

优化的 NSGA-II 方法在马莲河流域 水资源综合管理中的应用研究

高雅玉¹, 张新民¹, 谭 龙²

(1.甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730000;
2.兰州大学西部环境与气候变化研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:根据马莲河流域水资源总量极端贫乏、年际年内分配不均、常规水资源量低、水污染问题较严重等特点,利用系统分析理论和优化技术建立了流域的大系统、多目标水资源优化配置模型,并利用优化的 NSGA-II 方法进行求解,得到流域 2020 年期望水资源配置下的最佳分配方案为:流域总供水量 $57\ 086\times 10^4\text{m}^3$,工业供水量 $21\ 690\times 10^4\text{m}^3$ (总产值约为 144.6 亿元),能源基地供水量 $4\ 329\times 10^4\text{m}^3$ (总产值约为 346.32 万元),农业供水量 $20\ 840\times 10^4\text{m}^3$,生活供水量 $9\ 452\times 10^4\text{m}^3$,生态供水量 $811\times 10^4\text{m}^3$ 。对比期望方案供水量增加了 $6\ 710\times 10^4\text{m}^3$,综合缺水率减少了 11.41%。并根据预测的流域的分配方案和预测的流域需水量,进行了流域的水资源平衡分析,通过平衡分析的结果进行流域的综合管理研究。2020 年在最优水资源分配方案下,工业缺水率 3.21%、减少了 4.51%;能源基地缺水率 0.00%;农业缺水率 4.64%、缺水率增加 26.17%;生活缺水率 0.00%;生态缺水率 1.00%、缺水率增加了 1.00%。配置方案实现了流域内水资源的最佳分配,使宝贵、有限的水资源产生最大的社会、经济及环境效益,为流域经济、能源产业的快速发展提供水资源保障。

关键词:水资源综合管理;优化的 NSGA-II 方法;优化配置;马莲河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)05-0061-06

1 研究背景

地处干旱、半干旱地区的马莲河流域(见图 1)是传统的农业地区,也是经济亟待腾飞的地区,油、煤、气等资源丰富,发展潜力巨大。大发展对流域水资源保障提出了更高的要求,然而,马莲河流域多年期望水资源量 $4.49\times 10^8\text{m}^3$,人均占有量 352m^3 ,是甘肃省人均占有量的 25.7%,7、8 两月的洪水量占总径流量的 50%以上,非汛期径流量仅占 40%左右。流域水资源利用存在着总量贫乏、年际年内分配不均,常规水资源量低、水污染问题日趋严重等问题。要为高速发展的经济提供强有力的水资源保障,就必须要对难以利用的水资源实施最严格的水资源管理制度,加强水资源节约和保护,综合管理、优化配置水资源,以水资源可持续利用支撑全流域经济的可持续发展。国际上应用系统分

析方法进行水资源管理、配置的研究始于 20 世纪 40 年代中期,主要为单一工程的优化调度,以后逐渐发展到流域水资源的优化分配和综合管理上来。20 世纪 60 年代,我国学者开始了以水库优化调度为手段的水资源优化分配研究,中国水科院谭维炎等学者首次将运筹学技术应用于四川狮子滩水库水电站的优化调度工作中。白宪台,郭元裕等(1987)利用动态规划方法建立了平原湖区洪涝系统优化调度的大系统模拟模型^[1]。刘建民等(1993)在京津唐地区建立了区域可供水资源年优化分配的大系统逐级优化模型^[2]。刘丙军等(2009)应用协同学理论分析水资源系统特征,依据有序度概念和支配原理,结合信息熵原理建立了一种流域水资源配置模型^[3]。屈吉鸿等(2009)建立了基于投影寻踪技术和粒子群算法耦合理论的水资源配置决策模型^[4]。陈立华等(2010)提出了梯级水库发电调度的并行算法,建

收稿日期:2014-02-05

基金项目:甘肃省水利厅水资源费项目(甘财农[2010]162);甘肃省科技厅重大专项课题(1203FKDA035)

作者简介:高雅玉(1985-),女,天津人,工程师,兰州大学水文水资源硕士,长期从事水资源与水土保持方面的研究。

E-mail: gaoyayu19851231@163.com

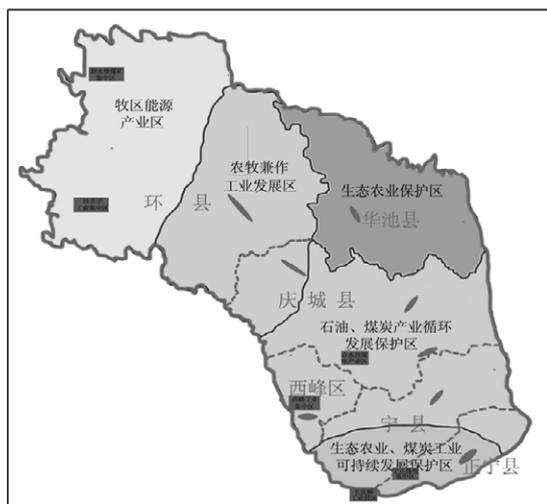


图1 马莲河流域分区图

Fig.1 The zones of the Malianhe River basin

立并行遗传算法求解多阶段最优化问题数学模型^[5]。史银军(2011)针对内陆河流域水资源多次转化多次利用的特点,以水资源转化过程为基础,建立了石羊河流域水资源优化配置模型^[6]。随着实践研究的深入,我国水资源综合管理及优化配置研究经历了一个由简单到复杂、由点到面逐步深入的过程,有效地解决了一批区域性水资源综合管理、规划问题,取得了较好的效果,迅速带动了我国水资源综合管理及优化配置研究的工作。

2 流域水资源综合管理及优化配置研究

不同用水户水资源的最优分配是流域水资源综合管理的基础,通过建立多目标水资源优化配置模型并利用系统分析理论和优化技术来达到社会、经济、环境协调发展的综合效益最佳的目标。以现状水资源供需分析为基础,预测规划水平年(2020年)的供、需水量;在此基础上运用大系统、多目标的方法构建水资源优化配置的模型,选择优化的NSGA-II方法对模型进行求解得到流域最佳水资源配置方案,通过进行供需平衡分析完成流域水资源的综合管理。

2.1 多目标水资源优化配置模型构建

流域大系统、多目标水资源优化配置模型是通过构建目标函数和约束条件来完成,同时达到目标函数的要求和约束条件的限制,探索所有条件同时满足的最优情况。

2.1.1 目标函数的构建

流域水资源大系统、多目标优化配置模型的最终目标是综合效益最佳,目标函数有3个,分别是社会效

益、经济效益、环境效益同时达到最佳,模型函数表达式为:

目标1:社会效益函数,以各个水资源分区的缺水量最小来衡量:

$$\min f_1(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[D_j^k - \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right) \right]$$

式中: D_j^k 为 k 子区 j 用户的需水量(10^8m^3); x_{ij}^k 、 x_{cj}^k 分别为 k 子区独立水源 i 、公用水源 c 向 j 的供水量(10^8m^3)。

目标2:经济效益函数,以各个水资源分区的供水净效益最大来衡量:

$$\max f_2(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=2}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k \beta_j^k w_k + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{c=1}^M (b_{cj}^k - c_{cj}^k) x_{cj}^k \alpha_c^k \beta_j^k w_k$$

式中: b_{ij}^k 、 b_{cj}^k 分别为 k 子区独立水源 i 、公用水源 c 向 j 的单位供水量效益系数(元/ m^3); c_{ij}^k 、 c_{cj}^k 分别为 k 子区独立水源 i 、公用水源 c 向 j 的单位供水量的费用系数(元/ m^3); α_i^k 、 α_c^k 分别为 k 子区独立水源 i 、公用水源 c 供水次序系数; β_j^k 为 k 子区 j 用户用水公平系数; w_k 为 k 子区权重系数。

目标3:受水区重要污染物排放量最小,

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} p_j^k \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right)$$

式中: p_j^k 为 k 子区 j 用户污水排放系数。

2.1.2 约束条件

(1)水源可供水量约束

$$\text{公共水源: } \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq D_c^k, \sum_{k=1}^K D_c^k \leq W_c$$

式中: W_c 为公共水源 c 可供水量; x_{cj}^k 为公共水源 c 向 k 子区 j 用户的供水量; D_c^k 为公共水源 c 分配给 k 子区的水量。

(2)水源输水能力约束

$$x_{ij}^k \leq Q_i^k, x_{cj}^k \leq Q_c$$

式中: Q_i^k 为 k 子区 i 水源的最大输水能力; Q_c 为公共水源 c 的最大输水能力。

(3)用户输水能力限制

$$D_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \leq D_{j\max}^k$$

式中: $D_{j\min}^k, D_{j\max}^k$ 分别为 k 子区 j 用户的最小、最大需水量。

(4) 区域协调发展约束

$$u = \sqrt{u_{B_1}(\delta_1)u_{B_2}(\delta_2)} \geq u^*$$

设 B_1 为水资源利用与区域经济发展相协调的模糊子集, 隶属函数 $u_{B_1}(\delta_1)$ 表示协调度。

$$\delta_1 = \sum_{k=1}^K w_k \delta_1^k, \delta_1^k = \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \left(\sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right) / \sum_{j=1}^{J(k)} D_j^k,$$

$$u_{B_1}(\delta_1) = \begin{cases} 1.0 & (\delta_1 \geq \delta_1^*) \\ \exp(-4(\delta_1 - \delta_1^*)^2) & (\delta_1 < \delta_1^*) \end{cases}$$

经济发展与水环境质量改善的协调度可表示为

$u_{B_2}(\delta_2)$:

$$\delta_2 = \sum_{k=1}^K w_k \delta_2^k, \delta_2^k = \frac{E^k/E_0^k}{f_2^k/f_{20}^k}, u_{B_2}(\delta_2) = \exp(-4(\delta_2 - \delta_2^*)^2)$$

式中: δ_1^*, δ_2^* 分别为最佳比值; u^* 为最佳协调度; E_0^k, E^k 分别为基准年和规划水平年的经济增长指标 (人均 GDP、人均纯收入等); f_{20}^k, f_2^k 分别为基准年和规划水平年 k 子区的重要污染物排放量^[7-9]。

(5) 变量非负约束

$$x_{ij}^k, x_{cj}^k \geq 0$$

2.2 模型的求解及优化

对构建好的水资源优化配置模型求解选用 NSGA- (Nondominated Sorting Genetic Algorithm-) 改进的非支配排序多目标优化遗传算法进行。

2.2.1 求解方法概述

NSGA- 是 2002 年 Deb 等人对算法 NSGA 的改进, 具体过程为: (1) 随机产生初始种群 P_0 , 然后对种群进行非劣排序, 每个个体被赋予秩; 再对初始种群执行二元锦标赛选择、交叉、变异, 得到新的种群 Q_0 , 令 $t=0$ 。(2) 形成新的群体 $R_t = P_t \cup Q_t$, 对种群 R_t 进行非劣排序, 得到非劣前端 F_1, F_2, \dots 。(3) 对所有 F_i 拥挤距离比较操作 $<_n$ 进行排序, 并选择其中最好的 N 个个体形成种群 P_{t+1} 。(4) 对种群 P_{t+1} 执行复制、交叉和变异, 形成种群 Q_{t+1} 。(5) 如果终止条件成立, 则结束; 否则, $t=t+1$, 转到(2)^[10-11]。

2.2.2 模型具体求解步骤及优化

根据大系统理论的分解协调技术, 建立了二级递阶多目标优化模型。采用分解-协调技术中的模型协调法, 将关联约束变量区域公用水资源 D_c 进行预分,

产生预分方案 D_c^k , 是系统分解成 k 个独立子系统。然后反复协调分配量, 最终实现系统综合效益最佳。求解流程见图 2。

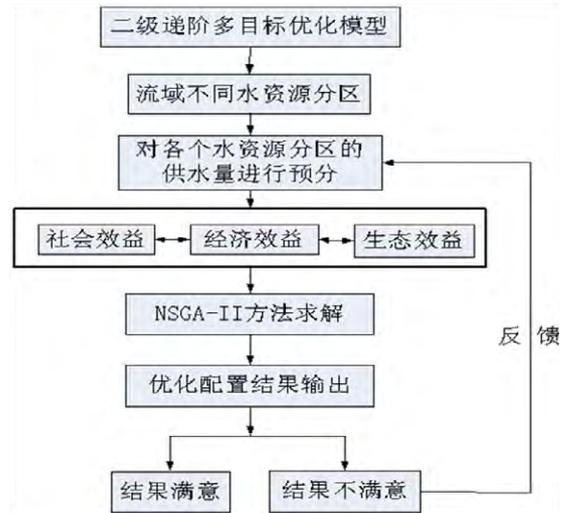


图 2 大系统、多目标模型求解过程图

Fig.2 The solution process of the large system and multi-objective model

(1) 第一级子系统优化

第一级子系统依据区域概况和行政区划将区域分为 k 个子区。各子区是第二级(协调级)给定的公共资源预分值 $\sum_{k=1}^k D_c^k \leq W_c$ 的前提下进行各子区优化, 采用非支配排序多目标优化遗传算法(NSGA-)求解。第 K 个子区的优化模型为:

$$F_k(X^k) = \{f_1^k(X^k), f_2^k(X^k), f_3^k(X^k)\}, \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq D_c^k (c=1, 2, \dots, M), X_{cj}^k \leq Q^c (j=1, 2, \dots, J(k)), \sum_{j=1}^{J(k)} X_{cj}^k \leq W_i^k (i=1, 2, \dots, I(k)), X_{ij}^k \leq Q_i^k (j=1, 2, \dots, J(k)), \sum_{i=1}^{I(k)} X_{ij}^k + \sum_{c=1}^M X_{cj}^k \leq D_{j,\max}^k (j=1, 2, \dots, J(k)), \sum_{i=1}^{I(k)} X_{ij}^k + \sum_{c=1}^M X_{cj}^k \geq D_{j,\min}^k (j=1, 2, \dots, J(k)), X_{ij}^k, X_{cj}^k \geq 0.$$

用 NSGA- 可以求得系统局部最优解 $X^k(D_c^k)$ 和最优值 $F_k(X^k, D_c^k)$, 它们均是公共资源预分值 D_c^k 的函数, 这虽然是可行解, 但未必是区域的最佳均衡解。因此需将第一级各子区求得的解 $X^k(D_c^k)$ 和目标值

$F_k(X^k, D_c^k)$ 反馈到第二级,进行第二级系统协调。

(2)第二级系统协调

第二级协调的任务是求得公共资源在各子区的最优分配,即求解如下的优化问题:

$$F(X) = \max \sum_{k=1}^k W_k F_k(X^k), \sum_{k=1}^k D_c^k \leq D_c \quad (c=1, 2, \dots, M), \mu = \sqrt{\mu_{B_1}(\sigma_1) \mu_{B_2}(\sigma_2)} \geq \mu^*, D_c^k \geq 0 \quad (c=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, K)。$$

(3)规划决策,得到最优配水决策方案

依据第二级系统协调结果对第一级进行再次协调,最终达到最优解^[12-15]。

2.3 模型参数的确定

2.3.1 子区权重系数

子区权重系数 w_k 是 k 子区对整个经济区而言的重要性程度,采用二元对比法计算出各水资源分区的子区权重系数,牧区能源产业区权重系数为 0.16,农牧兼作工业发展区为 0.16,生态农业示范保护区为 0.17,石油、煤炭工业可持续发展保护区为 0.26,生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区为 0.25。

2.3.2 供水次序系数和用水公平系数

(1)供水次序系数

供水次序系数 α_i^k 可反映 k 子区 i 水源相对于其它水源供水的优先程度,它将各个水源的优先程度转化为 $[0, 1]$ 区间上的系数。水源供水次序系数由:

$$\alpha_i^k = \frac{1+n_{\max}^k - n_i^k}{\sum_{k=1}^k [1+n_{\max}^k - n_j^k]} \quad \text{确定,蓄水:0.28,提水:0.24,引水:}$$

0.19,浅层水:0.14,深层水:0.10,其他水源:0.05。

(2)用户用水公平系数

用户公平系数 β_j^k ,是指 K 子区内的用户相对其它用户优先得到供给的重要性程度。其值的具体计算方法参考 α_i^k 的计算公式,用水户的公平系数为,工业:0.20,能源基地:0.27,农业:0.13,生活:0.33,生态:0.07。

2.3.3 用水效益系数和费用系数

(1)用水效益系数

用水效益系数表征用户在得到供水量后,单位水量能够产生的经济效益,结合当地统计年鉴及规划得到供水效益系数为,工业:333,能源基地:400,农业:250,生活:420,生态:200。

(2)供水费用系数

不同水资源分区的用水费用系数为,牧区能源产业区:4.70,农牧兼作工业发展区:2.00,生态农业示范保护区:2.35,石油、煤炭工业可持续发展保护区:1.50,生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区:0.50。

2.3.4 污染物排放系数

参考《中国环境统计年鉴(2010)》、《庆阳市统计年鉴(2010)》、《庆阳市环境质量报告书(2010)》等相关资料中关于全国城市污水排放的统计情况,确定马莲河流域不同规划水平年、不同用水户的污染物排放系数。2020年工业、能源基地、农业、生活、生态的排污系数分别为:1.19、1.22、0.94、10.76、0.05。

3 模型优化结果分析

3.1 配置结果分析

马莲河流域水资源优化配置模型为大系统多目标优化模型。根据大系统理论的分解协调技术,建立二级递阶多目标优化模型。采用分解-协调技术中的模型协调法,将关联约束变量区域公用水资源进行预分,产生5个水资源分区的预分方案,使系统分解成5个独立子系统。然后反复协调分配量,最终实现系统综合效益最佳。采用优化的 NSGA-II 对模型进行求解。通过 MATLAB 来实现模型的求解过程,以2020年的期望方案为例,进行优化,最终得到马莲河流域2020年的水资源优化配置结果。马莲河流域总供水量 $57\ 086 \times 10^4 \text{m}^3$,工业供水量 $21\ 691 \times 10^4 \text{m}^3$ (总产值约为144.6亿元),能源基地供水量 $4\ 329 \times 10^4 \text{m}^3$ (总产值约为346.32万元),农业供水量 $20\ 840 \times 10^4 \text{m}^3$,生活供水量 $9\ 452 \times 10^4 \text{m}^3$,生态供水量 $811 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

3.2 供需平衡分析

根据优化配置模型的运行结果与期望方案的需水量进行供需水量分析,最终的到优化配置方案的供需平衡表,见表1。

2020年期望方案需水量情况下,马莲河流域总需水量 $58\ 827 \times 10^4 \text{m}^3$,供水量 $57\ 086 \times 10^4 \text{m}^3$,缺水率2.96%、综合缺水率比优化前减少了11.41%。

2020年,为达到优化配置方案的最佳优化效益,就要按照方案提出的供水量进行供水,主要通过以下措施来进行保障。第一,建立用水总量控制和定额管理制度,确立水资源开发利用红线,建立取水总量控制指标体系。所缺水量通过对马莲河非常规水源的淡化利用、雨水集蓄利用、污水处理回用及下游水资源的开发利用、跨流域调水等措施解决,确保新能源产业发展用

表 1 马莲河流域 2020 年期望方案水资源优化配置供需平衡分析表

单位:10⁴m³

Table 1 The supply and demand balance analysis of the water resources optimal allocation for Malianhe River basin in 2020 (10⁴m³)

水资源分区	分项	工业	能源基地	农业	生活	生态	合计
牧区能源产业区	需水量	423	940	5263	906	111	7643
	供水量	419	940	5212	906	110	7587
	缺水量	4	0	51	0	1	56
	缺水率/%	0.926	0.000	0.963	0.000	1.140	0.731
农牧兼作工业发展区	需水量	6951	43	5345	1468	120	13927
	供水量	6483	43	4793	1468	119	12906
	缺水量	468	0	552	0	1	1021
	缺水率/%	6.733	0.000	10.322	0.000	0.747	7.329
生态农业示范保护区	需水量	496	0	2975	668	34	4173
	供水量	491	0	2946	668	34	4139
	缺水量	5	0	29	0	0	34
	缺水率/%	0.983	0.000	0.984	0.000	0.516	0.823
石油、煤炭工业可持续发展保护区	需水量	13010	946	5697	3758	295	23707
	供水量	12783	946	5341	3758	292	23120
	缺水量	227	0	356	0	3	587
	缺水率/%	1.748	0.000	6.252	0.000	1.076	2.475
生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区	需水量	1529	2400	2537	2652	259	9377
	供水量	1514	2400	2512	2652	256	9334
	缺水量	15	0	25	0	3	43
	缺水率/%	0.978	0.000	0.999	0.000	1.034	0.458
马莲河流域	需水量	22409	4329	21817	9452	819	58827
	供水量	21690	4329	20804	9452	811	57086
	缺水量	719	0	1013	0	8	1741
	缺水率/%	3.209	0.000	4.644	0.000	1.000	2.959

水需求。第二,要严格执行建设项目水资源论证制度,对擅自开工建设或投产的一律责令停止、严格取水许可审批管理。第三,确立用水效率控制红线,建立用水效率控制指标体系,降低万元工业增加值用水量,提高农业灌溉水有效利用系数。对具有代表性的大中型灌区、重点工业用水企业和生活服务业用水单位实行重点监控。第四,确立水功能区限制纳污红线,建立水功能区限制纳污指标体系,严格控制入河排污总量。加强水功能区管理,完善监测预警管理制度,未按时完成主要水污染总量减排目标任务的,停止审批新增取水和入河排污口。第五,明晰水权,建立水市场,构建行政管理与市场机制相结合的水权制度体系,建立水市场运行规则,界定可交易水权,制定水权交易制度,明确交易规则,规范交易成本和交易价格以及交易的程序和方式等方面相关工作,通过健全市场运行机制,逐步培育和完善的完善水市场。最后,研究制订专项资金、财政补贴、减免有关事业性收费等节水奖励政策,鼓励循环用水和使用再生水,鼓励节水投入,动员全社会力量构建节

水型社会。形成“超用加价,节约奖励”的机制,促进节约用水。

4 结论

选择水资源极端贫乏的马莲河流域进行了流域的水资源综合管理和优化配置研究工作,利用系统分析理论和优化技术建立了流域的大系统、多目标水资源优化配置模型,并利用优化的 NSGA-II 方法进行求解,得到流域 2020 年期望水资源优化配置方案下的最佳分配方案为:河流域总供水量 57 086×10⁴m³,工业供水量 21 690×10⁴m³(总产值约为 144.6 亿元),能源基地供水量 4 329×10⁴m³(总产值约为 346.32 万元),农业供水量 20 840×10⁴m³,生活供水量 9 452×10⁴m³,生态供水量 811×10⁴m³。对比期望方案供水量增加了 6 710×10⁴m³,综合缺水率减少了 11.41%。

与此同时,根据预测的流域的分配方案和预测的流域需水量,进行了流域的水资源平衡分析,通过平衡分析的结果进行流域的综合管理研究。2020 年在最优

水资源分配方案下,工业缺水率 3.21%、减少了 4.51%;能源基地缺水率 0.00%;农业缺水率 4.64%、缺水率增加 26.17%;生活缺水率 0.00%;生态缺水率 1.00%、缺水率增加了 1.00%。

参考文献:

- [1] 白宪台,郭元裕,关庆涛,等.平原湖区除涝系统优化调度的大系统模拟模型[J].水力学报,1987,(5):14-27. (BAI Xiantai, GUO Yuanyu, GUAN Qingtao, et al. Plain lakes waterlogging system optimization scheduling large system simulation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987,(5):14-27. (in Chinese))
- [2] 吴泽宁,丁大发,蒋水心.跨流域调水资源系统自优化模拟规划模型[J].系统工程理论与实践,1997,17(2):78-83. (WU Zening, DING Dafa, Jiang Shuixin, et al. Selfoptimization simulation and planning models of multi-basin water resources system[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1997,17(2):78-83. (in Chinese))
- [3] 刘丙军,陈晓宏.基于协同学原理的流域水资源合理配置模型和方法[J].水利学报,2009,40(1):60-66. (LIU Bingjun, CHEN Xiaohong. Water resources deployment model for river basin based on synergetic theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(1):60-66. (in Chinese))
- [4] 屈吉鸿,陈南祥,黄强,等.水资源配置决策的粒子群与投影寻踪耦合模型[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(4):391-395. (QU Jihong, CHEN Nanxiang, HUANG Qiang, et al. Coupled model of particle swarm optimization and projection pursuit for water resources allocation decision-making [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009,37(4):391-395. (in Chinese))
- [5] 陈立华,梅亚东,麻荣永.并行遗传算法在雅砻江梯级水库群优化调度中的应用[J].水力发电学报,2010,(6):66-70. (CHEN Lihua, MEI Yadong, MA Rongyong. Parallel genetic algorithm and its application to optimal operation of the Yalong river cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010,(6):66-70. (in Chinese))
- [6] 史银军,粟晓玲,徐万林,等.基于水资源转化模拟的石羊河流域水资源优化配置[J].自然资源学报,2011,26(8):1423-1434. (SHI Yinjun, LI Xiaoling, XU Wanlin, et al. Water resources optimal allocation based on simulation of water resources transformation in Shiyanghe River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(8):1423-1434. (in Chinese))
- [7] Hiraad Mousavi, S. Ramamurthy. Optimal design of multi-reservoir systems for water supply [J]. Advances in Water Resources, 2000, (23):613-624.
- [8] Roger Marcelin Faye, Salam Sawadogo. Long-term fuzzy management of water resource systems [J]. Applied Mathematics and Computation, 2003,(137):459-475.
- [9] Afzal Javaid Noble David H. Optimization model for alternative use of different quality irrigation water [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992,118(2):218-228.
- [10] Deb, Kalyanmoy, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions, 2002,6(2):182-197.
- [11] Bekele, E. and Nicklow, J. Multi-objective optimal control model for watershed management using SWAT and NSGA-II[A]. Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress[C]. 2007:1-10.
- [12] Baltar, Alexandre M., Darrell G. Fontane. Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008,134(3):257-265.
- [13] Chen, Li, James McPhee, William W-G. Yeh. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves [J]. Advances in Water Resources. 2007,30(5):1082-1093.
- [14] Atiquzzaman, Md, Shie-Yui Liong, Xinying Yu. Alternative decision making in water distribution network with NSGA-II [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006,132(2): 122-126.
- [15] 丁胜祥,董增川,王德智,等.基于 Pareto 强度进化算法的供水库群多目标优化调度[J].水科学进展,2008,(195):679-684. (DING Shengxiang, DONG Zenghuan, WANG Dezhi, et al. MOP of feeding reservoir group optimal operation based on SPEA [J]. Advances in Water Science, 2008,(195):679-684. (in Chinese))

Application of Integrated Water Resources Management Using Optimized NSGA-II Method in Malianhe River Basin

GAO Yayu¹, ZHANG Xinmin¹, TAN Long²

(1. Gansu Institute of Soil & Water Conservation Sciences, Lanzhou 730020, China; 2. West Institute of Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the characteristics that the short water resources in total, uneven distribution of interannual and annual water, and serious water pollution in the Malianhe River Basin, a large system and multi-objective water resources optimal allocation model was set up with the theory of system analysis and optimization technology. And the optimal allocation scheme under the expected water allocation conditions in 2020 was obtained using the method of optimized NSGA-II. The results show that the total water supply is $57\ 086 \times 10^4 \text{m}^3$, water supply for industry

(下转第 44 页)

- 方法[J]. 水利学报, 2008, 39(6):720-725. (JIANG Yunzhong, ZHAO Hongli, GAN Zhiguo, et al. Water resources reasonable allocation method based on the transpiration evaporation capacity index [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(6):720-725. (in Chinese))
- [7] 汤万龙, 钟玉秀, 吴涤非, 等. 基于 ET 的水资源管理模式探析[J]. 中国农村水利水电, 2007, (10):8-10. (TANG Wanlong, ZHONG Yuxiu, WU Difei, et al. Discussion and analysis of water resources management model based on evaporation-transpiration[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007,(10):8-10. (in Chinese))
- [8] 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 Nanxinag, LI Yuepeng, XU Chengguang. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 308-313. (in Chinese))
- [9] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005:130-138. (ZHOU Ming, SUN Shudong. Theory and Application of Genetic Algorithms [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 130-138. (in Chinese))
- [10] J.Afzal. D.H.Noble. Optimization model for alternative use of different quality irrigation water [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118:218-228.
- [11] 冯峰. 黄河流域典型区域目标蒸散发 (ET) 的确定及配置研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. (FENG Feng. Research on Calculation and Optimal Allocation of Target Evaporation (ET) in the Typical Region of the Yellow River Basin [D]. Beijing: Tsinghai University, 2013.

Case Study on Optimal Allocation and Control Measures of Area Target ET in Yellow River Basin

FENG Feng^{1,2}, RONG Xiaoming³, ZHANG Wenge², HE Hongmou²

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, 450003 China; 3. Kaifeng Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Kaifeng 475003, China)

Abstract: Aiming at the questions of optimal allocation of target ET based on R-ET (Runoff-Evapotranspiration) water resources management model for the Yellow River Basin, this paper constructed 4 objective functions and constraint condition based on Multi-Objective Genetic Algorithm, including the functions of water resources control, ET control, irrigation water guarantee and Eco & life water guarantee, and design parameters of MOGA to solve the optimal allocation questions. Ordos was taken as the research case, according to calculation of 5 water utilization schemes in 2015, the irrigation farmland target ET_{Ia} accounts for about 36% of the total target ET_{Ia} , the residential and industrial land ET_{Ia} accounts for about 20%, uncontrolled target ET_{Na} accounts for about 50%. Meanwhile, actual ET distribution ratio is as follows: Uncontrolled ET_N occupies 64.4% of the total actual ET, irrigation farmland ET_I occupies 33.6% the residential and industrial land ET_I occupies 2%. The comparison find that to achieve target ET, the reduction and control should focus on uncontrolled ET and the irrigation farmland ET. According to the actual situation in the study area, this paper put forward the control key of the sectional target ET and related measures, and lays the foundation of the necessary for the implementation R-ET water management for the Yellow River Basin.

Key words: Yellow River Basin; target evapotranspiration; optimal allocation; control measures; Ordos

(上接第 66 页)

is 21 690×10⁴m³(the total output value is about 14.46 billion Yuan), water supply for energy production is 4 329×10⁴m³ (the total output value is about 3.4632 billion Yuan), and water supply for agriculture, domestic and ecology is 20 840×10⁴m³, 9 452×10⁴m³, and 811×10⁴m³ respectively. Comparing the optimal allocation scheme with the expected solutions, the total water supply is increased by 6 710×10⁴m³, and the water shortage rate is decreased by 11.41%. Finally, integrated management research was completed according to the results of supply and demand balance analysis. Under the condition of the optimal water allocation scheme for 2020, the industry water shortage rate is 3.21% which is decreased by 4.51%, energy production base water shortage rate is 0.00%, agriculture water shortage rate is 4.64% which is increased by 26.17%, domestic water shortage rate is 0.00%, and ecology water shortage rate is 1.00% which is increased by 1.00%. The optimal allocation scheme achieved the best water distribution, which made the precious and limited water resources provide maximum social, economic and environmental benefits, and provide water resources supports for the rapid growth of economic and energy industry in the Malianhe River Basin.

Key words: integrated management of water resources; optimized NSGA-II method; optimal allocation; Malianhe River Basin