计算时无需再次遍历禁忌表即可明确禁忌位置, 提升了搜索效率。禁忌矩阵根据蚂蚁禁忌表在栅格空间存储蚂蚁的位置, 用“-1”表示该位置被蚂蚁所占据。

3) 空间位置选择策略。模型通过转移概率公式计算蚂蚁到每一个可选栅格(该可选栅格, 通过  $\text{taboo Matrix}$  获得)的概率。转移概率公式如下:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{[i,j] \in \text{allowed}_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, & [i,j] \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $p_{ij}^k(t)$  表示蚂蚁  $k$  在第  $t$  次迭代中, 选择栅格空间位置  $[i,j]$  的概率;  $\tau_{ij}(t)$  表示第  $t$  次迭代中在位置  $[i,j]$  遗留的信息素;  $\eta_{ij}$  表示在位置  $[i,j]$  上的启发信息, 在这里定义  $\eta_{ij} = f_{\text{eco}}(i,j)$ , 表示蚂蚁选择栅



格位置的期望;  $\alpha$  为信息素启发式因子, 表示蚂蚁在栅格空间已积累的信息素对蚂蚁下一次选择选择所起的作用<sup>[14,15]</sup>, 蚂蚁倾向于选择信息素浓度高的栅格位置;  $\beta$  为期望启发式因子, 表示启发信息在蚂蚁选择栅格位置的受重视程度;  $allowed_k$  为表示蚂蚁  $k$  的允许选择的栅格空间。最后, 模型通过轮盘赌(Roulette Wheel Selection)方法最终确定蚂蚁的下一个栅格位置。

在迭代过程中, 可能有些蚂蚁所选位置已经非常优越, 如果再次选择其它位置未必能有当前位置好。所以在禁忌策略中规定, 蚂蚁在下一步位置选择中, 还可以继续选择其自身的位置。转移概率公式是一种概率选择方法, 在选择过程具有较大的随机性, 不能保证蚂蚁一定能找到更优的位置。因此, 在获得候选位置后, 模型采取精英策略, 对精英蚂蚁采用贪婪算法(Greedy selection)来确定最终位置。

为了提高运算效率, 降低程序的时间复杂性。在对算法结构进行优化的同时, 也有必要牺牲一些算法准确性, 来降低时间复杂性。由于蚂蚁算法的适应性、自组织性和鲁棒性, 算法也不会因为某些蚂蚁的概率选择误差选择而导致无法找到满意的解, 在经过相当次数迭代后, 必然会找到全局最优解。

4) 信息素更新扩展策略。Dorigo 在 1996 年提出 Ant-cycle、Ant-Quantity、Ant-Density 3 种不同的蚁群算法模型<sup>[33]</sup>, 其中, Ant-cycle 类型利用的是蚂蚁的整体信息, 当蚂蚁完成一个循环之后, 更新所有路径上的信息素<sup>[54]</sup>。相关实验表明, Ant-cycle 模型比后两者的性能要好很多, 研究采用 Ant-cycle 模型作为基本模型。在本研究中, 将信息素的更新扩展为对栅格空间的每个栅格点位置  $[i, j]$  的信息素更新。在每次循环之后对整个栅格空间的信息素进行更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \rho \times \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (11)$$

式中,  $\tau_{ij}(t+1)$  表示更新后的栅格空间位置  $[i, j]$  的信息素;  $\tau_{ij}(t)$  表示更新前的栅格空间位置  $[i, j]$  的信息素;  $\sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$  表示在本次循环中栅格  $[i, j]$  上的信息素增量;  $\rho \in (0, 1)$ , 表示信息素挥发系数。

由于邻域空间存在相关性, 蚂蚁在选择候选

位置时, 候选位置的邻域状态往往也非常接近<sup>[23,24]</sup>。为了增强蚂蚁对邻域栅格影响力, 研究在信息素更新时采用信息素扩散机制<sup>[55]</sup>, 对蚂蚁的  $3 \times 3$  邻域栅格同时进行信息素更新。

以蚂蚁  $k$  为中心, 考虑信息素随  $3 \times 3$  邻域衰减。则信息素更新公式如下<sup>[36,50]</sup>:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q \cdot f_{\text{goal}}}{[d_{\Omega}(i, j) + 1]}, & \text{在蚂蚁 } k \text{ 所在位置所在区域 } \Omega \text{ 内} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $d_{\Omega}(i, j)$  表示以蚂蚁  $k$  所在目标栅格到  $3 \times 3$  邻域栅格  $[i, j]$  的欧氏距离;  $Q$  为蚂蚁信息素强度;  $f_{\text{goal}}$  为目标函数。

#### 1.4 模型计算流程

模型的计算流程如图 2 所述。

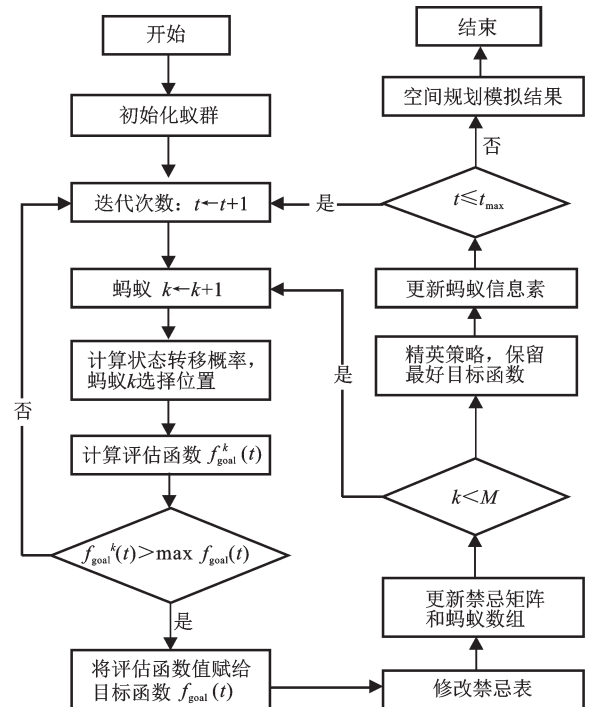


图 2 模型计算流程

Fig.2 The model calculation flow

Step1: 初始化蚂蚁种群和各参数, 建立禁忌表和禁忌矩阵, 并计算初始目标函数值。

Step2: 迭代次数  $t \leftarrow t + 1$ 。

Step3: 蚂蚁  $k \leftarrow k + 1$ 。

Step4: 计算蚂蚁相对适应性值, 根据式 10 选择第  $k$  个蚂蚁的栅格位置  $[i, j]$ , 且  $[i, j] \in allowed_k$ 。

Step5: 计算评估目标函数  $f_{\text{goal}}^k(t)$ 。如果

$f_{\text{goal}}^k(t) > \max f_{\text{goal}}(t)$ , 采用贪婪算法 (Greedy selection),  $\max f_{\text{goal}}(t) = f_{\text{goal}}^k(t)$ , 同时更新禁忌表、禁忌矩阵和蚂蚁对象数组。

Step6: 如果蚂蚁  $k < M$  ( $M$  为蚂蚁总量), 跳转至 Step3, 否则执行 Step7。

Step7: 获得当前目标函数  $f_{\text{goal}}(t)$ 。根据式 11 和式 12, 更新栅格空间信息素。

Step8: 如果满足结束条件, 即当循环次数为  $t \leq t_{\text{max}}$ , 则循环结束, 并输出栅格空间的聚类结果。否则, 跳转至 Step2, 直到满足结束条件。

## 2 模型测试与分析

在 UELPM 模型应用之前需对模型进行数据测试。研究利用两组数据对模型的有效性进行测试。第 1 组数据是常量栅格数据, 常量等于 0.5。第 2 组测试数据, 设计十字型区域为均质的高值区域, 十字型区域外是所在单元距离十字型区域的最短距离。两组数据均为  $150 \times 100$  的栅格数据, 并经过归一化处理。

### 2.1 测试实验一

第 1 组数据是常量栅格数据, 用于测试蚁群随机聚集的空间分布情况。目标函数分别只考虑最邻近距离指数 (NNI) 和空间紧凑度指数 (CI)。测试在常量栅格均质空间条件下, 各指数对蚂蚁聚集形态的性能影响和指数变化规律。设置蚂蚁数量为 500, 参数见表 1 所示。模拟过程及结果见图 3。

表 1 实验一参数设置

Table 1 Parameter setting for experiment one

参数	第 1 组参数	第 2 组参数
最邻近距离指数	1	0
空间紧凑度指数	0	1
信息素强度	50	50
初始信息量	20	20
挥发系数	0.3	0.3
信息因子	4	4
期望因子	4	4
迭代次数	1500	1500

在参数一情况下, 模型迭代 1 500 次, NNI 指数为 0.818, CI 指数为 0.207。在参数二的情况下, 模型迭代 1 500 次, NNI 指数为 0.816, CI 指数为 0.223。

对实验一结果分析如下:

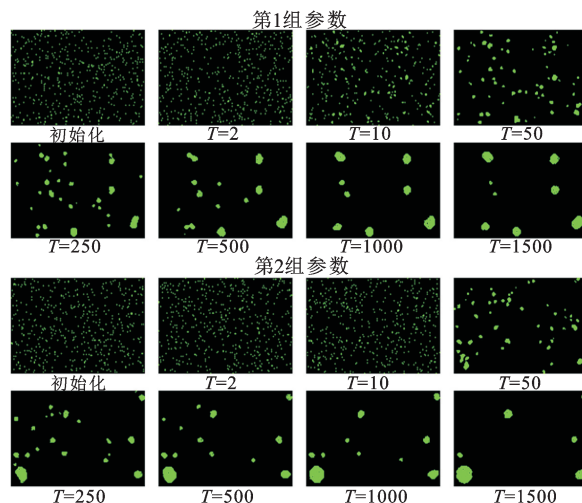


图 3 常量栅格空间蚂蚁分布格局模拟

Fig.3 Simulation of ants distribution pattern in constant grid space

1) 在均质栅格空间下, 由于蚂蚁在各个方向上所受启发信息相同, 蚂蚁空间聚集分布主要由遗留信息素决定, 在图 3 中我们可以看到两组参数下的空间聚集分布完全不同 (图 3)。可见, 在均质栅格空间下蚂蚁分布表现了很强的随机性。

2) 在考虑 NNI 指数情况下, 聚集斑块较多, NNI 指数为 0.368, 呈集聚分布。在只考虑 CI 指数情况下, 聚集块较少, CI 指数为 0.223, 分布格局更加集中。说明 NNI 指数有利于形成较为分散的空间聚集分布格局, CI 指数有利于形成较为集中的空间聚集分布格局。

3) 在均质空间条件下, 在考虑 NNI 指数下, NNI 指数收敛速度非常快, 曲线较为稳定。而在 CI 指数下, CI 指数收敛速度较慢, 收敛曲线变化较不稳定。

### 2.2 测试实验二

第 2 组数据用于测试模型寻找全局近似最优解的性能, 分析 NNI 指数和 CI 指数对空间分布格局形成所产生的影响, 测试数据的十字区域内共有 270 个栅格。因此, 设置蚂蚁数量为 270, 设置参数见表 2。实验二的模拟过程及结果如图 4 所示。

第 1 组参数实验: 模型考虑了生态适宜性权重, 迭代次数为 1 500 次, 在 320 次左右目标函数曲线显示基本达到收敛状态, 目标函数值达到 0.996 1, 非常接近于 1.0。这说明 270 个蚂蚁几乎全部落入十字架区域栅格内 (图 3)。NNI 指数曲线在迭代了 520 次左右也基本达到收敛状态。CI 指数收

表2 实验二参数设置表

Table 2 Parameter setting for experiment two

参数	第1组参数	第2组参数	第3组参数
生态适宜性	1	1	1
最邻近距离指数	0	1	0
紧凑度指数	0	0	1
信息素强度	20	20	15
初始信息量	50	5	50
挥发系数	0.2	0.2	0.2
信息因子	4	5	3
启发因子	3	2	3
迭代次数	1500	1500	3500

收敛速度较慢,在迭代了1 400次左右才基本达到收敛,左右其曲线状态波动较明显,最终指数值达到0.4左右。

第2组参数实验:模型考虑了生态适宜性和NNI指数。模型迭代了1 500次。观察图3发现蚂蚁除在中心形成了十字架形状以外,在其外侧分布了蚂蚁,蚂蚁越接近中心区域,聚集程度也越高。模型在迭代了880次左右,目标函数已经基本达到收敛状态,此时的CI指数维持在0.1的较低水平。

第3组参数实验:模型考虑了生态适宜度和CI指数。模型迭代了3 500次,在迭代580次左右目标函数曲线基本达到收敛状态。图3所示,在生态适宜性和CI指数约束下,蚂蚁形成了一个更加紧

凑和收缩的十字架形状。目标函数大约在迭代800次左右,曲线达到收敛状态,目标函数值大约达到0.6。

对实验二的结果分析如下:

1) 模型只考虑生态适宜性时,蚂蚁几乎全部落入十字区域范围,显示出较强的全局最优值寻找性。

2) NNI指数和CI指数均对空间格局均有显著影响。

3) 对NNI指数和CI指数进行组合构建多目标函数,可以实现增强中心区域的集中聚集,也可以兼顾周边区域的分散聚集格局。

以上两组实验表明,模型表现出优异空间聚集效果和全局寻优能力,通过不同指数组合可以形成多种空间聚集形态,为解决城市空间规划问题提供了灵活、有效的模型实现手段。

### 3 模型应用与分析

#### 3.1 研究区和数据

选择广州市主城区作为研究区,包括海珠、黄埔、荔湾、越秀、天河、番禺、白云、萝岗、花都、南沙等10个区,涵盖面积36 17.35 km<sup>2</sup>。研究采用层次分析法获得自然因素、社会因素和生态保护因素权重,权重分别为0.352、0.287、0.361,获得了2009年的广州市生态用地适宜性数据,利用GIS软件生成2009年广州市生态用地适宜性栅格图层,格网大小设置为300 m。

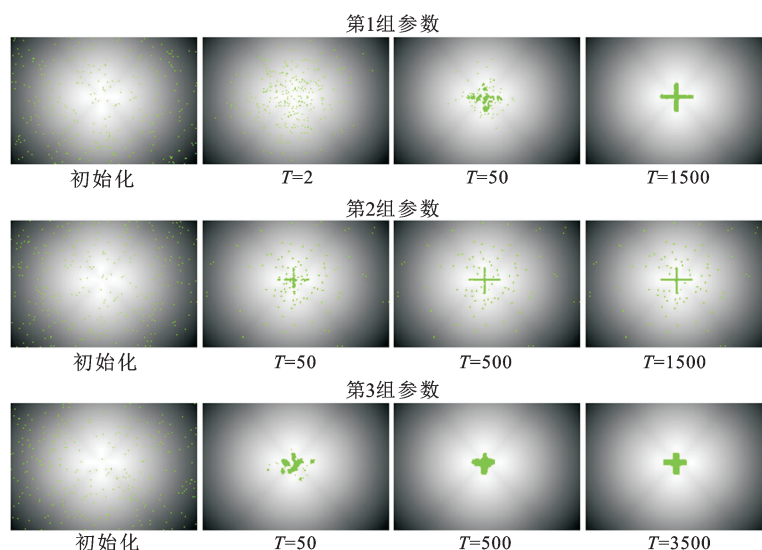


图4 十字型栅格空间中的蚂蚁分布格局模拟

Fig.4 Simulation of ants distribution pattern in cross type grid space



3.2 结果与分析

根据《广州城市总体规划:2010~2020》和《广州市城市绿地系统规划(2001~2020)》,广州市基本生态控制线规划规模为2 111.3 km<sup>2</sup>,约占广州市总面积的50%左右。本研究照此规模大小,分别模拟城市生态用地占广州市总面积在50%,30%,15%情景下,城市生态用地的空间分布格局。利用ArcGIS获取数据有效栅格量为40 191个,城市生态用地占其面积的50%,30%,15%,其栅格量分别约为20 096、12 057、6 028。蚂蚁数量分别设置为以上数值,设置模型参数权重如表3所示。城市生态用地的规划模拟结果见图5。

表3 城市生态用地规划模型参数

Table 3 Parameters of UELPM

参数设置	参数(50%)	参数(30%)	参数(15%)
生态适宜性权重	1	1	1
空间聚集度权重	1	1	1
信息素强度	50	50	50
初始信息量	20	20	20
挥发系数	0.2	0.3	0.3
信息因子	4	4	4
期望因子	5	4	4
迭代次数	6 000	1 000	1 000

为了能更好的评价城市生态用地模拟空间分布情况,利用模拟结果的平均适宜性、NNI指数和

CI指数来比较不同模拟情景下的城市生态用地规划方案效果(表4)。

由表4可知,城市生态用地占总面积比例越小,目标函数值越高,相关指数较高。城市生态用地斑块较少,形态比较紧凑。随着占总面积比例越来越大,目标函数值越来越小,相关指数也逐渐降低。城市生态用地的斑块越来越多,形态也越来越分散。

由图4可知,占地15%情景,城市生态用地规划范围主要分布于花都北部和白云东部山区,以及在花都区中部以西和南沙黄阁镇南部也有小块分布;占地30%情景,城市生态用地在15%的基础上进一步扩大,特别是在花都中西部地区、天河、黄埔等地,在15%的基础上扩大形成了连片的城市生态用地。另外,在流溪河流域以及番禺、海珠等出也出现城市生态用地的零星分布。占地50%情景,城市生态用地进一步扩大,尤其在花都的西部地区,城市生态用地形成连片分布,流溪河的整个流域基本被划入城市生态用地,越秀区的流花湖、海珠区的万亩果园、二沙岛、中山大学部分等地被划入生态用地。在南沙东部地区也形成了大片城市生态用地。

为了验证空间模拟结果与广州市生态控制线<sup>①</sup>边界范围的空间一致性,将规划生态控制线配准和空间矢量化。通过Kappa系数进行分析,计算结果表明,空间模拟结果的Kappa系数为0.305,两

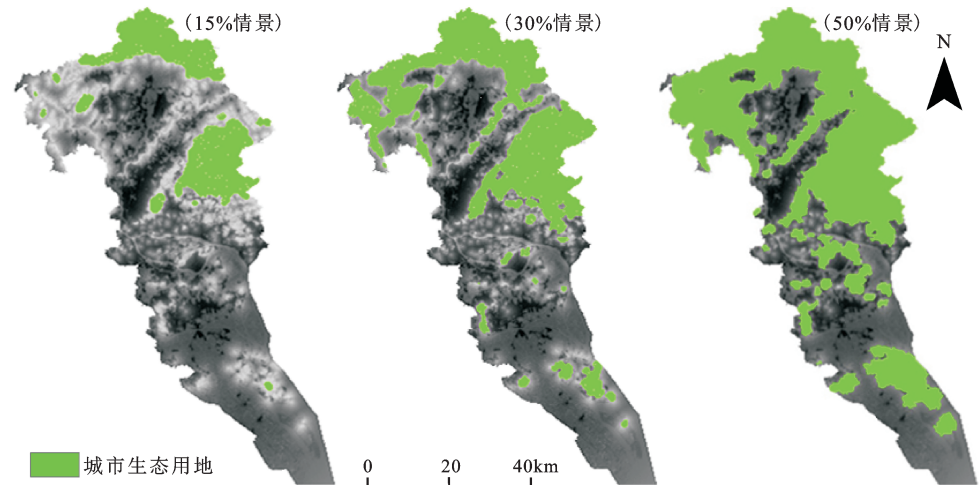


图5 城市生态用地模拟过程和结果

Fig.5 Simulation process and results of urban ecological land use

① 广州市城市规划勘测设计研究院.广州市城市绿地系统规划.2011.

表4 不同模拟情景指数

模拟情景	平均生态适宜性	NNI指数	CI指数
15%情景	0.710	0.631	0.185
30%情景	0.680	0.501	0.124
50%情景	0.647	0.391	0.092

者具备一般一致性,这说明城市生态用地空间模拟的分布与生态控制线的空间分布总体上具有一定的吻合度,但是一致性程度南北具备较大空间分异特点。在广州北部地区(海珠区以北,包括海珠区),空间模拟结果的Kappa系数为0.478,具备中等一致性,两者吻合度较高。北部地区城市生态用地主要为森林、自然保护区、山体和农田连片区,吻合程度较好,差异部分主要是在炭步镇以北地区的大片山体(空间模拟结果)、白云机场东南部的部分农业用地(规划生态控制线),可能是由于适宜性评价以及不同因子权重的原因导致。在广州南部的南沙、番禺两区,空间模拟结果与规划生态控制线范围有较大差异。究其原因,是因为南沙、番禺区域内存在较大面积的水体和湿地,在规划中考虑了重要水体和湿地保护的因素,将其纳入城市生态控制线的范围。此外,规划中划定的大量网状生态廊道也对模拟结果的一致性有一定影响。

分别计算了规划生态控制线的平均适宜性值、NNI指数、CI指数,与空间模拟结果对比如表5所示。

表5 指标结果比较

对比类型	平均适宜度	NNI指数	CI指数
空间模拟结果	0.647	0.391	0.092
规划生态控制线	0.624	0.359	0.069

由表5可知,空间模拟结果的平均适宜度为0.647,而规划生态控制线的平均适宜度为0.624。说明空间模拟结果可以更好地保护整体生态效益。空间形态方面的指数NNI及CI,空间模拟结果分别为0.391和0.092,而规划生态控制线的NNI和CI分别为0.359和0.069。这说明空间模拟结果的在空间集约性、紧凑性等方面比规划生态控制线表现要好。通过3个指标结果比较,可以看到空间模拟结果均优于规划生态控制线。说明了本模

型在城市生态用地的整体规划效果要优于传统方法划定的规划生态控制线。

4 结论

合理规划和保护城市生态用地是解决城市生态环境问题的有效途径,对于维持城市的生态系统健康和平衡,确立城市生态安全格局和城市未来的空间拓展方向,具有重要的战略意义。本文提出了基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型(Urban Ecological Land Plan Model, UELPM),对蚁群优化算法的空间禁忌策略、选择策略进行了改进,在规划目标函数中引入了生态适宜性、空间紧凑性和最邻近距离指数,并设计了最邻近距离指数的栅格计算方法。以广州市为例,对广州市城市生态用地进行了空间模拟和优化,得到了城市生态用地的空间模拟范围。

研究表明:基于蚁群优化算法的UELPM模型可以根据不同规划目的和要求设置相应的目标函数和空间约束条件,合理地对城市生态用地的空间布局进行配置,明显提高了城市生态用地生态效益和空间集约性,促进了城市生态环境的协调和城市的可持续发展。与规划生态控制线方案相比,空间模拟结果的平均适宜度、空间紧凑度和最邻近距离指数等指标得到明显提升,各项指标均优化传统方法划定的规划生态控制线。研究能为城市生态用地规划提供有意义的科学依据和参考,在城市规划工作中具有广阔的应用空间和前景。后续研究将探讨城市发展空间与城市生态用地的空间协调问题,在模型框架中引入多种空间规划目标和约束条件,进一步使模型实用化。

参考文献(References):

[1] 吕建树,吴泉源,张祖陆,等. 基于RS和GIS的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. 地理科学, 2012,32(8): 928-935.[Lyu Jianshu, Wu Quanyuan, Zhang Zulu et al. Land use change and ecological security assessment in Jining city based on RS and GIS. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 928-935.]

[2] 张杨,刘艳芳,顾渐萍,等. 武汉市土地利用覆被变化与生态环境效应研究[J]. 地理科学,2011,31(10):1280-1285.[Zhang Yang, Liu Yanfang, Gu Jianping et al. Land use/land cover change and its environmental effects in Wuhan city. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(10): 1280-1285.]

[3] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. 生态学报,2009,29(3):1189-1204.[Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua et al. The function of ecological security patterns



- as an urban growth framework in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(3):1189-1204.]
- [4] 张林波,李伟涛,王维,等. 基于GIS的城市最小生态用地空间分析模型研究——以深圳市为例[J]. 自然资源学报, 2008,23(1): 69-78.[Zhang Linbo, Li Weitao, WangWei et al. Research on space modeling for minimum urban ecological land based on GIS: A Case in Shenzhen. *Journal of Natural Resources*, 2008,23(1): 69-78.]
- [5] 岳健,张雪梅. 关于我国土地利用分类问题的讨论[J]. 干旱区地理, 2003,26(1):78-88.[Yue Jian, Zhang Xuemei. A discussion on classification of land use in China. *Arid Land Geography*, 2003,26(1):78-88.]
- [6] 邓小文,孙貽超,韩士杰. 城市生态用地分类及其规划的一般原则[J]. 应用生态学报,2005,16(10): 2003-2006.[Deng Xiaowen, Sun Yichao, Han Shijie. General principles of urban ecological land classification and planning. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005,16(10):2003-2006.]
- [7] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010,34(2): 19-24. [Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua et al. Ecological baseline for beijing's urban sprawl: Basic ecosystem services and their security patterns. *City Planning Review*, 2010,34(2): 19-24.]
- [8] 刘孝富,舒俭民,张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.[Liu Xiaofu, Shu Jianmin, Zhang Linbo. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: As an example of Xiamen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 421-428.]
- [9] 李晖,易娜,姚文璟,等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报, 2011,31(20): 5928-5936.[Li Hui, Yi Na, Yao Wenjing et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(20): 5928-5936.]
- [10] 周锐,苏海龙,钱欣,等. 城市生态用地的安全格局规划探索[J]. 城市发展研究,2014,21(6): 21-27.[Zhou Rui,Su Hailong,Qian Xin et al. Exploration of urban ecological land planning method based on ecological security pattern. *Urban Development Studies*, 2014,21(6): 21-27.]
- [11] 岳晨,崔亚莉,饶戎,等. 基于生态规划的长春市土地生态适宜性评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 318-322.[Yue Chen, Cui Yali, Rao Rong et al.Evaluation on ecological applicability of land in changchun City based on ecological planning. *Research of Soil And Water Conservation*, 2016, 23(2): 318-322.]
- [12] 王海鹰,张新长,康停军. 基于GIS的城市建设用地适宜性评价理论与应用[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 14-17. [Wang Haiying, Zhang Xinchang, Kang Tingjun. Theory and application of evaluation on ecological applicability for urban construction land based on GIS. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(1): 14-17.]
- [13] 杨轶,赵楠琦,李贵才. 城市土地生态适宜性评价研究综述[J]. 现代城市研究,2015,(4): 91-96.[Yang Yi, Zhao Nanqi, Li Guicai. Study on urban land ecological suitability assessment. *Modern Urban Research*, 2015,(4): 91-96.]
- [14] 陈燕飞,杜鹏飞,郑筱津,等. 基于GIS的南宁市建设用地生态适宜性评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(6): 801-804.[Chen Yanfei, Du Pengfei, Zheng Xiaojin et al. Evaluation on ecological applicability of land construction in Nanning city based on GIS. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2006, 46(6): 801-804.]
- [15] 邱从毫,李阳兵,冯元嵩. 贵阳市城市土地扩展空间的生态适宜性与优化[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2777-2784.[Qiu Conghao, Li Yangbing, Feng Yuansong. Ecological suitability assessment and optimization of urban land expansion space in Guiyang City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2777-2784.]
- [16] 杨少俊,刘孝富,舒俭民.城市土地生态适宜性评价理论与方法[J]. 生态环境学报,2009,18(1):380-385.[Yang Shaojun, Liu Xiaofu, Shu Jianmin. Urban land ecological suitability assessment: Theories and methods. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009,18(1): 380-385.]
- [17] Li F, Ye Y, Song B et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: A case study from Changzhou, China[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 194-203.
- [18] 郭微,俞龙生,孙延军,等. 佛山市顺德中心城区城市绿地生态网络规划[J]. 生态学杂志,2012,31(4): 1022-1027.[Guo Wei, Yu Longsheng, Sun Yanjun et al. Ecological network planning of urban green space in urban center of Shunde District, Foshan City, Guangdong Province of South China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012,31(4): 1022-1027.]
- [19] 刘滨谊,王鹏. 绿地生态网络规划的发展历程与中国研究前沿[J]. 中国园林, 2010,(3):1-5.[Liu Binyi, Wang Peng. Green Space Ecological Network Planning: Evolution and Research Frontier in China. *Chinese Landscape Architecture*, 2010,(3): 1-5.]
- [20] 陈小平,陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. 应用生态学报,2016,27(5): 1611-1618.[Chen Xiaoping, Chen Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611-1618.]
- [21] Yu D, Xun B, Shi P et al. Ecological restoration planning based on connectivity in an urban area[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 24-33.
- [22] Qiang Yu A D Y A J, Jinxing Chen A N L A. The optimization of urban ecological infrastructure network based on the changes of county landscape patterns a typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou (Inner Mongolia) [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*(2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.014>.
- [23] 赵元,张新长,康停军. 并行蚁群算法及其在区位选址中的应用[J]. 测绘学报,2010, 39(3): 322-327. [Zhao Yuan, Zhang Xinchang, Kang Tingjun. A Parallel Ant Colony Optimization Algorithm for Site Location. *Acta geodactica et Cartographica Sinica*, 2010,39(3):322-327.]

- [24] 赵元,张新长,康停军. 多叉树蚁群算法及在区位选址中的应用研究[J]. 地理学报, 2011, 66(2): 279-286. [Zhao Yuan, Zhang Xinchang, Kang Tingjun. A Multi-way Tree Ant Colony Optimization Algorithm for Site Location. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(2):279-286.]
- [25] Fathali M. A genetic algorithm for the p-median problem with pos/neg weights[J]. *Applied Mathematics And Computation*, 2006, 183(2): 1071-1083.
- [26] Mladenovic N, Brimberg J, Hansen P et al. The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(3): 927-939.
- [27] Brookes C J. A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 15(6): 539-559.
- [28] Aerts J, Heuvelink G. Using simulated annealing for resource allocation[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(6): 571-587.
- [29] Lockwood C, Moore T. Harvest scheduling with spatial constraints: A simulated annealing approach[J]. *Canadian journal of forest research*, 1993, 23(3): 468-478.
- [30] Zhou P, Deng Q S. Hybridizing Fast Taboo Search with Ant Colony Optimization Algorithm for Solving Large Scale Permutation Flow Shop Scheduling Problem[C]// Lin Tsauyoung, Hu Xiaohua, Xia Jiali et al. *IEEE International Conference on Granular Computing*, Grc 2009. CA, United States: Los Alamitos, 2009.
- [31] Bettinger P, Sessions J, Boston K. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 94(2): 111-123.
- [32] Dorigo M G L M J. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 1991, 1(1): 53-56.
- [33] Dorigo M M V C A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agent[J]. *IEEE Transactions on Systems*, 1996, 26(1): 29-41.
- [34] Dorigo M S T. *Ant Colony Optimization*[M]. Cambridge, Massachusetts London, England: The MIT Press., 2004.
- [35] 黎夏. 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M].北京:科学出版社,2007. [Li Xia. *Geographical Simulation Systems: Cellular Automata and Multi-agent Systems*. Beijing: Science Press, 2007.]
- [36] 黎夏,刘小平,李少英. 智能式 GIS 与空间优化[M]. 北京:科学出版社, 2010. [Li Xia, Liu Xiaoping, Li Shaoying. *Intelligent type of GIS and spatial optimization*. Beijing: Science Press, 2010.]
- [37] 黎海波,黎夏,刘小平,等. 多目标粒子群算法与选址中的形状优化[J]. 遥感学报,2008,12(5): 724-733. [Li Haibo, Li Xia, Liu Xiaoping et al. Particle-Swarm Optimization for Site Selection with Contiguity Constraints. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(5): 724-733.]
- [38] 胡海龙,曾永年,张鸿辉,等. 多智能体与蚁群算法结合选址模型:长沙市生态用地选址[J]. 资源科学,2011,33(6): 1211-1217. [Hu Hailong, Zeng Yongnian, Zhang Honghui et al. Integration of a Site Selection Model with the Multi-Agent System and the Ant Colony Algorithm and Its Application to Changsha. *Resources Science*, 2011,33(6): 1211-1217.]
- [39] 胡海龙. 多智能体城市生态用地选址模型及其应用[D]. 长沙:中南大学,2011. [Hu Hailong. *Multi-Agent urban ecological land allocation model and application*. Changsha: Central South University, 2011.]
- [40] 何晋强,黎夏,刘小平,等. 蚁群智能及其在大区域基础设施选址中的应用[J]. 遥感学报, 2009, 13(2): 246-256. [He Jinqiang, Li Xia, Liu Xiaoping et al. Ant colony algorithms for optimal site selection in large regions. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(2): 246-256.]
- [41] 马世发,何建华,俞艳. 基于粒子群算法的城镇土地利用空间优化模型[J]. 农业工程学报,2010,26(9): 321-326. [Ma Shifa, He Jianhua, Yu Yan. Model of urban land-use spatial optimization based on particle swarm optimization algorithm. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 321-326.]
- [42] 赵方胤. 土地利用规划中城市土地多目标空间优化配置模型及其求解算法研究[D]. 济南:山东师范大学, 2012. [Zhao Fangyin. *The urban land multi-objective optimal allocation model and its algorithm in land use planning*. Jinan: Shandong Normal University, 2012.]
- [43] 袁满,刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J]. 农业工程学报,2014,30(1): 191-199. [Yuan Man, Liu Yaolin. Land use optimization allocation based on multi-agent genetic algorithm. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(1): 191-199.]
- [44] Liu Y, Tang W, He J et al. A land-use spatial optimization model based on genetic optimization and game theory[J]. *Computers Environment And Urban Systems*, 2015, 49: 1-14.
- [45] Liu Y, Yuan M, He J et al. Regional land-use allocation with a spatially explicit genetic algorithm[J]. *Landscape And Ecological Engineering*, 2015, 11(1): 209-219.
- [46] 张云鹏,孙燕,陈振杰. 基于多智能体的土地利用变化模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(4): 255-265. [Zhang Yunpeng, Sun Yan, Chen Zhenjie. Simulation of land use change using multi-agent model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(4): 255-265.]
- [47] 全泉,田光进,沙默泉. 基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟[J]. 生态学报,2011, 31(10): 2875-2887. [Quan Quan, Tian Guangjin, Sha Moquan. Dynamic simulation of Shanghai urban expansion based on multi-agent system and cellular automata models. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2875-2887.]
- [48] 康停军,张新长,赵元,等. 基于多智能体的城市人口分布模型[J]. 地理科学,2012,32(7): 790-797. [Kang Tingjun, Zhang Xinchang, Zhao Yuan et al. Agent-based Urban Population Distribution Model. *Scientia Geographica Sinica*, 2012,32(7): 790-797.]
- [49] 张鸿辉,王丽萍,金晓斌,等. 基于多智能体系统的城市增长时空动态模拟——以江苏省连云港市为例[J]. 地理科学,2012, 32(11): 1289-1296. [Zhang Honghui, Wang Liping, Jin Xiaobin et al. Simulation of spatio-temporal dynamical change of urban

- growth based on Multi-Agent System: Case study of Lianyungang city, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(11): 1289-1296.]
- [50] Xia Li C L X L. Coupling urban cellular automata with ant colony optimization for zoning protected natural areas under a changing landscape[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(4): 575-593.
- [51] Lin J, Li X. Conflict resolution in the zoning of eco-protected areas in fast-growing regions based on game theory[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170: 177-185.
- [52] Liu X, Lao C, Li X et al. An integrated approach of remote sensing, GIS and swarm intelligence for zoning protected ecological areas[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(3): 447-463.
- [53] 王劲峰. 空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [Wang Jinfeng. *Spatial Analysis*. Beijing: Science Press, 2006.]
- [54] 段海滨, 张祥银, 徐春芳. 仿生智能算法[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Duan Haibin, Zhang Xiangyin, Xu Chunfang. *Bionic intelligence algorithms*. Beijing: Science Press, 2011.]
- [55] 黄国锐, 曹先彬, 王煦法. 基于信息素扩散的蚁群算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(5): 865-868. [Huang Guorui, Cao Xianbin, Wang Xufa. An ant colony optimization algorithm based on pheromone diffusion. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(5): 865-868.]

## The Spatial Planning Model of Urban Ecological Land Based on Ant Colony Optimization Algorithm

Wang Haiying<sup>1,2</sup>, Qin Fen<sup>1,2</sup>, Zhang Xinchang<sup>3</sup>, Zhang Chuancai<sup>4</sup>, Li Peijun<sup>1</sup>

(1. *College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China*; 2. *Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Regions/Henan University, Ministry of Education, Kaifeng 475004, Henan, China*; 3. *School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China*; 4. *College of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China*)

**Abstract:** Urban ecological land plan in cities is an important foundation and premises for the protection of urban ecosystem. Rational planning and protection of the land for ecological use is an effective way to address ecological environment problem. In addition, they are also of strategic importance to safeguard the health and balance of ecosystem, and to establish ecological security pattern and spatial extension in cities. Ecological land plan does not only require the guarantee of index area and target amount, it also involves the insurance of a series of spatial objectives and limitation such as maximization of ecological interests, the integrity, intensiveness and compactness of ecological land, and urban spatial development. This article will propose Urban Ecological Land Plan Model (UELPM) based on Ant Colony Optimization. The article makes improvements in the taboo strategy, site selection mechanism. Additionally, it introduces the ecological suitability, spatial compactness and the index of nearest neighbor distance in the process of establishing plan objectives function. Furthermore it designs Trellis Algorithm of the nearest neighbor distance index. For instance, Guangzhou simulates its ecological land plan in different situation when ecological land takes up 15%, 30% and 50% of the city's total area, which has achieved satisfying result. According to the research, UELPM which based on Ant Colony Optimization can not only set up objectives function and spatial limitations in line with different plan destinations and requirements, but also reasonably allocate the spatial distribution of ecological land. Compared to the scheme of plan ecological control line, the average suitability, spatial compactness and the nearest neighbor distance index are greatly improved in accordance with the spatial simulation result. In addition, all other indexes are superior to the traditional method like plan ecological control line. Therefore, it is meaningful to provide scientific support and reference to urban ecological land use and it also can find itself broad application prospect.

**Key words:** Ant colony Optimization Algorithm; urban ecological land; spatial planning model