

# 黄河流域区域目标 ET 的优化配置及调控措施实例研究

冯 峰<sup>1,2</sup>, 荣晓明<sup>3</sup>, 张文鸽<sup>2</sup>, 何宏谋<sup>2</sup>

(1.黄河水利职业技术学院小流域水利研究中心, 河南 开封 475004;

2.黄河水利科学研究院水资源研究所, 河南 郑州 450003;

3.河南省开封水文水资源勘测局, 河南 开封 475003)

**摘要:**针对黄河流域 R-ET 水资源管理模式中目标 ET 的优化配置问题,基于多目标遗传算法,构建了水资源总量控制、ET 总量控制、粮食用水保障和生态生活用水保障,共 4 个目标函数及约束条件,设计了遗传算法的相关参数,从而对目标 ET 的优化配置进行求解。以鄂尔多斯地区为研究实例,对 2015 年 5 个方案的目标 ET 进行优化配置,其中灌溉耕地目标  $ET_{Ira}$  占到总目标  $ET_{Ia}$  的 36% 左右;居工地  $ET_{Jia}$  占到 20% 左右,不可控目标  $ET_{Nia}$  占到 50% 左右。各分项实际 ET 的分布比例为:不可控  $ET_N$  为实际 ET 总值的 64.4%,灌溉耕地  $ET_I$  为 33.6% 和城乡居工地  $ET_J$  为 2%,经过对比认为要达到目标 ET,削减和调控的重点在不可控 ET 和耕地 ET。根据研究区的实际情况,提出了各分项目标 ET 的调控重点和相关措施,为下一步实施黄河流域的 R-ET 水资源管理奠定了必要的基础。

**关键词:**黄河流域;目标 ET;优化配置;调控措施;鄂尔多斯

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)05-0039-06

## 引言

黄河是我国第二大河,是西北、华北地区重要的供水水源<sup>[1]</sup>。黄河流域属资源型缺水流域,供需矛盾突出,以“耗水”管理替代“取水”管理,控制区域 ET 有望实现“真实”节水<sup>[2]</sup>。区域目标 ET 的水资源管理,就是以耗水量控制为基础的水资源管理,其实质是在传统水资源管理的需求侧进行更深层次的调控和管理,是立足于水循环全过程的、基于流域/区域空间尺度的、动态的水资源管理<sup>[3]</sup>。王浩等对黄河流域进行了基于区域 ET 结构的土壤水资源的消耗效用研究,也进一步说明了以“ET 管理”为核心的现代水资源管理模式的必要性和可行性<sup>[4-5]</sup>。蒋云钟等<sup>[6]</sup>基于真实节水理念,提出了基于流域或区域蒸腾蒸发量(ET)指标的,以可消耗 ET 量分配为核心的水资源合理配置技术框架。汤万龙等<sup>[7]</sup>从宏观上探讨了一种基于 ET 的水资源管理模式,定性构建了基于 ET 的用水分配以及用水转换模型。

在现代变化环境下,针对水资源短缺日益严重的形势,立足于水文循环,进行以水资源消耗为核心的水资源管理不仅是非常必要的,而且是非常迫切的,是资源型缺水地区加强水资源管理的必然发展趋势。紧密结合实行最严格水资源管理制度建设的重大需求,针对黄河流域传统水资源管理模式存在的问题,开展区域目标 ET 优化配置研究,并选择鄂尔多斯地区为研究实例进行验证和分析,以点带面,探索黄河流域水资源管理的新模式。

## 1 区域目标 ET 的优化配置方法

### 1.1 多目标遗传算法的求解模型

区域目标 ET 优化配置是利用系统工程理论,将目标 ET 作为一种可分配的水资源,在各分项目标 ET 间进行最优化分配。该问题是个多目标的优化配置问题,根据实际 ET 的各分项情况,主要进行不可控目标  $ET_{Nia}$ 、灌溉耕地目标  $ET_{Ira}$ 、居工地  $ET_{Jia}$  之间的分配。采用 MATLAB 中的多目标遗传算法 MOGA 程序(Multi-

收稿日期:2013-12-20

基金项目:国家自然科学基金-河南省人才培养联合基金项目(U1304503);河南省教育厅科学研究重点项目(14A570002)

作者简介:冯峰(1978-),女,河南驻马店人,博士,副教授,黄河水利科学研究院与清华大学联合培养博士后,研究方向为水文学及水资源、水资源优化利用。E-mail: fengfeng\_624@163.com

Objective Genetic Algorithm)进行优化计算,将区域目标 ET 优化配置问题模拟为生物进化问题,以各分项目标 ET 作为决策变量,对决策变量进行编码并组成可行解集,通过判断每一个体的满意程度来进行优胜劣汰,从而产生新一代可行解集,如此反复迭代来完成水资源优化配置<sup>[8]</sup>。多目标遗传算法的优化过程为,首先随机生成几组初始目标 ET 预分配方案,然后通过代入已建立的优化模型,进行遗传操作,再从初始分配方案中选择出一些相对较优的分配方案作为下一次优化的初始方案集。重复上述优化过程,直至寻得一组最优解集。遗传操作的过程即为一个优胜劣汰的过程,具体求解步骤如下:

第一步,对各决策变量进行编码。

第二步,利用遗传算法求解出其初始可行解,带入目标函数中计算出函数值,利用权重系数变化法<sup>[9]</sup>计算出可行解的适应度,寻找最优解。

第三步,第一级各子区求得的最优解和相应的适应度值反馈到第二级,进行第二级系统协调。

第四步,第二级以反馈得到的信息为基础,解码并利用权重系数变化法计算适应度,进行选择、交叉、变异等遗传操作,得到新一代种群。

第五步,判断新的种群中最优个体是否满足终止条件,或进化代数是否达到预定值。若已满足,即目标 ET 已达到最优分配,停止进化计算,输出优化计算成果。否则,将新一代种群即新的预分方案传递到第一级,即转到第 2 步进行子区优化,直到满足终止条件或进化代数为止。

## 1.2 优化配置的目标函数

确定区域目标 ET 优化配置模型的目标函数,以研究区域的水资源总量控制为总体目标,同时考虑粮食不减产,居民生活水平不下降,区域环境生态的可持续发展为主要目标,对应为 4 个目标函数:水资源总量控制、目标 ET 总量控制、粮食安全用水保障、生态生活用水保障<sup>[10]</sup>。

(1)区域目标 ET 优化配置的水资源总量控制目标函数。该目标函数使各分项目标 ET 的水资源使用量之和越小越优。

$$f_1(x)=\min\left\{\sum_{j=1}^J\left[\sum_{i=1}^I(b_{ij})x_{ij}\right]\right\} \quad (1)$$

式中: $b_{ij}$ 为目标 ET $i$ 的  $j$  分项的有效使用面积,  $\text{km}^2$ ;  $x_{ij}$ 为目标 ET $i$ 的  $j$  分项值,  $\text{mm}$ 。

(2)区域目标 ET 优化配置的总量控制目标函数。

目标 ET 进行分配,总是期望目标 ET 值越小越好,因此用目标 ET 与各分项目标 ET 之和的差来反映,此值应越大越优。

$$f_2(x)=\max\left\{ET_{ia}-\left[\sum_{j=1}^J\left(\sum_{i=1}^I(x_{ij})\right)\right]\right\} \quad (2)$$

(3)区域目标 ET 优化配置的粮食用水保障目标函数。不能因为过度的强调控制目标 ET,而使研究区域的粮食安全受到威胁,保障粮食不减产或少减产的目标下,尽量减少 ET 的产生。因为用分项 ET 的分配比例关系来进行控制,按目前没有采取节水措施的情况下实际产生的 ET 作为上限,从而保障当地的粮食安全。

$$f_3(x)=\min[A-(x_{ij}/ET_{ia})] \quad (3)$$

式中: $A$ 为研究区域耕地分项实际 ET 的控制比例上限。

(4)区域目标 ET 优化配置的生态生活用水保障目标函数。不能因为过度的强调控制目标 ET,而使研究区域的生态用水受到挤占,生活水平下降,在保障生态和生活不影响的目标下,尽量减少目标 ET 的产生。因为,用分项 ET 的分配比例关系来进行控制。

$$f_4(x)=\min\left[ET_{ia}\times B-\left(\sum_{i=1}^I(x_{ij})\right)\right] \quad (4)$$

式中: $B$ 为研究区域生态生活的分项实际 ET 的控制比例上限。

## 1.3 优化配置的约束条件

从区域目标 ET 优化配置的各方面协调考虑,设置了不同方案的区域水资源可利用量约束、非负约束。

(1)研究区域可利用水资源量约束

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq W_i \quad (5)$$

式中: $W_i$ 为水资源的各分项使用  $i$  可供水量上限。

(2)非负约束

$$x_{ij} \geq 0 \quad (6)$$

## 2 实例计算

### 2.1 研究区概况

鄂尔多斯市地处黄河内蒙古段右岸,西北东被黄河环绕,总长度 728 km。境内毛乌素沙地、库布其沙漠占总面积 48%,丘陵区 and 干旱硬梁区占总面积 48%,属典型的温带大陆性气候,风大沙多,降雨量少且时空分布极不均匀,年降水量 150~300mm,年蒸发能力 2 000~3 000mm,境内水资源总量  $29.6 \times 10^8 \text{m}^3$ ,人均水资源  $1 920 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{人}$ ,地均  $3.41 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ,均低于全

国全区平均水平,黄河年过境水量  $306 \times 10^8 \text{m}^3$ , 分配给鄂尔多斯市的黄河水初始水权为  $7.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 。该地区十年九旱,水资源匮乏,属于资源性、结构性、工程性缺水的地区,同时该地区所属的内蒙古自治区年均超黄河分水指标  $13.86 \times 10^8 \text{m}^3$ , 随着该区域工业及经济的发展,水资源短缺及超用黄河水的情况会更加严重。因此研究该区域的目标 ET 的相关问题,对黄河流域实施 R-ET 水资源管理模式具有典型和现实意义<sup>[11]</sup>。

### 2.2 研究区域目标 $ET_{ta}$

计算研究区域鄂尔多斯市的目标 ET,共设计 5 个计算方案,其中方案 1 的现状和方案 5 的节水方案共相差  $2 \times 10^8 \text{m}^3$  的水量。方案 1 和当前 2010 年用水保持一致,过境水根据国家水权分配方案为黄河水量引用  $7 \times 10^8 \text{m}^3$ ,地下水为可开采量的 60% 为  $8.88 \times 10^8 \text{m}^3$ ,闭流区水量不变为  $1.75 \times 10^8 \text{m}^3$ ;方案 2 为扩大黄河水引用量至  $8 \times 10^8 \text{m}^3$ ;方案 3 为在扩大黄河水引用量的基础上,压采地下水至  $7 \times 10^8 \text{m}^3$ ;方案 4 为减少黄河水引用量至  $6 \times 10^8 \text{m}^3$ ,同时地下水压采至  $8 \times 10^8 \text{m}^3$ ;方案 5 为减少黄河水引用量至  $6 \times 10^8 \text{m}^3$ ,同时地下水压采至  $7 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

目标 ET 的组成包括:(1)通常意义下的 ET,即植被的蒸腾、土壤或水面的蒸发;(2)工农业生产时固化在产品中,且被运出本区域的耗水(消耗在本区域的产品水最终变成了 ET)。从耗水平衡的角度来看,区域目标 ET 可以表达如下:

$$ET_{ta} = ET_R + W_c = P + W_{in} + W_D - W_{out} - W_{sea} - \Delta W \quad (7)$$

式中: $ET_{ta}$  为区域目标 ET; $ET_R$  为通常意义下的蒸腾蒸发,包括植被 ET、土壤 ET、水面 ET、生产和生活 ET; $W_c$  为运出本区域的工农业产品中的含带的水量; $P$  为水平年的降水总量; $W_{in}$  为年入境水量; $W_D$  为外流域调入水量; $W_{out}$  为年出境水量; $W_{sea}$  为年入海水量; $\Delta W$  为当地水资源(包括地表水库、河道槽蓄和地下水)蓄变量,当地水资源量增加为正值,当地水资源量减少为负值。

确定鄂尔多斯目标 ET 计算设定水平年为 2015 年,降水量取 1961~2010 年系列的均值为 322.8mm,鄂尔多斯境内无大的支流,黄河沿其西北周边流过,因此入境、出境和入海水量均忽略不计,假定认为当地水资源蓄变量没有增减。根据不同的跨流域调水和超采地下水量组合设定,用式(7)计算 5 个方案的目标  $ET_{ta}$  (见表 1)。

### 2.3 目标 ET 优化配置结果

根据 MATLAB 中的遗传算法 GA (Gentic Algorithm) 的要求,先撰写不同方案的适用度函数 (Fitness Function) 的 M 文件,将水资源总量控制、目标 ET 总量控制、粮食安全用水保障、生态生活用水的保障,共 4 个目标按等权重考虑。根据研究区域的实际情况,遵循以下配置原则:优先配置给灌溉耕地分项目标 ET,优先保证生态用水。遗传算法计算参数设置如下:取种群大小 popsize=40;最大进化代数 maxgen=100;交叉率 pcross=0.80;变异率 pmutation=0.20,基于多目标遗传算法的方案 2 的目标 ET 优化配置最优适应度,见图 1。

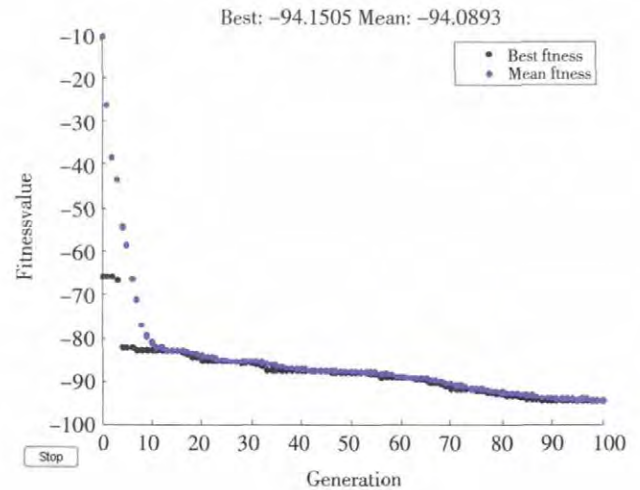


图 1 基于多目标遗传算法的方案 2 的目标 ET 优化配置最优适应度  
Fig.1 The optimal fitness of optimal allocation of target ET based on MOGA (Scheme 2)

表 1 鄂尔多斯目标 ET 计算方案设定(目标年为 2015 年)  
Table 1 Ordos target ET computation scheme (The target year is 2015)

方案	降水 $P / \text{mm}$	引黄水量 $W_D / 10^8 \text{m}^3$	引黄水量 $W_D / \text{mm}$	$ET_{ta} / \text{mm}$	方案说明
1	322.8	7	8.07	330.87	现状方案
2	322.8	8	9.22	332.02	扩大引黄水
3	322.8	8	9.22	332.02	压采地下水
4	322.8	6	6.92	329.72	减少引黄水
5	322.8	6	6.92	329.72	节水方案

表2 鄂尔多斯不同方案的目标 ET 的优化配置结果

Table 2 The optimal allocation of the target ET in the different schemes for Ordos

方案	分项目标 $ET_{ia}$ / mm			$ET_{ia}$ / mm	各分项 ET 所占比例/%		
	$ET_{Na}$	$ET_{Ia}$	$ET_{Ja}$		$ET_{Na}$	$ET_{Ia}$	$ET_{Ja}$
1	135.63	119.98	75.24	330.85	40.99	36.26	22.74
2	142.32	119.75	69.59	331.66	42.91	36.11	20.98
3	151.32	119.98	60.68	331.98	45.58	36.14	18.28
4	153.38	115.00	54.94	323.32	47.44	35.57	16.99
5	159.98	110.00	49.97	319.95	50.00	34.38	15.62

表3 鄂尔多斯地区优化配置的目标 ET 与实际 ET 的对比

Table 3 Comparison between the optimal allocation target ET and actual ET for Ordos

方案	分项目标 $ET_{ia}$ / mm			$ET_{ia}$ / mm	$ET$ / mm	目标 ET 差值 / mm	目标 ET 差值 / $10^8\text{m}^3$
	$ET_{Na}$	$ET_{Ia}$	$ET_{Ja}$				
1	135.63	119.98	75.24	330.85	387.2	56.35	48.88
2	142.32	119.75	69.59	331.66	387.2	55.54	48.18
3	151.32	119.98	60.68	331.98	387.2	55.22	47.90
4	153.38	115.00	54.94	323.32	387.2	63.88	55.42
5	159.98	110.00	49.97	319.95	387.2	67.25	58.34

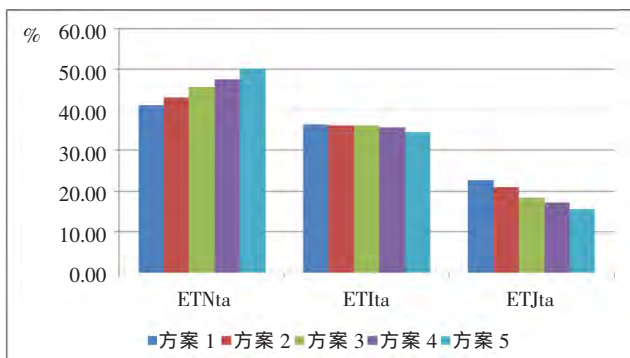


图2 鄂尔多斯各分项目标 ET 优化配置比例

Fig.2 The optimal allocation percentage of the target ET for Ordos

根据对目标  $ET$  的多目标遗传算法的编码,在 MATLAB 中进行运行和计算,得出研究区域的不同方案的优化配置结果见表 2,各分项目标  $ET$  优化配置的比例见图 2。对于研究区域鄂尔多斯,5 个方案的灌溉耕地目标  $ET_{Ia}$  占到总目标  $ET_{ia}$  的 36% 左右;居工地  $ET_{Ja}$  占到 20% 左右,不可控目标  $ET_{Na}$  占到 50% 左右。

## 2.4 目标 ET 优化配置的对比分析

将基于遗传算法的优化配置的目标  $ET$ ,与通过 SWAT 模型计算出的 1999~2010 年研究区域实际  $ET$  进行对比<sup>[1]</sup>,如表 3 所示。

通过对比发现,对于研究区域鄂尔多斯,5 个方案的目标  $ET$  远远小于该区域的实际  $ET$ ,各分项  $ET$  的

分布比例也差别较大,灌溉耕地目标  $ET_{Ia}$  占到总目标  $ET_{ia}$  的 36% 左右;居工地  $ET_{Ja}$  占到 20% 左右,不可控目标  $ET_{Na}$  占到 50% 左右。各分项实际  $ET$  的分布比例为:天然  $ET_N$  为实际  $ET$  总值的 64.4%,灌溉耕地  $ET_I$  为 33.6% 和城乡居工地  $ET_J$  为 2%。2015 年居工地  $ET_{Ja}$  所占比例明显增加,居工地  $ET$  主要包含生活  $ET$ 、工业  $ET$ 、第三产业  $ET$  及城镇生态  $ET$ ,随着研究区域城镇化进度的加快,工业及第三产业的快速发展,以及对生态环境的重视,会导致居工地  $ET_{Ja}$  的比例变大。可以看出,要达到目标  $ET$ ,削减和调控的重点在不可控  $ET$  和耕地  $ET$  这两部分,其中以不可控  $ET$  为主要削减和调控的内容。

## 3 $ET$ 的调控措施

### 3.1 不可控 ET 的调控措施

在研究区域尽管土壤水资源的数量十分可观,但根据土壤水资源的  $ET$  消耗分析,消耗于植被蒸腾的量占土壤水资源总量的 4.14%~17.30%,用于植被裸间和难利用土地的土壤蒸发量占土壤水资源总量的 82.70% 以上,蒸腾量仅为蒸发量的 1/5 左右;无效消耗是土壤水资源消耗的主要形式,超过 60% 以上的土壤水资源都由无效消耗而损失,在这其中的 83% 以上由裸地无效消耗而损失<sup>[5]</sup>。因此,不可控目标  $ET$  的调控重点应放在裸地  $ET$ 、土壤  $ET$  上。对于裸地而言,可以

采用的措施为改变土地的利用类型、增加植被的种类、增加植被的覆盖度、开发利用为有效土地等;对于土壤而言,可以采取的措施为将不可控非灌溉耕地转变为人工灌溉耕地,棵间土壤进行地膜或秸秆覆盖,调整种植结构,减少棵间无效和低效蒸发等。

### 3.2 灌溉耕地 ET 的调控措施

在研究区域内灌溉耕地  $ET_i$  占到了该区域实际 ET 总值的 33.6%。根据土地利用类型判断,灌溉耕地  $ET_i$  一般包括冠层截留蒸发、植被蒸腾、棵间土壤蒸发和棵间地表截流蒸发;而消耗于植被蒸腾的量占土壤水资源总量的 4.14%~17.30%,植被蒸腾量仅为土壤蒸发量的 1/5 左右。因此,灌溉耕地目标 ET 的调控重点应放在棵间土壤蒸发、棵间地表截流蒸发的上面;同时,种植结构调整、灌溉制度、节水措施等都有可操作的空间。从而通过调节农田灌溉耕地目标 ET 的方法,实现在粮食不减产或少减产的前提下,减少水资源的供给量,提高水资源的利用效率。

### 3.3 居工地 ET 的调控措施

在研究区域内居工地  $ET_j$  占实际 ET 总值的 2%。虽然该项目 ET 占的比例较小,但居工地目标 ET 的调控重点应放在居民节水器具的推广和使用、中水雨水资源的有效利用、供水管网的无效损失减少等方面。

## 4 结论

为了探索黄河流域 R-ET 水资源的管理模式的可行性,对于目标 ET 的优化配置和调控措施进行了研究,以鄂尔多斯地区为实例进行了计算分析,得出的主要结论如下:

(1) 基于多目标遗传算法,构建了水资源总量控制、ET 总量控制、粮食用水保障和生态生活用水保障共 4 个目标函数。从区域目标 ET 的各方面协调考虑,设置了不同方案的区域水资源可利用量约束、非负约束共 2 个约束条件,并设计了遗传算法的相关参数,从而对目标 ET 的优化配置进行求解。

(2) 以鄂尔多斯地区为研究实例,对 2015 年 5 个方案的目标 ET 进行优化配置,方案 1 为现状用水方案,方案 2 为扩大引黄水方案,方案 3 为压采地下水方案,方案 4 为减少引黄水方案,方案 5 为节水方案。配置的结果为:灌溉耕地目标  $ET_{ia}$  占到总目标  $ET_{ta}$  的 36% 左右;居工地  $ET_{ja}$  占到 20% 左右,不可控目标  $ET_{Na}$  占到 50% 左右。分项实际 ET 的分布比例为:不可控  $ET_N$  为实际 ET 总值的 64.4%,灌溉耕地  $ET_i$  为 33.6%

和城乡居工地  $ET_j$  为 2%。经过对比认为要达到目标 ET,削减和调控的重点在不可控 ET 和耕地 ET。

(3) 根据研究区的实际情况,提出了各分项 ET 的调控重点和相关措施。不可控 ET 的调控重点应放在裸地 ET、土壤 ET 的调控上。裸地可以采取的措施为:改变土地的利用类型、增加植被的种类、增加植被的覆盖度、开发利用为有效土地等;土壤可以采取的措施为:将不可控非灌溉耕地转变为人工灌溉耕地,棵间土壤进行地膜或秸秆覆盖,减少棵间无效和低效蒸发等。灌溉耕地 ET 的调控重点应放在棵间土壤蒸发、棵间地表截流蒸发上,同时种植结构调整、灌溉制度、节水措施等都有可操作的空间。居工地 ET 的调控重点应放在居民节水器具的推广和使用、中水雨水资源的有效利用、供水管网的无效损失减少等方面。

参考文献:

- [1] 常炳炎,薛松贵,张会言,等.黄河流域水资源合理分配和优化调度[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998:12-15. (CHANG Bingyan, XUE Songgui, ZHANG Huiyan, et al. Water Resources Reasonable Allocation and Optimal Operation for Yellow River Basin [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998:12-15. (in Chinese))
- [2] 何宏谋,丁志宏,张文鹤.融合 ET 管理理念的黄河流域水资源综合管理技术体系研究[J]. 水利水电技术, 2010,41(11):11-13. (HE Hongmou, DING Zhihong, ZHANG Wenge. Study on ET management concept-based integrated technical system of water resources management in Yellow River basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010,41(11):11-13. (in Chinese))
- [3] 王浩,王建华,秦大庸.流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展, 2004, 15 (1):123-127. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayon. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation[J]. Advances in Water Science, 2004,15(1):123-127. (in Chinese))
- [4] 王浩,杨贵羽,贾仰文,等.以黄河流域土壤水资源为例说明以“ET 管理”为核心的现代水资源管理的必要性和可行性 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39 (10): 1691-1701. (WANG Hao, YANG Guiyu, JIA Yangwen, et al. Necessity and feasibility for an ET-based modern water resources management strategy: a case study of soil water resources in the Yellow River basin [J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(10): 3004-3016. (in Chinese))
- [5] 王浩,杨贵羽,贾仰文,等.基于区域 ET 结构的黄河流域土壤水资源消耗效用研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007,37 (12): 1643-1652. (WANG Hao, YANG Guiyu, JIA Yangwen, et al. The Yellow River basin based on regional ET structure of soil water consumption utility research [J]. Sci China Ser D-Earth Sci, 2007,37(12): 1643-1652. (in Chinese))
- [6] 蒋云钟,赵红莉,甘治国,等.基于蒸腾蒸发量指标的水资源合理配置

- 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<sup>1,2</sup>, RONG Xiaoming<sup>3</sup>, ZHANG Wenge<sup>2</sup>, HE Hongmou<sup>2</sup>

(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 21 690×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>(the total output value is about 14.46 billion Yuan), water supply for energy production is 4 329×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> (the total output value is about 3.4632 billion Yuan), and water supply for agriculture, domestic and ecology is 20 840×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 9 452×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, and 811×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> respectively. Comparing the optimal allocation scheme with the expected solutions, the total water supply is increased by 6 710×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 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