

【水资源·水环境】

黄河流域初始水权分配的 Pareto 前沿求解

林旭 鲍淑君 雷晓辉 王浩

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所 北京 100044)

摘要:黄河“87分水方案”提出至今已逾20 a,在黄河流域的经济社会快速发展、优化算法和计算机技术极大进步的背景下,有必要对黄河流域的初始水权分配问题重新进行探讨。针对黄河流域九省区的初始水权分配问题,提出了初始水权分配应当遵循的原则及其量化函数,并抛弃处理多目标问题的传统加权法,而是应用NSGA II算法计算其中4个原则的Pareto前沿,将黄河“87分水方案”与各种原则组合的Pareto前沿进行比较分析。最后,计算出对黄河“87分水方案”支配的方案集,并给出相应的推荐方案。结果表明:各项分配原则之间存在较大内在矛盾,且黄河“87分水方案”距这些原则的Pareto前沿仍有一定甚至较大距离。最终给出的推荐方案在各原则的表现上都较黄河“87分水方案”好。

关键词:初始水权分配; NSGA II算法; Pareto前沿; 黄河流域

中图分类号: TV213; TV882.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.06.020

Using NSGA II Algorithm to Work out the Pareto Front of Initial Water Rights in Yellow River Basin

LIN Xu, BAO Shu-jun, LEI Xiao-hui, WANG Hao

(Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The 1987 water rights allocation of the Yellow River has been proposed for more than 20 years. Considering the rapid development of both economy and society in the Yellow River basin, and the great progress of optimization algorithm and computer technology, it is necessary to discuss the water rights allocation problem again. At first, we discussed the allocation principles of initial water rights in the Yellow river basin, in which 9 provinces were concerned as agents, and the function expressions of these principles. Then we abandoned the traditional weighting method dealing with multi-objective problem frequently, instead of using NSGA II Algorithm to work out the Pareto fronts between the 4 chosen principles, and compared the 1987 water allocation scenario with these Pareto fronts. Finally, we figured out a scenario set composed of the scenarios dominating the 1987 water allocation scenario, and gave a recommended scenario.

Key words: initial water rights; NSGA II algorithm; Pareto front; Yellow River basin

黄河流域水资源极度缺乏,且不乏浪费水资源的现象。建立并完善水权市场,是解决黄河水资源困局的有效手段。初始水权分配是建立水权市场的前提,故笔者针对黄河流域初始水权分配进行具体研究。此外,黄河“87分水方案”的提出距今已有20多a,流域内各省区的经济社会情况都已发生了很大变化,在新的形势下,对黄河初始水权分配开展新的研究是必要的。过去受算法和计算能力的限制,对于多目标问题,大都采用加权法转化为单目标问题处理,无法揭示各原则间的相互作用,且权重选取具有主观性。本研究采用NSGA II算法,直接算出各原则间的Pareto前沿,即最优可行解的集合,从而避免了传统加权法的缺点。

1 初始水权分配的相关原则

由于水资源来源、用途及利用方式的复杂性和多样性,因此初始水权分配表现为多目标、多准则的问题^[1]。一般而言,

初始水权分配应考虑保障生态环境用水原则、保障生活用水原则、历史现状原则、公平性原则、高效性原则等。但考虑到黄河流域水资源极度缺乏,生态环境用水、生活用水必须优先保证,不属于优化范畴,故只对历史现状原则、公平性原则、高效性原则进行讨论。

1.1 历史现状原则

初始水权分配与现状的差异越小,改革阻力就越小,可行性就越高。西方国家一般采用占用优先原则。历史现状原则是一种弱化了了的占用优先原则^[2],将占用优先原则按时间先后确定优先权,改为考虑历史和现状各地区的用水状况,来进行初始水权分配。历史现状原则,采用各区域初始分配水量与基准年用水量之比进行量化,即

收稿日期:2013-10-08

基金项目:水利部公益性行业科研专项(20131102, 2013467042, 201301001)。

作者简介:林旭(1988—),男,海南文昌人,硕士研究生,研究方向为复杂水利工程群优化调度。

E-mail: linxu.thu@gmail.com

$$RW_i = \frac{WD_i}{WO_i}$$

式中: WD_i 为初始分配水量; WO_i 为基准年用水量。

整个流域的历史现状原则满足程度,可用各地区初始分配水量与基准年用水量之比的差异来量化,即比值差异越小,初始水权的分配越符合历史现状原则:

$$RFS = \frac{\min(RW_i)}{\max(RW_i)} = \min\left(\frac{WD_i}{WO_i}\right) / \max\left(\frac{WD_i}{WO_i}\right)$$

1.2 公平性原则

不言而喻,公平保障每个地区的用水权益,是十分重要的原则。一个公平的初始水权分配方案,能使得落后地区可从水权交易中通过卖水给发达地区获得发展所需资金,是保障发展权的体现。一般而言,公平分配水资源,可认为是基于地区人均或单位耕地面积平均水资源量进行分配,其公平指数计算公式如下。

(1) 按人口分配。公式为

$$FP = \frac{\min(WD_i/Pop_i)}{\max(WD_i/Pop_i)}$$

式中: WD_i 为区域水资源分配量; Pop_i 为区域人口数。

(2) 按耕地面积分配。公式为

$$FA = \frac{\min(WD_i/A_i)}{\max(WD_i/A_i)}$$

式中: WD_i 为区域水资源分配量; A_i 为区域耕地面积。

1.3 高效性原则

采用单方水 GDP 产值来量化用水效率:

$$WGR_i = \frac{GDP_i}{WO_i}$$

式中: GDP_i 为第 i 个地区的国内生产总值; WO_i 为基准年第 i 个地区的水资源使用量。 WGR_i 越大,该区域的用水效率越高。对于流域整体而言,新的初始水权分配方案中需考察流域各地区的用水效率,流域整体的用水效率可以通过下式计算^[2]:

$$RHS = \frac{\sum_{i=1}^n WD_i WGR_i - W_{su} \min(WGR_i)}{W_{su} \max(WGR_i) - W_{su} \min(WGR_i)}$$

式中 W_{su} 为流域可用水总量。

RHS 越大说明该初始水权分配方案下,流域整体的用水效率越高。

2 NSGA II 算法介绍

以尽量满足初始水权分配需要考虑的各项原则为目标时,初始水权分配问题就成为典型的多目标优化问题。本研究应用 NSGA II 算法,计算出黄河流域初始水权分配考虑的各项原则的 Pareto 前沿,揭示这些原则之间的量化关系,为初始水权分配的决策提供科学参考。NSGA II 算法步骤如下。

(1) 随机产生初始种群,种群规模为 N ,计算每个个体的各项目标函数值。

(2) 计算每个个体的支配层级和距离,将个体按照支配层级进行排序。

(3) 筛选层级靠前的 $N/2$ 个个体产生后代,若第 $N/2$ 个个体所在的层级个体数加上前面层级的个体数超过 $N/2$,则按距

离排序,淘汰距离小的个体。

(4) 按一定规则随机选取(3)产生的 $N/2$ 个个体杂交或突变产生子代,计算子代的函数值。

(5) 计算子代个体的支配层级和距离,将父代和子代一起,按支配层级排序,选取前 N 个个体以保持种群规模不变。同一层级内,距离大的个体优于距离小的个体。

(6) 检查是否满足迭代终止条件,若是,输出结果并保存;若否,回到(3)继续迭代。

3 黄河流域初始水权分配的 Pareto 前沿计算

3.1 模型建立

对历史现状原则、公平性原则、高效性原则之间的 Pareto 前沿进行计算,其中公平性原则分为人均公平和耕地面积平均公平两类分别计算。对于现状数据 WO 的选取,采用 2000 年黄河流域各省区的用水量。

遗传算法中,每个个体包含 9 个变量 $x_i, i=1, 2, \dots, 9, x_i \in (0, 5]$,变量的物理意义为各区域的历史现状满足程度, $x_i = RW_i = \frac{WD_i}{WO_i}$,即当前方案的水量与 2000 年的实际用水量之比。算法将变量上限设定为 5,即分配给第 i 个地区的初始水权最多可为 WO_i 的 5 倍,原因是黄河“87 分水方案”水量和 2000 年实际用水量最大差距有 3 倍多。

历史现状原则的目标函数为

$$f_1 = \frac{\min(x_i)}{\max(x_i)}$$

人均公平目标函数为

$$f_2 = \frac{\min(WD_i/Pop_i)}{\max(WD_i/Pop_i)} = \frac{\min(x_i WO_i/Pop_i)}{\max(x_i WO_i/Pop_i)}$$

耕地面积平均公平目标函数为

$$f_3 = \frac{\min(WD_i/A_i)}{\max(WD_i/A_i)} = \frac{\min(x_i * WO_i/A_i)}{\max(x_i * WO_i/A_i)}$$

高效性目标函数为

$$f_4 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i GDP_i - W_{su} \min(WGR_i)}{W_{su} \max(WGR_i) - W_{su} \min(WGR_i)}$$

3.2 算法稳定性

以人均公平和高效性原则为目标,选取种群规模为 200 个个体,分别迭代 10、200、500、1 000 次。运行结果见图 1~图 4。

从图 1、图 2 可看出,迭代 10 次时,由于迭代次数较少,种群个体的分布较为散乱;迭代 200 次时,种群个体的分布有序, Pareto 前沿轮廓开始出现。

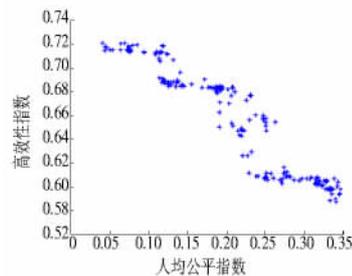


图 1 NSGA II 迭代 10 次结果

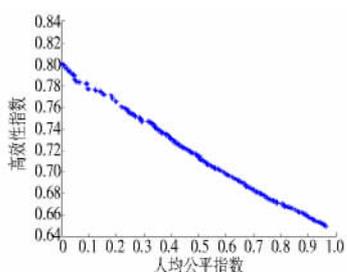


图2 NSGA II 迭代 200 次结果

从图 3、图 4 可看出, 迭代 500 次时种群个体已基本到达 Pareto 前沿; 迭代 1 000 次时, 种群个体在 Pareto 前沿上均匀分布。

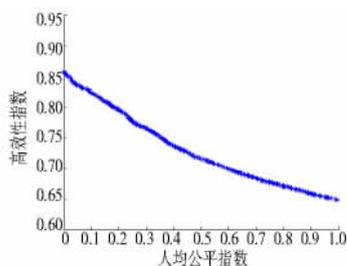


图3 NSGA II 迭代 500 次结果

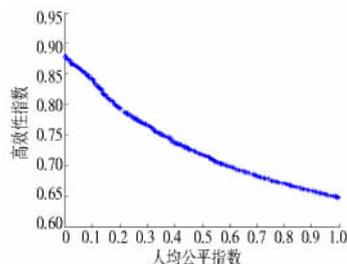


图4 NSGA II 迭代 1000 次结果

随着迭代次数的增加, 种群往 Pareto 边界的方向进化, 在到达边界后, 则沿边界往最稀疏的地方进化, 最终沿整个 Pareto 边界均匀分布。故可认为在迭代 1 000 次后, 种群稳定均匀地分布在 Pareto 前沿曲线上。

3.3 Pareto 前沿曲线绘制

3.3.1 人均公平原则与高效性原则

图 5 为人均公平与高效性的 Pareto 曲线, 图中圆圈为黄河“87 分水方案”对应的点, 由于黄河“87 分水方案”九省区总用水量略小于九省区 2000 年的实际用水总量, 后者为前者的 1.025 倍, 故黄河“87 分水方案”的效率显得略低, 考虑对其修正: 将黄河“87 分水方案”按初始水权分配比例不变, 总水量调整为与 2000 年相同, 则对应的点为 + 号处。从图 5 中可知, 黄河“87 分水方案”不在 Pareto 前沿上, 且与 Pareto 前沿有较大距离。

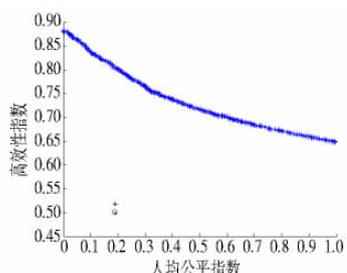


图5 人均公平与高效性的 Pareto 曲线

3.3.2 人均公平原则与耕地面积平均公平原则

图 6 为人均公平与耕地面积平均公平的 Pareto 曲线, 图中

圆圈为黄河“87 分水方案”对应的点, + 号为修正后方案对应的点。由于两者计算时与总水量无关, 只与各地区水权分配的相对比例有关, 故两点重合。从图 6 中可知, 两种公平衡量方法存在较大矛盾, 这反映了黄河上游省区的灌区人口比较稀疏而下游灌区人口稠密的现实。黄河“87 分水方案”距离 Pareto 前沿较近, 换言之, 从综合公平的角度而言黄河“87 分水方案”表现较好, 但仍有可以改进的空间。

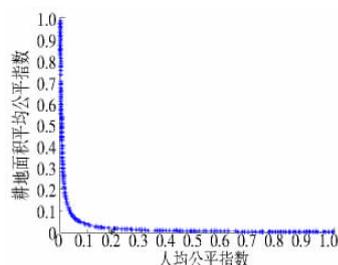


图6 人均公平与耕地面积平均公平的 Pareto 曲线

3.3.3 耕地面积平均公平原则与高效性原则

图 7 为耕地面积平均公平和高效性的 Pareto 曲线, 图中圆圈为黄河“87 分水方案”对应的点, + 号为修正后方案对应的点。修正后的点同样不在 Pareto 前沿上, 且与 Pareto 前沿有较大距离。从图 7 中可知, 黄河“87 分水方案”的耕地面积平均公平指数很低, 其原因: 人均公平与耕地面积平均公平原则间有较大冲突, 且黄河“87 分水方案”侧重于人均公平, 位于人均公平—耕地面积平均公平的 Pareto 前沿附近。

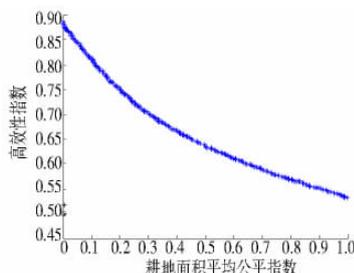


图7 耕地面积平均公平和高效性的 Pareto 曲线

3.3.4 历史现状原则与高效性原则

图 8 为历史现状与高效性的 Pareto 曲线, 图中圆圈为黄河“87 分水方案”对应的点, + 号为修正后方案对应的点。修正后的点不在 Pareto 前沿上, 且与 Pareto 前沿有一定距离, 但相对人均、耕地面积平均公平和高效性的情形, 距离要小得多。图 8 中横坐标 1 代表 2000 年的情形, 说明 2000 年的用水情形较黄河“87 分水方案”变化很大, 且效率要低一些。

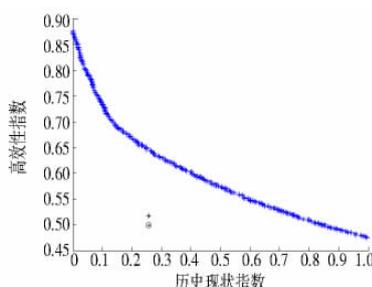


图8 历史现状与高效性的 Pareto 曲线

3.3.5 历史现状原则与人均公平原则

图 9 为历史现状与人均公平的 Pareto 曲线, 图中圆圈为黄

河“87分水方案”对应的点,+号为修正后方案对应的点。由于两者计算时与总水量无关,只与各地区水权分配的相对比例有关,故两点重合。两点都不在 Pareto 前沿上,且与 Pareto 前沿有较大距离,不过值得注意的是,黄河“87分水方案”比2000年实际耗水情形在人均公平指数上表现要好一些。

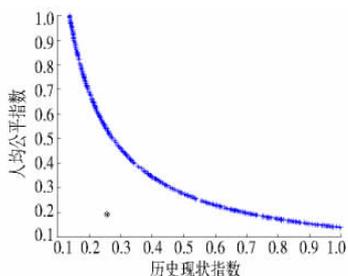


图9 历史现状与人均公平的 Pareto 曲线

3.3.6 历史现状原则与耕地面积平均公平原则

图10为历史现状与耕地面积平均公平的 Pareto 曲线,图中圆圈为黄河“87分水方案”对应的点,+号为修正后方案对应的点。由于两者计算时与总水量无关,只与各地区水权分配的相对比例有关,故两点重合。从图10中可知,黄河“87分水方

案”离 Pareto 前沿有一定距离,2000年现状比黄河“87分水方案”在耕地面积平均公平方面略好。

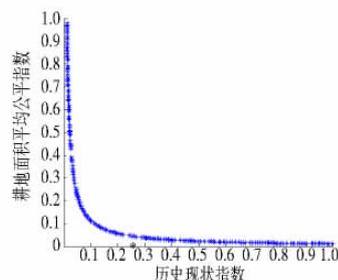


图10 历史现状与耕地面积平均公平的 Pareto 曲线

3.4 4个原则的 Pareto 前沿及推荐初始水权分配方案

3.4.1 4个原则的 Pareto 前沿及对黄河“87分水方案”修正解的支配解集

将种群规模扩大一倍至400个个体,达到20个对黄河“87分水方案”修正解的支配解(简称支配解)时停止迭代,结果见表1。

表1 对黄河“87分水方案”修正解的支配解集

编号	RW_i									各原则满足程度			
	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	人均	耕地面积平均	高效性	历史现状
修正解	1.018 5	3.014 6	0.973 1	1.016 8	0.774 1	0.884 2	1.581 7	1.085 6	1.022 1	0.190 9	0.004 4	0.517 6	0.256 8
支配1	0.745 8	1.505 7	1.545 3	0.514 2	0.463 5	1.305 2	1.541 4	1.163 0	0.970 8	0.457 5	0.007 4	0.566 5	0.299 9
支配2	0.743 7	1.413 3	1.582 2	0.518 7	0.415 9	1.268 7	1.536 5	1.136 1	0.942 3	0.508 3 ^①	0.007 1 ^②	0.552 2	0.262 8
支配3	0.768 1	1.490 8	1.531 2	0.523 7	0.512 2	1.380 2	1.577 0	1.103 2	0.942 7	0.423 6	0.008 3	0.569 7	0.324 8
支配4	0.691 2	1.331 1	1.150 5	0.494 5	0.461 6	1.582 9	1.716 7	1.082 8	0.995 6	0.450 5	0.008 3	0.587 7	0.268 9
支配5	0.806 3	1.322 7	1.192 0	0.660 9	0.608 7	1.206 2	1.323 2	1.262 8	1.010 6	0.299 1	0.011 1	0.545 2	0.460 0
支配6	0.692 9	1.416 0	1.118 0	0.495 8	0.455 7	1.514 6	1.755 9	1.074 8	0.974 3	0.465 0	0.007 7	0.575 7	0.259 5 ^②
支配7	0.690 1	1.300 0	1.156 6	0.487 2	0.461 4	1.581 4	1.695 1	1.083 0	0.995 5	0.440 1	0.008 5	0.585 7	0.272 2
支配8	0.772 8	1.337 2	1.261 3	0.786 8	0.640 5	1.239 6	1.408 0	1.194 0	0.854 6	0.302 5	0.011 5	0.529 8	0.454 9
支配9	0.774 6	1.342 4	1.264 0	0.779 1	0.658 9	1.263 9	1.296 1	1.202 4	0.862 0	0.270 6 ^②	0.011 0	0.525 8 ^②	0.490 8 ^①
支配10	0.667 9	1.503 6	1.228 8	0.640 5	0.525 4	1.291 2	1.692 8	1.175 1	0.928 4	0.419 9	0.008 4	0.559 6	0.310 4
支配11	0.777 1	1.350 7	1.261 2	0.782 8	0.628 2	1.249 0	1.404 3	1.210 7	0.854 7	0.307 5	0.011 2	0.531 9	0.447 3
支配12	0.772 9	1.301 4	1.231 4	0.818 4	0.637 1	1.259 3	1.429 7	1.198 5	0.823 5	0.308 8	0.011 8 ^①	0.528 1	0.445 6
支配13	0.695 5	1.256 7	1.172 2	0.487 7	0.473 6	1.539 5	1.680 6	1.093 5	1.012 6	0.414 5	0.009 1	0.585 0	0.281 8
支配14	0.674 2	1.423 8	1.218 6	0.599 4	0.543 4	1.304 9	1.850 6	1.156 7	0.936 0	0.409 3	0.009 2	0.574 8	0.293 6
支配15	0.759 5	1.357 9	1.077 3	0.554 9	0.564 9	1.571 5	1.762 5	1.021 5	1.047 9	0.361 5	0.010 0	0.596 7 ^①	0.314 9
支配16	0.665 4	1.411 3	1.233 5	0.628 9	0.541 2	1.262 0	1.700 5	1.160 1	0.933 0	0.398 4	0.009 2	0.556 4	0.318 2
支配17	0.665 7	1.360 4	1.228 8	0.624 3	0.543 9	1.292 1	1.738 6	1.152 5	0.943 2	0.390 7	0.009 6	0.564 4	0.312 8
支配18	0.676 3	1.400 9	1.239 6	0.655 7	0.559 1	1.253 1	1.716 0	1.160 3	0.931 2	0.382 9	0.009 6	0.558 7	0.325 8
支配19	0.673 5	1.392 9	1.187 7	0.605 0	0.538 8	1.296 2	1.865 6	1.153 7	0.941 3	0.403 8	0.009 3	0.573 7	0.288 8
支配20	0.684 2	1.347 9	1.198 0	0.624 9	0.543 1	1.239 2	1.710 9	1.182 5	0.959 2	0.387 7	0.009 7	0.560 1	0.317 4

注:①为所有支配解中某个目标值最大的解;②为某个目标值最小的解。

从表1可知,黄河“87分水方案”在高效性原则上与支配解集很接近,在历史现状原则上比较接近,而对于公平性的人均、耕地面积平均两原则的满足程度则差距较大。另外,支配解集中历史现状指数最高的解,同时也是高效性指数最低、人均公平指数最低的解,不过高效性指数的波动范围较小,取值比较集中,有一些偶然性,不能简单地说明高效性原则与历史现状原则之间矛盾大;而人均公平指数波动较大,可认为历史现状原则与人均公平原则间存在较大冲突。人均公平指数最大的解同时也是耕地面积平均公平指数最小的解,这反映了沿黄九省区灌溉面积分布情况与各省区人口分布情况差距较大,这可用西部灌区(如宁夏、内蒙古的灌区)人口明显较东部灌区少

来解释。将表1中支配2、9、12、15作为偏向人均公平、历史现状、耕地面积平均公平、高效性的极端解,与黄河“87分水方案”、2000年耗水情况分别对比,结果见图11~图14。

3.4.2 推荐初始水权分配方案

支配5对应的初始水权分配方案,在对黄河“87分水方案”修正解集中,具有第二高的历史现状指数、中等的高效性指数、较高的耕地面积平均公平指数、较低的人均公平指数。从前面的分析可知,两种公平性指标间存在较大矛盾,二者不可兼得,此外,支配5相对黄河“87分水方案”,人均公平指数提高了50%以上,故支配5较低的人均公平指数可以接受。因此,可以支配5为基础,微调得到推荐的黄河流域初始水权分

配方案,见表2。

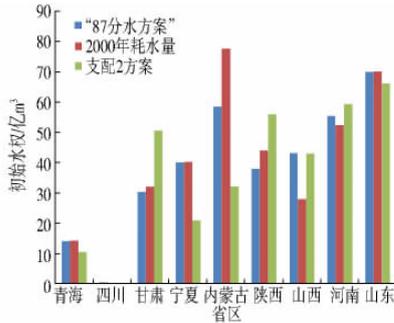


图11 黄河“87分水方案”、2000年耗水量与偏向人均公平方案对比

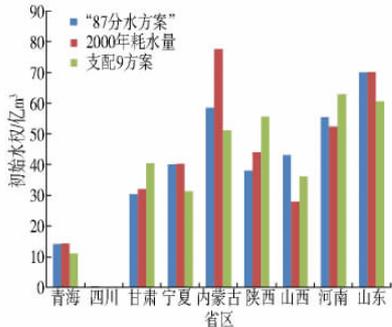


图12 黄河“87分水方案”、2000年耗水量与偏向历史现状方案对比

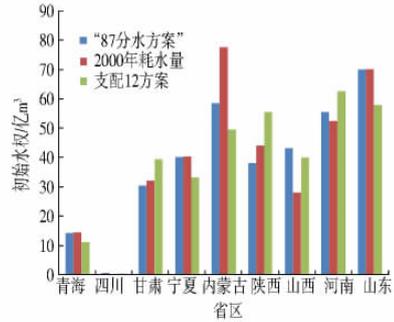


图13 黄河“87分水方案”、2000年耗水量与偏向耕地面积平均方案对比

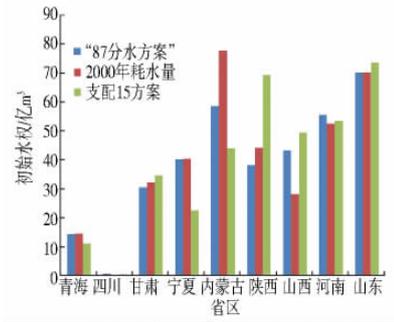


图14 黄河“87分水方案”、2000年耗水量与偏向高效方案对比

表2 推荐方案与“87黄河分水方案”修正解对比

方案	RW_i									各原则满足程度			
	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	人均	耕地面积平均	高效性	历史现状
“87分水方案”修正解	1.018 5	3.014 6	0.973 1	1.016 8	0.774 1	0.884 2	1.581 7	1.085 6	1.022 1	0.190 9	0.004 4	0.517 6	0.256 8
推荐	1.123 5	1.327 8	1.123 5	0.674 1	0.612 8	1.225 7	1.348 2	1.297 2	1.031 6	0.302 7	0.011 1	0.560 1	0.454 5
支配5	0.806 3	1.322 7	1.192	0.660 9	0.608 7	1.206 2	1.323 2	1.262 8	1.010 6	0.299 1	0.011 1	0.545 2	0.460 0

由表2可知,黄河“87分水方案”给予四川的初始水权为四川2000年耗水的3倍,为公平起见,将其调低。而青海作为黄河主要发源地,黄河水资源有相当一部分产自青海,支配5给出的青海初始水权相对2000年耗水比例低于1不合理,同样为公平起见,将其调至1.1。其他地区按流域分配初始水权总量作相应微调。推荐方案在历史现状指数相对支配5略微降低的情况下,耕地面积平均公平指数不变,人均公平指数略有改善,高效性指数改善较大。综上所述,推荐初始水权分配方案见表3。

表3 黄河初始水权方案对比 亿 m³

方案	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
“87分水方案”	14.1	0.4	30.4	40	58.6	38	43.1	55.4	70
2000年耗水量	14.19	0.14	32.02	40.32	77.59	44.05	27.93	52.31	70.19
推荐方案	15.94	0.18	35.97	27.18	47.55	53.99	37.65	67.85	72.41

4 结 语

本研究针对初始水权分配问题,在原则的选取和量化分析函数方面,参考了前人的工作^[1-2]。对于多目标多原则问题,过去一般采用加权法转化为单目标求解,这一方法优点在于较为简单,但缺点在于忽略了原则之间的联系和内在矛盾,而是

依赖主观偏好给出权重。本研究的创新点在于,以黄河流域初始水权分配问题为例,通过NSGA II算法揭示了各目标原则之间的Pareto前沿关系,并给出了对黄河“87分水方案”修正支配解的推荐方案。算例结果证明:传统的加权法给出的优化结果无法保证位于多目标最优的Pareto前沿上,甚至距Pareto前沿有不小的距离,而NSGA II算法虽然只是给出多目标优化的Pareto前沿,最终方案仍需要人为地在Pareto前沿上选取,但避免了使用传统多目标加权法时,相关利益方为权重值博弈,得到的初始水权分配结果却不在Pareto前沿上的局面出现。简而言之,NSGA II求解Pareto前沿这一方法,主观性更小,得到的最终方案一定属于最优解集,因而比权重法更合理,更适于多目标优化决策;除了初始水权分配问题,其他多目标优化决策也可以采用这一方法。

参考文献:

[1] 郑航. 初始水权分配及其调度实现——以干旱区石羊河流域为例[D]. 北京:清华大学,2009.
 [2] 李海红. 流域级水资源使用权分配模型研究[D]. 北京:清华大学,2006.

【责任编辑 许立新】