

Pareto蚁群算法与遥感技术耦合的水资源优化配置

侯景伟^{1,2}, 孔云峰², 孙九林³

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004;

3. 中国科学院 地理科学与自然资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为了尝试用Pareto蚁群算法(PACA)和遥感技术(RS)来求解复杂的水资源优化配置问题, 建立了以经济、社会和生态环境综合效益最大为目标, 以供水、需水、水质等为约束条件的基于像元的水资源优化配置模型. 通过局部信息素强度限制、全局信息素动态更新、Pareto解集过滤器构建等策略, 使蚂蚁向信息素浓度大的优化边界移动, 以提高PACA的全局搜索能力和收敛速度. 以中原地区某县为仿真对象, 借助RS获取其土地利用类型, 利用PACA在栅格地图上求解水资源优化配置模型, 并得到水资源最优配置方案. 最后PACA与遗传算法(GA)和BP神经网络算法(BP-ANN)进行了比较. 结果表明, PACA能有效地求解大范围、多目标水资源优化配置模型, 并提高了算法的全局搜索能力、收敛速度和计算结果的精度.

关键词: 优化配置; 水资源; 多目标; 遥感; 蚁群算法

中图分类号: TV212.3 **文献标识码:** A

Combination of Pareto ant colony algorithm with remote sensing for optimal allocation of water resources

HOU Jing-wei^{1,2}, KONG Yun-feng², SUN Jiu-lin³

(1. School of Resoucee and Environment, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021, China;

2. College of Environment & Planning, Henan University, Kaifeng Henan 475004, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To solve the optimal allocation problem of water resources with Pareto ant colony algorithm (PACA) and remote sensing (RS), we develop an optimization model in pixel scales. This model produces the largest social, economic, and environmental benefits under constraints on water supply, water demand and water quality. By limiting the local pheromone scope, dynamically updating the global pheromone and filtering the Pareto solution set, we improve the PACA to make ants move towards the optimal border with higher pheromone density, and enhance the global search capability and raise the convergence rate. To validate the feasibility and effectiveness of the PACA, a county in central China is selected as the simulation object, from which the data of the land-use pattern is obtained by using the RS technology. By solving the multi-objective model, we obtain the optimal allocation scheme for water resources with the aid of PACA on a raster map. Performance and convergence of the PACA are compared with those of the genetic algorithm (GA) and BP neural network algorithm (BP-ANN); results show that PACA can effectively solve the large-scale, multi-objective optimization model of water resources with stronger global search capability and higher convergence rate and precision.

Key words: optimal allocation; water resources; multiple objective; remote sense; Pareto ant colony algorithm

1 引言(Introduction)

水资源优化配置是指在一定区域内, 以公平、效率、安全、协调为原则, 以经济、社会和环境最大综合效益为目标, 通过各种措施, 对不同时间和空间的水资源进行协调, 以实现水资源的可持续利用与经济社会的可持续发展. 水资源优化配置对合理利用水资源, 促进人口、资源与环境的协调发展以及工程水利向资源水利的转变、深化和拓展大系统多目标优化理论与方法都有着非常重要的作用.

水资源优化配置模型涉及的多个目标相互影响, 甚至相互冲突, 很难求得使所有目标函数都达到全局最优且满足所有约束条件的解, 而是存在一组Pareto最优解^[1]. 近年来, 智能优化算法在模型求解中得到广泛应用^[2-4], 如遗传算法^[5-6]、粒子群算法^[7-8]、蜂群算法^[9-10]等. 与传统优化算法相比, 智能优化算法是在启发式函数的引导下, 求得近似最优解, 不需要搜索所有方案, 收敛速度较快, 对解决大数据量的优化问题有一定的优势^[11].

在当前比较流行的智能优化算法中, 蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)是一种基于群体的模拟进化仿生学优化算法^[12-14]. 其中Pareto蚁群算法(PACA)是一种多目标蚁群算法^[15], 各条路径上对应的 l 个目标分别有 l 个信息素, 并用信息素向量表示^[16]. PACA具有智能搜索、并行计算、全局优化、强鲁棒性、间接通讯、正反馈机制等优点^[17], 是求解多目标优化问题的有效方法之一. 但是在多目标水资源优化配置研究中, PACA的应用尚不多见^[18]. 因此, 本文尝试用PACA来求解水资源优化配置问题, 并验证PACA在水资源优化配置模型求解中的收敛速度、求解精度以及全局搜索能力.

2 水资源优化配置的数学模型(Mathematical model for optimal allocation of water resource)

2.1 目标函数(Objective function)

水资源优化配置的目标函数包括社会效益、经济效益和生态环境效益. 首先对研究区的TM(thematic mapper)遥感影像进行配准和解译, 获取研究区的土地利用类型; 然后借助相关资料计算各种土地利用类型的需水量; 最后建立基于像元的目标函数. 假设解译后的影像像元有 I 行、 J 列, 共有 L 个像元、 K 个用水行业, 则多目标水资源优化配置的数学模型为

$$f_1(x) = \max \sum_{k=1}^K \{[(e_k^m - v_k^m)x_k^m \alpha_k^m + (e_k^n - v_k^n)x_k^n \alpha_k^n + (e_k^p - v_k^p)x_k^p \alpha_k^p] \beta_k \sigma_k\}, \quad (1)$$

$$f_2(x) = \min \sum_{k=1}^K [D_k - (x_k^m + x_k^n + x_k^p)], \quad (2)$$

$$f_3(x) = \min \sum_{k=1}^K [0.01(x_k^m + x_k^n + x_k^p) \sum_{\varepsilon=1}^{\varepsilon} C_k^\varepsilon O_k^\varepsilon], \quad (3)$$

式中: $f_1(x)$ 为经济效益目标, 以供水像元产生的直接经济效益最大为目标; $f_2(x)$ 为社会效益目标, 以像元总缺水最小为目标; $f_3(x)$ 为生态环境效益目标, 以像元重要污染物的排放量最小为目标, 重要污染物一般包括化学耗氧量(COD_{Cr})、五日生化耗氧量(BOD₅)、溶解氧(DO)、总磷(TP)等; e_k^m, e_k^n, e_k^p 分别为地表水源 m 、地下水水源 n 、外调水源 p 给像元 (i, j) ($i \in [1, I], j \in [1, J]$)的行业 k ($k \in [1, K]$)供水的效益系数(单位: 元/ m^3); v_k^m, v_k^n, v_k^p 分别为水源给像元 (i, j) k 行业供水的费用系数(单位: 元/ m^3); x_k^m, x_k^n, x_k^p 分别为水源给像元 (i, j) k 行业的供水量(单位: m^3); $\alpha_k^m, \alpha_k^n, \alpha_k^p$ 分别为水源的供水次序系数; β_k 和 σ_k 分别为像元 (i, j) k 行业的权重系数和用水公平系数; D_k 为像元 (i, j) k 行业的需水量(单位: m^3); O_k^ε 和 C_k^ε 分别为像元 (i, j) k 行业排放重要污染物 ε 的排放系数和浓度(单位: mg/L).

由于经济效益子目标函数 $f_1(x)$ 是求极大值, 而社会效益子目标函数 $f_2(x)$ 和生态环境效益子目标函数 $f_3(x)$ 都是求极小值, 因此, 为了确定目标函数综合效益最大值 $f_z(x)$, 对 $f_2(x)$ 和 $f_3(x)$ 分别取其负值, 从而把极小化问题转化为极大化问题.

2.2 约束条件(Constraint condition)

$$\sum_{k=1}^K (x_k^m + x_k^n + x_k^p) \leq W, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K x_k^n \leq W_{\max}^n, \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K D_k \geq \sum_{k=1}^K P_k S_k, \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{\varepsilon=1}^{\varepsilon} \frac{\psi_k^\varepsilon D_k^\varepsilon}{D_{\max}^\varepsilon} \geq E_{\min}, \quad (7)$$

式中: 式(4)为可供水量约束, 像元 (i, j) 的可供水量之和不能超过水源工程平均到该像元的最大供水能力 W (单位: m^3); 式(5)为地下水开采量约束, 像元 (i, j) 的地下水开采总量不能超过该像元的地下水可开采量 W_{\max}^n (单位: m^3), $W_{\max}^n > 0$, 如果地下水已经超采, 即 $W_{\max}^n \leq 0$, 那么 $x_k^n = 0$; 式(6)为需水约束, P_k 可根据像元 (i, j) k 的行业类型(生活、工业、农业和生态环境)分别表示规划水平年的预测人口总数、工业总产值、可耕地面积和生态环境预测面积, S_k 分别表示人均生活用水标准、万元产值耗水量、耕地灌溉定额和生态环境用水标准; 式(7)为水环境综合评价指数约束, E_{\min} 为水环境指数要求的最低值; $D_k^\varepsilon, D_{\max}^\varepsilon$ 分别为规划水平年像元 (i, j) k 行业污染物 ε 的年排放量和最大允许排放量(单位: t/年); ψ_k^ε 为污染因子 ε 的权重.

3 PACA的改进(Improvement of PACA)

Pareto蚁群算法是通过构造多目标优化问题的非支配集, 并使非支配集不断逼近Pareto最优边界来实现的. 水资源优化配置为连续域问题, 每个蚂蚁都携带有信息素, 并且信息素只存留在蚂蚁所在位置, 可被其他蚂蚁察觉. 在迭代过程中, 只有当前位置是不可支配时, 蚂蚁才释放信息素, 而且随着迭代次数的增加, 释放的信息素浓度减少. 蚂蚁依据概率调节选择搜索方向, 在寻优的前期阶段进行大范围探索, 而在后期阶段进行小范围探索, 从而最终完成寻优任务.

为了解决蚁群算法加速收敛和早熟、停滞现象之间的矛盾, 提高全局的搜索能力, 本文尝试用对PACA进行了如下改进.

3.1 状态转移概率(State transition probability)

为了加快算法的收敛速度, 把蚂蚁分为3个蚂蚁家族, 对3个目标分别进行搜索. 每个蚂蚁家族 $\text{ant} = \{\text{ant}_1, \text{ant}_2, \dots, \text{ant}_k\}$ 表示 k 只蚂蚁组成的集合, 用 k_{ij} 标记蚂蚁 ant_k 所在的像元.

利用伪随机比例规则^[19-20]选择像元, 即设定一

个 $[0, 1]$ 的常数 q_0 , 用一个均匀分布的随机变量 $q(q \in [0, 1])$ 与之进行比较. 蚂蚁 ant_k 在第 k 步选择像元 (i, j) 的概率 $P_k(i, j)$ 依据文献[20]的方法进行.

3.2 局部信息素更新(Update of local pheromone)

一只蚂蚁 ant_k 完成一次搜索后, 进行局部信息素强度更新.

$$\tau_k^l(i, j) = (1 - \rho)\tau_k^l(i, j) + \rho\Delta\tau_k^l(i, j), \quad (8)$$

式中: ρ 为信息挥发系数, $\rho \in [0, 1]$; $(1 - \rho)\tau_k^l(i, j)$ 为蚂蚁 ant_k 在第 k 步选择像元 (i, j) 第 l 目标的残留信息素强度; $\Delta\tau_k^l(i, j)$ 为蚂蚁 ant_k 在第 k 步选择像元 (i, j) 的第 l 目标信息素增量.

对于局部信息素更新, $\Delta\tau_k^l(i, j)$ 选取规则为

$$\Delta\tau_k^l(i, j) = c_l f_l(k), \quad (9)$$

式中: $f_l(k)$ 为蚂蚁 ant_k 选择的配置方案按式(1)–(3)所得的目标函数值; c_l 为目标函数值所对应的系数; $l \in \{1, 2, 3\}$.

为了避免搜索的停滞, 每个归档集Fset中元素的信息素强度值域被限制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$. 若有 $\tau_k^l(i, j) > \tau_{\max}$, 则设置 $\tau_k^l(i, j) = \tau_{\max}$; 若 $\tau_k^l(i, j) < \tau_{\min}$, 则设置 $\tau_k^l(i, j) = \tau_{\min}$.

3.3 全局信息素动态更新(Dynamic update of global pheromone)

所有蚂蚁完成一次搜索后, 对所有像元进行全局信息素更新.

$$\tau_k^l(i, j) = \begin{cases} (1 - \rho_1)\tau_k^l(i, j) + \rho_1\Delta\tau_k^l(i, j), & (i, j) \in \text{Fset}, \\ (1 - \rho_1)\tau_k^l(i, j), & (i, j) \notin \text{Fset}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: ρ_1 为全局信息挥发系数, $\rho_1 \in [0, 1]$. ρ_1 的大小直接关系到PACA的收敛速度和全局搜索能力^[21]. 为了平衡全局搜索能力和收敛速度, 本研究在全局信息素更新中, 使用动态信息素挥发系数, 自适应地动态改变 ρ_1 值. 在求解初期, ρ_1 取较大值以提高收敛速度; 随着迭代次数增加, 若每次所得最优值差值不大, 判断是否陷入了某个极值点, 若是, 需要减小 ρ_1 值, 以提高算法的全局搜索能力. 动态信息素挥发系数 ρ_1 为

$$\rho_1(t) = \begin{cases} \max(1 - \frac{\ln(t)}{\ln(t+v)}, \rho_{1\min}), & \rho_1 < \rho_{1\min}, \\ 1 - \frac{\ln(t)}{\ln(t+v)}, & \rho_{1\min} \leq \rho_1 \leq \rho_{1\max}, \\ \min(1 - \frac{\ln(t)}{\ln(t+v)}, \rho_{1\max}), & \rho_1 > \rho_{1\max}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: v 为常数; t 为迭代次数; $\rho_{1\min}$ 为 ρ_1 的最小值, 可以防止 ρ_1 过小而降低算法的收敛速度; $\rho_{1\max}$ 为 ρ_1 的最大值, 可以防止 ρ_1 过大而陷入局部最优状态.

3.4 Pareto解集过滤器(Filter for Pareto solution set)

多目标优化问题的求解是获得一组在各方面都趋于“平衡”的解集, 既要使算法所得结果更接近最优解, 又要使算法以更快的速度收敛到最优解. 为此, 本研究构建了Pareto解集过滤器Fset. Pareto解集过滤器用于存放算法运行时所产生的Pareto解. 如果任何一个子目标的解在不违反约束的前提下有改进, 且支配Fset中的某个解, 那么将该Pareto解添加到Fset中, 并删除那个支配解. 如果Fset中解的数目超出预先设定的数目, 则选择包含解数目最多的那个子空间, 并从中随机删除一个解, 用所获得指定数目的Pareto最优解的平均值进行蚁群信息素的更新.

蚂蚁在寻优过程中, 针对3个目标分别进行信息素的局部更新和全局更新, 使蚂蚁朝着供水像元直接经济效益最大、像元总缺水量最小和像元重要污染物排放量最小的最优方向优化, 每一次迭代所得非支配解保存到Fset中, 从而使算法尽可能达到三者同时最优.

3.5 算法基本步骤(Basic steps of the algorithm)

水资源优化配置的Pareto蚁群算法步骤如下:

- 1) 初始化 $\tau_{\min}, \tau_{\max}, T_{\max}, \rho_{1\min}, \rho_{1\max}, K, L$; 令 $\text{Fset} = z\Phi, \text{Tabu}_k = \Phi, t = 0, \tau_{ij}^l = 0$. 其中: T_{\max} 为最大迭代次数, Fset 为归档集, Tabu_k 表示第 k 只蚂蚁的禁忌表.
- 2) 若 $t = T_{\max}$, 则转第11)步, 否则, 继续;
- 3) 针对每一个蚂蚁家族来说, 若 $k = K$, 则转第10)步, 否则, 继续;
- 4) 分别计算决策变量集 Z 的 f_1, f_2, f_3 值;
- 5) 蚂蚁按照最近邻域选择移动;
- 6) 根据公式(8)和(9)进行局部信息素更新;
- 7) 修改禁忌表;
- 8) $k = k + 1$, 转第3)步;
- 9) 根据式(10)和(11)进行全局信息素更新;
- 10) $t = t + 1$, 转第2)步;
- 11) 统计各分区的水资源优化配置解: $Z' = \sum Z, Z \subset \text{Fset}$; 算法结束.

4 结果与分析(Result and analysis)

研究区为中原地区某县. 该县总面积 1500 km^2 , 2009年总人口为97.62万人, 总面积为 150000 hm^2 , 其中耕地 75180 hm^2 . 平均年径流深 230 mm , 平均地下水埋深 8 m ; 水资源总量 431.7 Mm^3 , 其中地表水 345.2 Mm^3 , 地下水 86.5 Mm^3 ; 平水年水资源总量 393.7 Mm^3 , 偏枯年 279.8 Mm^3 .

遥感数据采用2010年4月2日Landsat5 TM数据. 利用EDARS软件对遥感影像进行处理、解译、分类. 用该县2010年的土地利用类型图和其他辅助资料进行辅助分析, 通过人机交互方式, 利用专家分类器对TM影像进行分类, 分别生成建设用地、裸地、水系、蔬菜耕地、作物耕地以及高、中、低覆盖度的林地和草地(图1), 并且统计计算不同土地利用类型的面积. 最后综合该县2010年水资源总量、各种土地利用类型面积和植被类型用水量等数据来分析该县水资源的供需平衡.

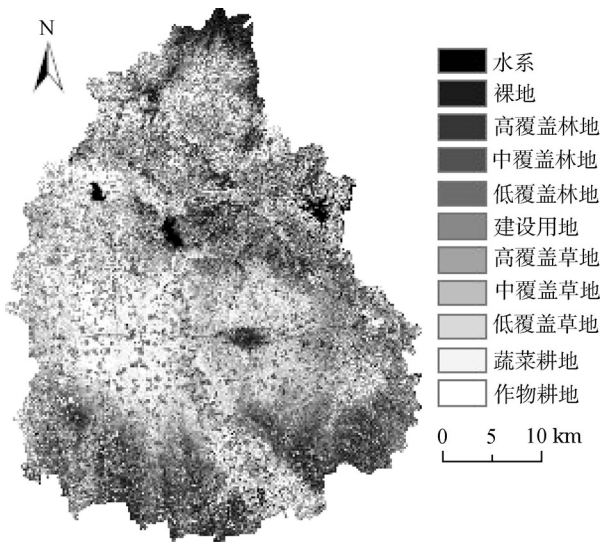


图1 研究区土地分类结果

Fig. 1 Result on land classification in the study area

依据水资源优化配置模型和PACA, 选择相应的模型参数和算法参数(由于参数较多, 在此没有说明参数取值的原因)如下:

- ① 工业、农业、生活和环境用水效益系数分别取 0.055×10^4 , 0.002×10^4 , 0.041×10^4 和 0.041×10^4 元/ m^3 .
- ② 外调水、地表水和地下水的供水次序系数依次为 0.40, 0.35, 0.25.
- ③ 生活、环境、工业、农业的公平系数依次为 0.40, 0.30, 0.20, 0.10.
- ④ 城市居民、乡镇居民、农村居民、工业、农业和生态环境用水的费用系数分别取 2.80, 2.0, 1.50, 3.0, 0.5, 1.90 元/ m^3 .
- ⑤ $3K = 180$, $L = 3$, $q_0 = 0.6$, $T_{\max} = 1000$, $\tau_{\min} = 10$, $\tau_{\max} = 10000$, $\rho_{1\min} = 0.2$, $\rho_{1\max} = 0.9$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$.

把以上参数输入Pareto蚁群算法程序, 运行10次, 达到最优值的平均迭代次数为108次. 赋予相同的初始参数, 用遗传算法(GA)和BP神经网络算法(BP-ANN)分别对本例进行仿真(图2).

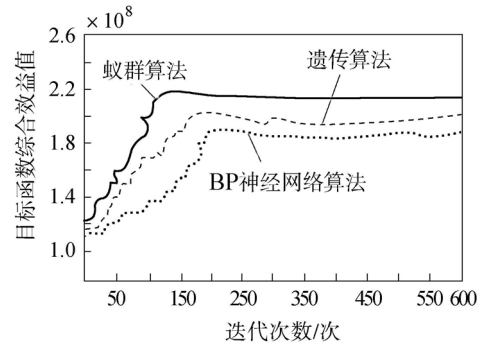


图2 ACA与GA、BP-ANN仿真结果比较

Fig. 2 Comparison of the simulation results from ACA, GA and BP-ANN

基于多目标遗传算法的水资源优化配置借鉴文献[2]的方法并对其进行改进. 基于BP神经网络的水资源优化配置的输入和输出维数分别取3, 隐层单元数取12, 传递函数为正切Sigmoid函数, 输出层采用pureline函数; 网络初始权值为[0, 1]的随机数, 节点阈值均为零. 在已解译的遥感影像上随机采样1000个像元的灰度值对该神经网络模型进行训练, 直到训练误差稳定在0.001为止. 将训练好的神经网络模型用于目标函数的计算, 即可求出水资源优化配置结果.

GA和BP-ANN运行10次后的平均迭代次数分别是162和205次. 从图2还可以看出, PACA, GA和BP-ANN综合效益最优值分别为 2.15×10^8 , 1.96×10^8 和 1.84×10^8 . 因此, Pareto蚁群算法具有较快的收敛速度和较高的求解精度, 在求解水资源优化配置问题中是可行的和有效的.

为了进一步证明Pareto蚁群算法具有良好的寻优性能, 表1列出了不同水平年、不同保证率和不同水源的水资源配置水量对比结果. 由表1分析可知, 在2010, 2020和2030年, 地表水 m 、地下水 n 、外调水 p 的供水量优化结果与原始水量相比都比较显著, 优化结果合理可行, 说明Pareto蚁群算法具有较高的寻优性能.

表2列出了不同水平年75%保证率的水资源优化配置方案. $P = 75\%$ 时, 水资源直接最大经济效益 $f_1(x)$ 在2010, 2020和2030年分别为9849.98万元、10690.05万元和12801.22万元(已折算成2010年价格). 缺水 $f_2(x)$ 有逐年增大的趋势, 因此, 可通过节约用水、扩大调水、科学配水、提高工业水重复利用率和水资源利用效率等措施, 解决日益严重的缺水问题. 重要污染物排放量 $f_3(x)$ 也在逐年增大, 说明随着社会发展, 环境污染在逐年加重, 因此, 可通过加强环境规划与立法、合理利用各种资源和能源、清洁生产、强化废弃物处理、发展生态农业等措施, 来保护和改善当地的生态环境.

表 1 水量优化结果对比(单位: $10^4 \text{ m}^3/\text{年}$)

Table 1 Comparison of the optimal water consumption(unit: $10^4 \text{ m}^3/\text{year}$)

水平年	保证率/%	原始水量			优化结果			差值		
		地表水	地下水	外调水	地表水	地下水	外调水	地表水	地下水	外调水
2010	50	50429.84	9987.04	4631.52	50298.97	9861.53	4567.47	130.87	125.51	64.05
	75	45930.3	9045.28	4452.19	45835.82	8967.26	4389.97	94.48	78.02	62.22
	95	41051.51	8216.37	4013.91	40964.48	8146.19	3959.23	87.03	70.18	54.68
2020	50	59634.72	13060.64	6538.32	59481.38	12932.87	6468.85	153.34	127.77	69.47
	75	49867.53	11584.25	5761.24	49727.88	11458.96	5695.83	139.65	125.29	65.41
	95	46618.87	9134.34	4697.35	46452.51	9036.8	4640.57	166.36	97.54	56.78
2030	50	72416.9	15963.89	8028.63	72210.57	15767.61	7923.49	206.33	196.28	105.14
	75	68531.07	13529.47	7739.55	68324.58	13346.98	7642.04	206.49	182.49	97.51
	95	60953.96	12820.58	6493.49	60751.27	12646.07	6407.76	202.69	174.51	85.73

表 2 目标函数最优解($P=75\%$)

Table 2 Optimal solutions of objective functions

($P=75\%$)

水平年	$f_1(x)/(10^4 \text{ 元})$	$f_2(x)/(10^4 \text{ m}^3)$	$f_3(x)/(10^4 \text{ t})$
2010	9849.98	35.38	80.34
2020	10690.05	50.25	107.08
2030	12801.22	57.61	137.17

5 结论(Conclusions)

本文尝试用基于像元的PACA来求解水资源优化配置问题. PACA以多目标函数值作为适应度来调整蚂蚁觅食像元上的信息素,使蚂蚁朝着信息素强的优化边界方向移动,根据最大适应度值,确定水资源优化配置的多目标优化解.通过局部信息素范围限制、全局信息素动态更新等策略,有效实现了PACA的全局搜索能力与收敛速度之间的平衡,较好地解决了基本蚁群算法易早熟、停滞和收敛较慢的问题.本文以中原地区某县为仿真对象,通过对TM影像的处理,获取了土地、植被和水资源的相关数据,实现了PACA对水资源优化配置模型的求解.最后PACA与GA、BP-ANN进行对比仿真.结果表明,PACA能有效地求解大范围、多目标水资源优化配置模型,并提高了全局搜索能力和收敛速度.改进的PACA不受目标个数的限制,适合求解大规模多目标优化问题.

参考文献(References):

[1] 李琳, 刘士新, 唐加福. B2C环境下带预约时间的车辆路径问题及多目标优化蚁群算法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(1): 87-93. (LI Lin, LIU Shixin, TANG Jiafu. Vehicle routing problem with time reservation under B2C electronic commerce and ant colony algorithm for multi-objective optimization [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(1): 87-93.)

[2] 陈南祥, 李跃鹏, 徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置 [J]. 水利学报, 2006, 37(3): 308-313. (CHEN Nanxiang, LI Yuepeng, XU Chenguang. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(3): 308-313.)

[3] YAMOUT G, EL-FADEL M. An optimization approach for multi-sectoral water supply management in the greater beirut area [J]. *Water Resour Manage*, 2005, 19(6): 791-812.

[4] CHEN X H, CHEN Y Q, LAI G Y, et al. Optimal Allocation of Water Resources in Guangzhou City, South China [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2006, 41(7): 1405-1419.

[5] YANG X H, YANG Z F, SHEN Z Y, et al. Node ordinal encoded genetic algorithm for the optimal allocation of water resources [J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(5): 448-452.

[6] 方红远, 邓玉梅, 董增川. 多目标水资源系统运行决策优化的遗传算法 [J]. 水利学报, 2001, 9: 22-27. (FANG Hongyuan, DENG Yumei, DONG Zengchuan. Genetic algorithm for operation optimization of multi-objective decision making in water resources system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 9(9): 22-27.)

[7] REDDY M J, KUMAR D N. Performance evaluation of elitist-mutated multi-objective particle swarm optimization for integrated water resources management [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2009, 11(1): 79-88.

[8] 王海政, 全允桓. 可持续发展视角下的区域水资源优化配置模型 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(9): 1531-1536. (WANG Hai Zheng, TONG Yunhuan. Optimal allocation models for regional water resources with sustainable development [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(9): 1531-1536.)

[9] HADDAD O B, MARINO M A. Dynamic penalty function as a strategy in solving water resources combinatorial optimization problems with honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2007, 9(3): 233-250.

[10] HADDAD O B, AFSHAR A, MARINO M A. Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: a new heuristic approach for water resources optimization [J]. *Water Resources Management*, 2006, 20(5): 661-680.

[11] 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 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(2): 246-256.)

- [12] 段征宇, 杨东援, 王上. 时间依赖型车辆路径问题的一种改进蚁群算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(11): 1557 – 1563.
(DUAN Zhengyu, YANG Dongyuan, WANG Shang. Improved ant colony optimization algorithm for time-dependent vehicle routing problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(11): 1557 – 1563.)
- [13] 冯远静, 冯祖仁, 彭勤科. 一类自适应蚁群算法及其收敛性分析 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 713 – 717.
(FENG Yuanjing, FENG Zuren, PENG Qinke. Adaptive ant colony optimization algorithms and its convergence [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(5): 713 – 717.)
- [14] 任志刚, 冯祖仁, 张兆军. 多优解更新信息素的混合行为蚁群算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1201 – 1206.
(REN Zhigang, FENG Zuren, ZHANG Zhaojun. Hybrid-behavior ant-colony optimization algorithm with pheromone updated by multiple good solutions [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1201 – 1206.)
- [15] DOERNER K, GUTJAHR W J, HARTL R F, et al. Pareto ant colony optimization: a metaheuristic approach to multiobjective portfolio selection [J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 131(1): 79 – 99.
- [16] 符杨, 孟令合, 朱兰, 等. Pareto蚁群算法在多目标电网规划中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 41 – 45.
(FU Yang, MENG Linghe, ZHU Lan, et al. Pareto ant colony algorithm for multi-objective power network planning [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation*, 2009, 21(4): 41 – 45.)
- [17] DORIGOA M, BLUM C. Ant colony optimization theory: a survey [J]. *Theoretical Computer Science*, 2005, 344(3): 243 – 278.
- [18] MADADGAR S, AFSHAR A. An improved continuous ant algorithm for optimization of water resources problems [J]. *Water Resources Management*, 2008, 23(10): 2119 – 2139.
- [19] 张智韬, 刘俊民, 陈俊英, 等. 基于RS, GIS和蚁群算法的多目标渠系配水优化 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 72 – 78.
(ZHANG Zhitao, LIU Junmin, CHEN Junying, et al. Water resources allocation of canal system based on multi-objective about rs, gis and ant colony algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 72 – 78.)
- [20] 符杨, 孟令合, 朱兰, 等. Pareto蚁群算法在多目标电网规划中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 41 – 45.
(FU Yang, MENG Linghe, ZHU Lan, et al. Pareto ant colony algorithm for multi-objective power network planning [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation*, 2009, 21(4): 41 – 45.)
- [21] 赵宝江, 李士勇, 金俊. 基于自适应路径选择和信息素更新的蚁群算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(3): 12 – 15.
(ZHAO Baojiang, LI Shiyong, JIN Jun. Ant colony algorithm based on adaptive selection of paths and pheromone updating [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(3): 12 – 15.)

作者简介:

侯景伟 (1973–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为GIS的开发与应用以及最优化控制在水资源中的应用, E-mail: houjingwei2005@yahoo.com.cn;

孔云峰 (1967–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为GIS开发与应用以及空间优化研究等, E-mail: yfkong@henu.edu.cn;

孙九林 (1937–), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向为遥感与地理信息系统应用、虚拟地理环境、信息化农业、区域开发规划, E-mail: sunjl@cern.ac.cn.