

基于混合遗传算法的红兴隆分局水资源优化配置

刘 姣¹, 刘 东^{1,2,3}

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省普通高校节水农业重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 农业部 农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘 要:针对区域水资源开发利用模式不合理、传统优化算法运行效率不高的问题,以红兴隆分局为例,对其水资源优化配置模型进行研究。基于大系统分解协调理论,以经济、社会、环境综合效益最大,考虑可供水量、用户需求量、水质为约束,构建了基于混合遗传算法的大系统多目标红兴隆分局规划年(2015 年,2020 年)水资源优化配置模型。结果表明:农业用水量是导致红兴隆分局水资源短缺的主要原因,应充分利用地表水和过境水,减少对当地地下水的开采,经过合理的优化配置,使得规划年缺水状况得到了改善。另外,优化后的水量较现实水量相比较显著减少,各目标效益也均呈现改善趋势,增加了配置结果的可信度;混合遗传算法克服了传统算法的不足,在运行速度上也有大幅度的提升。

关键词:水资源; 优化配置; 混合遗传算法; 红兴隆分局

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)06-0177-05

Multi-objective Optimization of Hongxinglong Branch Bureau Water Resources Based on Mixed Genetic Algorithm

LIU Jiao¹, LIU Dong^{1,2,3}

(1. School of Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Key laboratory of Water-saving Agriculture of Ordinary University in Heilongjiang Province, Harbin 150030, China;

3. Key laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources of Agriculture Ministry, Harbin 150030, China)

Abstract: The water resources optimization model had been studied in terms of the uneven distribution of water resources of Hongxinglong branch bureau and the problems about low efficiency of the traditional optimization algorithm. By using the large system decomposition coordination theory, the multi-objective optimization of Hongxinglong branch bureau water resources had been established based on mixed genetic algorithm in different planning years(2015, 2020). The model tried to achieve the maximum economic, social, environmental benefits with water supply, water demand, water quality as the constraint conditions. Case study showed that agricultural water is the main reason for causing water resources shortage in Hongxinglong branch bureau, and should sufficiently utilize the passing-by water and surface water, and reduce local groundwater exploitation. But the water shortages of planning years had been improved by the reasonable optimization. In addition, comparing with the quantity of water support without optimization, the optimized water support quantity had been significantly reduced and the target benefits also showed good improvement trends, which increased the credibility of the configuration result. The mixed genetic algorithm overcomes the weakness of the tradition optimization algorithm, so the efficiency had been greatly improved.

Key words: water resources; optimal allocation; mixed genetic algorithm; Hongxinglong branch bureau

收稿日期:2013-04-16

修回日期:2013-05-16

资助项目:国家自然科学基金(41071053);“十二五”农村领域国家科技支撑计划课题子专题(2013BAD20B04-S3);中国博士后科学基金特别资助(201003410);高等学校博士学科点专项科研基金(20102325120009);水利部公益性行业科研专项经费项目子课题(201301096-0201);黑龙江省自然科学基金(C201026);哈尔滨市创新人才研究专项资金(优秀学科带头人)(2013RFXXJ001);黑龙江省博士后科研启动基金(LBH-Q11154);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531012)

作者简介:刘姣(1989—),女,辽宁大连人,在读硕士研究生,主要研究方向为农业水土资源优化利用与管理。E-mail:liujiao0115@sina.com

通信作者:刘东(1972—),男,黑龙江安达人,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为农业水土资源系统分析与优化利用。E-mail:liu72dong@126.com

水是人类赖以生存和社会发展必不可少的物质基础,人类必须合理地利用有限的水资源以满足社会发展和经济增长对水资源的需求,实现水资源的开发利用与社会、经济、环境的协调发展,促进水资源的可持续利用,保证社会经济的可持续发展^[1]。水资源的优化配置更是水资源可持续利用的重要内容,也是实现人类水资源可持续利用的有效措施之一。

水资源的优化配置始于 60 年代初期,自 20 世纪 80 年代中期以来,区域水资源优化配置已成为研究热点之一,我国将宏观经济、系统方法与区域水资源规划实践相结合,提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论^[2]。90 年代以后,国内外开始兴起新的优化算法,尝试将计算机技术引入模型中,例如多目标优化模型^[3]、遗传算法(GA)^[4]、神经网络^[5]、灰色模拟^[6]等。Wang X 等^[7]利用 GM(1,1)模型以水资源安全评价为基础,研究了张家口地区水资源的优化配置问题。王宏伟^[8]根据西宁市的水资源实际情况,建立了水资源优化配置模型,并利用多目标遗传算法对该区域水资源进行了优化配置。Parsinejad 等^[9]基于神经网络模型提出了灌区水资源的优化问题。

水资源的优化配置是一个结构复杂,影响因素众多的大系统,具有多目标、多层次,非线性的特点,涉及到人口、经济、环境等多方面因素,传统的方法已经不能很好地解决大系统多目标的问题,然而遗传算法是一种全局性优化算法,即使在目标函数是不连续、非线性的情况下,也能以很大的概率找到全局最优解,成为解决此类问题的有效途径。然而遗传算法的不足之处在于,它具有早熟和局部搜索能力低的问题。为了克服这一问题,本文引入了模拟退火算法。模拟退火算法具有较强的局部搜索能力,在迭代过程中不仅接受使目标函数值变“好”的试探点,而且还能够以一定的概率接受使目标函数值变“差”的试探点,具有摆脱局部最优解的能力,有利于提高求取全局最优解的能力^[10]。因而将遗传算法和模拟退火算法有机地结合起来,组成混合遗传算法,以期能更有效地对水资源进行优化配置。

1 区域水资源优化配置模型

水资源优化配置的目标是满足人口、资源、环境与经济协调发展对水资源在时间上、空间上、用途和数量上的要求,使有限的水资源获得最大的利用效益,促进社会经济的发展,改善生态环境^[11]。基于此,本模型将以区域可持续发展思想为指导,以经济效益、社会效益和环境效益作为目标,建立多目标水资源优化配置模型。

1.1 目标函数

(1) 经济目标:以区域供水净效益最大来表示。

$$\max f_1(x) = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k \beta_j^k \quad (1)$$

式中: x_{ij}^k —— k 子区 i 水源向 j 用户提供的水量(10^4 m^3); b_{ij}^k, c_{ij}^k —— k 子区 i 水源向 j 用户供水的效益系数和费用系数(10^4 元/m^3); α_i^k, β_j^k —— k 子区 i 水源的供水次序系数和 j 用户的用水公平系数。

供水次序系数 α_i^k 反映的是子区 i 水源相对于其它水源供水的优先程度。供水原则:①先用小工程的水,后用大工程的水;②先用自流水,后用蓄水和提水;③先用近处的水,后用远处的水;④先用地表水,后用地下水;⑤先用当地水源,后用公共水源;⑥先用本区域水,后用过境水和外区域调入水^[12]。

(2) 社会目标:区域供水系统总缺水量最小。

$$\max f_2(x) = -\min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} (D_j^k - \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k) \quad (2)$$

式中: D_j^k —— k 子区用户的需水量(10^4 m^3)。

(3) 环境目标:由于红兴隆分局资料不完整,不考虑外界因素(除有效利用率以外),以化肥施用的排放量最小来表示。

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} d_j^k \rho_j^k x_{ij}^k \quad (3)$$

式中: d_j^k —— k 子区农业用户废水排放量中的化肥施用量($\text{kg}/10^4 \text{ m}^3$); ρ_j^k —— k 子区 j 用户的污水排放系数。

1.2 约束条件

区域水资源优化配置的约束条件主要包括供水约束、需水约束和非负约束,具体表示为:

(1) 供水约束。

$$\text{公共水源: } \sum_{j=1}^{J(k)} x_{mj}^k \leq W_m^k \quad (4)$$

$$\text{独立水源: } \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq W_c^k \quad (5)$$

(2) 需水约束。

$$D_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \leq D_{j\max}^k \quad (6)$$

式中: $D_{j\min}^k$ 和 $D_{j\max}^k$ —— k 子区 j 用水部门的最大和最小需水量(10^4 m^3)。

(3) 水质总量约束。

$$\sum_{j=1}^{J(k)} d_j^k \rho_j^k x_{ij}^k \leq A_k \quad (7)$$

式中: A_k —— k 子区水体的纳污能力。

(4) 非负约束。

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad (8)$$

2 模型求解方法

水资源优化配置的最终是通过构建和求解水资

源优化配置模型来实现的,模型的建立就是确定决策变量与决策目标之间的函数关系,并依据区域特性,给出相应的约束条件,因此结构体系复杂,影响因素较多,求解困难。对于复杂水资源系统的求解,应兼顾求解精度和计算速度,目前,在求解该问题上还没有成熟的方法^[13]。

2.1 大系统分解协调优化算法

通过分解协调过程进行逐层优化是解决系统优化问题的有效方法,它可以简化系统的复杂性,便于进行优化分析和计算,还可以减少计算模型位数,提高计算效用^[14]。基本思想为:首先将区域总资源量分配给各子区,各子区在分配到一定的水量后,又对子区内的各用水部门进行合理分配,从而产生最大效益的水资源最优分配过程,子区优化为多目标优化,采用改进的混合遗传算法,将各目标进行无量纲化处理^[15],采用权重法^[16]将多目标转化成单目标的问题求解。

2.2 混和遗传算法

2.2.1 遗传算法 标准遗传算法的编码采用二进制,编码过程繁琐,计算量大,基于此本文采用实数编码,其优点在于:① 适合精度较高的遗传算法;② 便于遗传算法与经典优化方法混合使用;③ 便于处理复杂的决策变量约束条件。在个体适应度评价时采用了基于序的评价函数,使其不受实际目标值的影响。在进化迭代时,把每次遗传操作所产生的子代保存下来,将所有子代统一进行评价,再依据适应度选取下一次进化的父代^[17]。

2.2.2 模拟退火算法 将模拟退火作为一个算子融入到遗传算法中,进行模拟退火操作^[10]。新的温度更新函数与退火时间的幂函数成反比,与优化变量的维数无关,提高了求解全局优化问题的计算效率。设模拟退火初始温度为 T_0 ,当前进化代数 t 对应的温度更新函数为 T_e :

$$T_e = T_0 / t^\theta \quad (9)$$

式中 $\theta \geq 1$ 为给定常数。产生随机向量 $Z^i = (Z_1^i, \dots, Z_j^i, \dots, Z_p^i)$:

$$Z_j^i = \text{sign}(r_1) \cdot T_e \cdot (|r_1|^{-\theta} - 1) \quad j=1, 2, \dots, p \quad (10)$$

式中 r_1 为 $(-1, 1)$ 上均匀分布的随机数, $\text{sign}(r_1)$ 为符号函数,产生新的试探解 $Y^i = V^i + Z^i$,计算其目标函数值 $F(Y^i)$ 和新试探解被接受的概率:

$$P_a = \min\{1, \exp[-\frac{f(Y^i) - f(V^i)}{\varphi \cdot T_e}]\} \quad (11)$$

式中, φ 是对目标函数进行适当比例变换的常数,它适合于目标极大化。产生一个 $(0, 1)$ 上的均匀

分布的随机数 r_2 , 若 $r_2 \leq P_a$, 则接受新试探解,即置 $V^i = Y^i$ 。

3 红兴隆分局水资源优化配置

3.1 区域概况

红兴隆分局位于三江平原腹地,地理坐标:东经 $129^\circ 55' - 134^\circ 12'$, 北纬 $45^\circ 35' - 47^\circ 17'$ 。红兴隆管理局总面积 88 万 km^2 , 其中耕地 41.8 万 km^2 , 所辖 12 农场与 4 市 7 县的土地穿插交错,是黑龙江省占土地面积较大的垦区之一。全区水资源总量 10.33 亿 m^3 , 其中地表水 5.85 亿 m^3 , 地下水 5.48 亿 m^3 。现已开发利用 6.95 亿 m^3 , 其中开发地表水 1.95 亿 m^3 , 地下水 5.0 亿 m^3 。全区盛产大豆、玉米、水稻,农灌用水占地下水资源的 90% 之多,地下水用量占总用水量的 70% 左右,致使部分地区地下水严重超采,地下水和地表水的利用存在较为严重的不平衡。因此,对红兴隆分局水资源分配研究已成为本区域的重点。

3.2 结果与分析

根据红兴隆分局的特点,按其农场行政区划将其分为 12 个子区,分别为友谊、五九七、八五二、八五三、饶河、二九一、双鸭山、江川、曙光、北兴、红旗岭、宝山。供水水源按其供水次序分别为地下水、地表水、过境水(乌苏里江,松花江)。用水部门按其公平次序依次为生活用水(包括城镇生活用水与农村生活用水)、农业用水和工业用水。混合遗传算法参数取值:群体规模 $N=600$;终止代数 $T=100$;交叉概率 $P_c=0.8$;变异概率 $P_m=0.2$;随机方向 $M=10$;模拟退火初始温度 $T_0=20000$; $\theta=3$; $\varphi=1.5$ 。运用 Matlab 对红兴隆分局水资源优化配置模型进行编程求解。

以 2011 年基准年红兴隆分局统计资料对各用水部门 2015 年和 2020 年需水进行预测,得出红兴隆分局不同水平年的总需水量(图 1)。

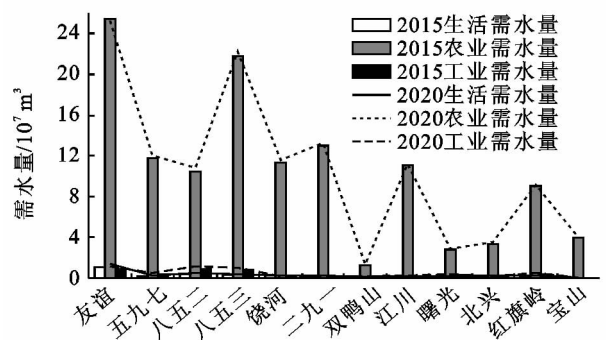


图 1 红兴隆分局 2015 年、2020 年水平年总需水量预测结果

需水量预测结果表明,随着人口的增加和社会的发展,生活用水和工业用水部门的需水量逐年增加,

农业需水量在大力控制灌溉的基础上急剧减少。由于农业需水量占总需水量的 90%，因而总需水量也呈现减少的趋势。

经过多次重复迭代后,完成 2015 年和 2020 年水平年的水资源优化配置(图 2)。

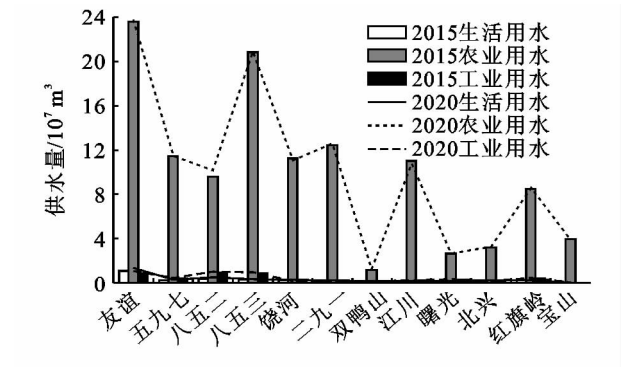


图 2 红兴隆分局 2015 年、2020 年水资源优化配置结果

从图 2 中可以看出,随着人口的增长以及社会的发展,红兴隆分局生活供水量和工业供水量呈现增加的趋势,而农业供水量逐渐减少,与需水量预测结果变化趋势相同。当需水量远大于供水量时,就要进行缺水分析(表 1)。

为了进一步证明混合遗传算法具有良好的寻优性能,将不同水平年的不同水源水资源优化配置结果与现实情况进行了对比(表 2)。结果表明,地表水、地下水和过境水的供水量优化结果较现实水量相比

显著减少,说明混合遗传算法有较高的寻优能力。另外,北部地区江川、二九一、饶河由于与松花江和乌苏里江相邻,所以过境水量相对较大,地下水开采较小;中部地区友谊、五九七、八五二、八五三、红旗岭、宝山由于占地面积比较大,是重要的粮食生产地,对地下水的开采过量;南部地区曙光和北兴开采量适中,由于篇幅有限,仅从总水量角度来看,优化后的地下水呈现出下降的趋势,对地下水的依赖程度降低。充分利用地表水和过境水,可在一定程度上缓解部分地区地下水严重超采的问题。

表 1 红兴隆分局不同水平年农业缺水与总缺水量

农场	总缺水量			
	2015 农业 缺水量	2015 总 缺水量	2020 农业 缺水量	2020 总 缺水量
友谊	1775	1814	508	537
五九七	265	283	43	69
八五二	834	836	264	324
八五三	991	1012	448	483
饶河	123	135	100	104
二九一	547	570	122	130
双鸭山	127	129	74	81
江川	78	92	33	46
曙光	161	177	156	164
北兴	115	122	122	127
红旗岭	560	570	190	195
宝山	5	6	3	3

表 2 不同水平年水量优化对比结果

水平年	现实水量			优化后水量			差值		
	地表水	地下水	过境水	地表水	地下水	过境水	地表水	地下水	过境水
2015	15901	38205	76260	15099	37545	75682	802	660	578
2020	16160	33681	77631	15857	33339	77126	303	342	505

优化后的各水平年目标效益值见表 3。从表 3 中可以看出,2015 年和 2020 年的最大经济效益分别为 31 229 万元和 40 608 万元,有逐年上升的趋势,这是因为随着经济和人口的增长,需水量势必大幅度增加,造成了经济效益的大幅度上升。缺水量呈现下降的趋势,这是因为充分利用地表水和过境水资源量,减缓了地下水的供水压力,缺水状况逐渐得到了改善。然而,从缺水量的数据来看,仍是一个庞大的数字,所以应该采取一定的措施:一方面是节约用水,尤其是农业用水,发展节水农业,实现农业高效用水是一个宏大的系统工程也是一个相互关联的技术体系^[18]。从图 2 来看,农业用水占各部门用水量比例最大,但由于农业用水征收费用偏低,水利基础设施又相对比较落后,从而造成了水资源的浪费,因此需要对农业用水采取一定的工程和政策性措施,大力推广节水灌溉制度,合理的水价,提高水资源的田

间利用率。另一方面,充分利用过境水源,建立污水处理厂,提高治污水平,提高水资源的重复利用率,解决水资源严重短缺的问题。 $f_3(x)$ 呈现下降的趋势,主要是在增加农作物产量的同时控制化肥施用量,具体做法可以在作物的不同生长期合理施用化肥,施行生态农业。

表 3 不同水平年目标函数最优解

水平年	$f_1(x)$ /万元	$f_2(x)$ /万 m ³	$f_3(x)$ /kg
2015	31229	4657	852441
2020	40608	3291	806377

同时,运用传统的遗传算法和标准的模拟退火遗传算法建立红兴隆分局水资源优化配置模型,比较三种算法的运行时间,结果见表 4。从表 4 中可以看出,混合遗传算法较标准模拟退火遗传算法、遗传算法的运行时间最少,分别较之加快了 2.72 s 和 10.51 s,为

日后处理复杂系统优化问题提供了一种有效的求解方法。

表 4 三种算法运行时间比较 s

算法	混合遗传 算法	标准模拟退火 遗传算法	遗传算法
时间	57.82	60.54	68.33

4 结 论

本文采用大系统分解协调理论优化求解建立了红兴隆分局水资源优化配置模型,改进的混合遗传算法优于传统的遗传算法、模拟退火遗传算法,收敛速度快、优化性能好、运行速度快,解决了以经济、社会、环境多目标水资源优化配置问题。结果表明:红兴隆分局水资源有限,并没有完全满足农业用水,缺水量较大,供需矛盾突出,所以对灌区农业水资源优化配置还有待进一步的研究。此外,红兴隆分局规划水平年缺水状况得到了改善,地下水资源得到了有效的保护,由此确定混合遗传算法是解决红兴隆分局水资源优化配置的有效途径;混合遗传算法较之模拟退火遗传算法、遗传算法在运行速度上有较大的突破。本文由于数据的不足,使用化肥施用量作为约束条件,使环境效益产生了极大的误差,随着资料的收集和农药使用量的加入,可以对结果进行进一步修正。地下水资源是一个复杂的大系统,可将其复杂性作为模型筛选因素,对水资源进行深层次的合理优化配置。

参考文献:

[1] 王顺久,张欣莉,倪长健,等. 水资源优化配置原理及方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[2] 芦晓峰,王铁良,李波,等. 沈阳辉山农业高新技术开发区水资源优化配置研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6): 178-181.

[3] 卢晓杰,张克斌,李瑞. 柴达木盆地香日德绿洲水资源优化配置研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):232-236.

[4] Aral M M, Guan J. Optimal Groundwater Remediation Design Using Differential Genetic Algorithm[M]. International Conference on Computational Methods in Water Resources,1996:349-357.

[5] Vasquez J A, Maier H R, Lence B J, et al. Achieving water quality system reliability using genetic algorithms [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126 (10):954-962.

[6] 孙月峰,张胜红,王晓玲,等. 基于混合遗传算法的区域大系统多目标水资源优化配置模型[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(1):139-144.

[7] Wang X, Cui Q, Li S Y. An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou Region, northern China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 69: 57-65.

[8] 王宏伟,张鑫,邱俊楠,等. 基于多目标遗传算法的西安市水资源的优化配置[J]. 水土保持通报,2012,32(2): 150-153.

[9] Parsinejad M, Yazdi A B, Araghinejad S, et al. Optimal water allocation in irrigation networks based on real time climatic data [J]. Agricultural Water Management, 2013,117:1-8.

[10] 周丽,黄素珍. 基于模拟退火的混合遗传算法研究[J]. 计算机应用研究,2005,22(9):72-73.

[11] 张志军,黄宝连. 基于水资源优化配置的多目标决策模型探析[J]. 水利规划与设计,2010(12):18-21.

[12] 张成凤. 基于遗传算法的榆林市水资源优化配置的研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.

[13] 张永永,黄强,姜瑾,等. 陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究[J]. 西安理工大学学报,2011,27 (2):165-170.

[14] 陈鹏飞,顾世祥,谢波,等. 分解协调技术在水资源大系统优化配置中的应用[J]. 中国农村水利水电,2006,11: 44-47.

[15] 周丽,黄哲浩,贺惠萍,等. 多目标非线性水资源优化配置模型的混合遗传算法[J]. 水电能源科学,2005,23 (5):22-25.

[16] 黄金林,丁元芳,迟宝明. 岔路河流域水资源合理配置研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):235-238.

[17] 付强. 数据处理方法及其农业应用[M]. 北京:科学出版社,2006.

[18] 徐万林,栗晓玲,史银军,等. 基于水资源高效利用的农业种植结构及灌溉制度优化[J]. 水土保持研究,2011, 18(1):205-209.