

# 干旱缺水型灌区经济用水模式研究

## ——以宝鸡峡灌区为例

王晓峰, 王纪红, 赵璐

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

**摘要:** 以宝鸡峡灌区为研究对象, 在田野调查和总结国内外研究成果基础上, 提出了经济用水模式的概念, 并从水资源总量控制约束、灌溉节水模式、经济配水模式三个方面对其框架体系进行了研究; 在研究过程中, 应用定性与定量相结合的方法, 建立了基于因子权重法的、目标函数为经济、社会、生态综合效益最大化的宝鸡峡灌区经济用水多目标规划数学模型, 并对其进行了计算和分析, 得出了灌区水量经济调配模式。该模式在灌区平水年 ( $P=50\%$ ) 缺水量为  $0.0398 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 可节约用水  $0.3972 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 枯水年 ( $P=75\%$ ) 灌溉缺水量为  $3.2858 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 可节约用水  $3.2035 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与灌区历史灌溉数据比较, 该模式吻合率高, 适用性强。

**关键词:** 宝鸡峡灌区; 经济用水模式; 多目标规划数学模型

**中图分类号:** S274.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)06-0097-05

水资源短缺是当今世界在发展过程中共同面临的严峻问题, 亟需解决。我国是一个农业大国, 解决灌区缺水问题显得尤为重要。灌区经济用水模式的研究和应用是解决以上问题的有效途径之一, 具有重大的理论价值和实践意义<sup>[1~3]</sup>。

宝鸡峡灌区是陕西省最大的灌区, 蓄、引、提等多种灌溉类型并存, 畦灌、喷灌、滴灌等多种灌溉技术并举, 是全国最具代表性和典型性的干旱缺水型灌区之一。在国家引渭用水总量控制的前提下, 非充分灌溉是灌区最主要的灌溉方式。如何实现在非充分灌溉制度条件下合理、科学、经济的使用水资源, 以保证灌区作物稳产、保证灌区的环境生态需水以及提高灌区的社会认知度, 是摆在灌区面前最严峻的问题, 也是目前亟待解决的问题, 而这涉及规划学、运筹学、经济学、数理统计学等多个学科, 是一个复杂的系统工程。本文通过长期深入的理论与田野调查实践, 拟提出一种新的灌区用水模式——经济用水模式, 来解决上述复杂问题。

## 1 宝鸡峡灌区概况

宝鸡峡灌区位于陕西省关中平原西部, 西起宝鸡市以西的渭河峡谷, 东至泾阳, 南临渭水, 北抵渭北高塬腹地。灌区东西长 181 km, 南北平均宽 14 km, 最宽处 40 km, 总控制面积  $2\,355 \text{ km}^2$ 。灌区具有自流灌溉、水库灌溉、抽水灌溉等多种灌溉方式, 是一个综合性的大型灌区。灌区由 1937 年建成的渭

惠渠灌区、1958 年建成的渭高抽灌区和 1971 年建成的宝鸡峡引渭灌区合并而成, 承担着宝鸡、咸阳、西安、杨凌四市(区)及 14 个县、97 个乡镇的农田灌溉任务, 是陕西省目前最大的灌区, 也是全国十大灌区之一。灌区设计引水流量  $95 \text{ m}^3/\text{s}$ , 校核流量  $115 \text{ m}^3/\text{s}$ , 设施灌溉面积  $19.44 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 有效灌溉面积  $18.86 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。灌区现有总干渠和干渠 6 条, 支渠 78 条, 干、支退水渠 24 条, 斗渠 1 956 条; 各类建筑物 48 582 座; 中型水库 6 座, 总库容  $3.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 有效库容  $2.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 抽水站 22 处, 机组 84 台(套), 装机容量 26 921 kW, 总抽水能力  $92.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 水电站 6 座, 机组 15 台, 装机容量 33 900 kW。

宝鸡峡灌区是一个新老结合的大型灌区, 设施门类众多, 地质条件复杂, 加之建设期间受历史背景、技术水平和经济条件等因素所限, 工程设计标准偏低, 设施完好率差, 在一定程度上影响其效益的发挥。目前灌区主要存在以下主要问题: 调蓄能力不足, 水资源严重短缺(见表 1); 险工隐患增多, 险情时有发生; 设施老化失修, 长期带病运行; 渠道淤积严重, 输水能力下降; 泵站设备落后, 机组效率低下; 信息化建设滞后, 管理手段落后等。以上这些, 严重影响着宝鸡峡灌区的发展。

## 2 经济用水模式体系

经济用水模式是在考虑工程节水、田间节水、高效优化调水的基础上, 针对干旱缺水型灌区, 在用水

收稿日期: 2009-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871052); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2006D03)

作者简介: 王晓峰(1972—), 男, 陕西合阳县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为资源开发与 GIS 研究。E-mail: wangxf@snnu.edu.cn。

总量控制、定额管理、充分利用降水和土壤水的前提下,采取非充分灌溉方式,科学、合理地分配灌区水资源,以获得灌区的经济效益、社会效益、生态效益综合最大化或经济效益最大化的一种新型用水管理

模式。经济用水模式的框架体系主要包括 3 个方面:水资源总量控制约束、灌溉节水模式、经济配水模式<sup>[4,5]</sup>。

表 1 宝鸡峡灌区水量平衡计算结果

Table 1 Water quantity balance calculation results of Baojixia Irrigation District

典型年 Typical year	降雨频率 Rain frequency	供水量 Water supply		需水量 Water demand		供需平衡 Supply-demand balance	
		河源来水量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) River inflow	井供水 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) Well water supply	灌溉需水量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) Irrigation water demand	生活及工业需水量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) Domestic and industrial water demand	缺水 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) Water shortage	弃水量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) Abandoned water
丰水年 Wet year	25%	110172.0	20675.5	105206.3	19700.0	0	5941.2
平水年 Normal year	50%	85698.2	35061.1	106268.9	18860.0	4369.5	0
枯水年 Dry year	75%	67250.3	35652.9	148595.8	19200.0	64892.5	0

经济用水模式同时也是一种动态模式,随着生产发展和水资源条件的变化而改变,各种模式都是为了提高用水的有效性,都是为了节水增产、增收、增效。各种模式都应起到在提高用水有效性的前提下,进一步推动经济增长、农业高效和环境保护,促进灌区可持续发展。灌区经济用水模式将对我国 21 世纪初实施现代化农业节水和经济欠发达缺水地区现代化农业节水的发展有重要的指导意义。

## 2.1 水资源总量控制约束

为实施水量分配,促进水资源优化配置,合理开发、利用和节约、保护水资源,2006 年 4 月,国家水利部首次制定了《水量分配暂行办法》。水量分配以水资源综合规划为基础,是对水资源可利用总量或者可分配的水量向行政区域进行逐级分配,确定行政区域生活、生产可消耗的水量份额或者取用水水量份额。水量分配方案包括的主要内容是:流域或者行政区域水资源可利用总量或者可分配的水量;各行政区域的水量份额及其相应的河段、水库、湖泊和地下水开采区域。在水资源短缺的大环境下,统一规范水量分配显得非常重要,如果达不到总量控制要求,政府就要采取一些处罚方式。通过水量分配制度的实施,将使经济社会用水控制在一个合理的范围内,在使流域上下游、左右岸经济社会用水得到平衡的同时,生态与环境用水也得到保障。基于此,灌区经济用水模式应该是在国家规定的灌区水资源总量控制约束的前提下实施的。

## 2.2 灌溉节水模式

由于水资源的日趋短缺,灌溉水利用效率不高,20 世纪 60 年代以来,美国开始进行非充分灌溉(non-full irrigation)研究。它是一种灌溉水源不足时采用的灌溉模式,利用作物本身具有一定的生理节

水与抗旱能力的特点以及作物实际蒸发蒸腾量小于潜在蒸发蒸腾量规律,以获得灌区最大农业生产经济效益为原则而制定的作物灌溉制度。美国相关试验表明,在充分灌溉条件下,高粱与小麦多年平均单方水产量分别为  $0.45 \text{ kg/m}^3$  和  $0.24 \text{ kg/m}^3$ 。采用非充分灌溉后该值分别变为  $1.40 \text{ kg/m}^3$  和  $0.55 \text{ kg/m}^3$ <sup>[6]</sup>。在干旱缺水型灌区,可用水量不能满足整个灌区有效灌溉面积上充分供水的要求时,就不能追求单位面积产量最高,而应根据作物产量与蒸发蒸腾量的关系,达到既节水,又高产高效,以有限水量的投入获得最大效益<sup>[7~11]</sup>。

## 2.3 经济配水模式

灌区水资源分配是在水资源总量控制前提下,应用高效经济的田间节水模式——非充分灌溉制度进行农业灌溉,并建立经济配水模式,进行水量的科学分配。步骤是采用定性分析与定量计算相结合的方法,首先进行灌区灌溉分区,其次建立经济用水多目标规划数学模型,再次应用软件工具编程计算和分析,最后建立一套灌区水量经济分配方案或用水模式。经济配水模式的研究是灌区经济用水模式实施过程中非常重要的内容,决定着灌区综合效益或经济效益的发挥,影响着灌区的长远发展。

# 3 宝鸡峡灌区经济用水模式

## 3.1 灌区水资源总量控制约束

国家从宏观调控的战略方针考虑,分配给各省区或取水点的水量各不等同,分配给宝鸡峡灌区的水量是严格按照相关法律政策实施的。根据《中华人民共和国水法》、《取水许可制度实施办法》等法规,经审查,批准陕西省宝鸡峡引渭灌溉管理局按规定在宝鸡市陈仓区林家村渠首枢纽取渭河水,年取

水量  $8.1955 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 在眉县魏家堡站取渭河水, 年取水量  $6.9544 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。所以, 宝鸡峡灌区可使用的水资源总量为  $15.1499 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

### 3.2 灌区灌溉节水模式

宝鸡峡灌区属于典型的干旱缺水型灌区, 不能

完全按充分供水条件下的灌溉制度实施灌溉, 而应采用非充分灌溉制度。这也是解决宝鸡峡灌区目前缺水现状的最有效的方式之一。宝鸡峡灌区部分农作物非充分灌溉制度见下表 2。

表 2 宝鸡峡灌区非充分灌溉制度

Table 2 Non-full irrigation program of Baojixia Irrigation District

作物类型 Crop type	水文年份(降水频率) Hydrological year (rain frequency)	各生育阶段灌水定额( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) Irrigation quota at reproductive stages				灌水次数 Irrigation times	灌溉定额( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) Irrigation quota
		分蘖 Tillering	返青 Reviving	拔节 Jointing	抽穗 Heading		
小麦 Wheat	丰水年 Wet year(25%)	750				1	750
	平水年 Normal year(50%)	750		600		2	750
	枯水年 Dry year(75%)	750		600		2	1350
夏玉米 Maize	丰水年 Wet year(25%)			600		1	600
	平水年 Normal year(50%)			600		1	600
	枯水年 Dry year(75%)		600	600		2	1200
棉花 Cotton	丰水年 Wet year(25%)	750				1	750
	平水年 Normal year(50%)	750				1	750
	枯水年 Dry year(75%)	750	600			2	1350

### 3.3 灌区经济配水模式

3.3.1 模型建立 为了实现宝鸡峡灌区经济效益、社会效益、生态效益最大化的目标, 本文在总结前人经验和宝鸡峡灌区实际灌溉现状的基础上, 采用了基于因子权重法的多目标规划数学模型进行经济配水的定量分析计算。

宝鸡峡灌区经济配水多目标规划数学模型为求一组目标函数的极大值:

$$\left. \begin{aligned} \max Z_k &= \sum_{j=1}^n c_{kj}x_j, (k = 1, 2, \dots, r) \\ \text{满足} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j &\leq b_i, (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j &\geq 0, (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\}$$

式中:  $m$  为约束方程个数;  $n$  为决策变量个数;  $r$  为目标函数个数。

其中目标函数为:

$$OBJZ = \max(Q_1 \sum_i XOE_i + Q_2 \sum_i XOS_i + Q_3 \sum_i XOB_i)$$

式中:  $Q_1$  为经济效益权重因子;  $Q_2$  为社会效益权重

因子;  $Q_3$  为生态效益权重因子。

计算时还需给经济效益、社会效益和生态效益的权重因子分别赋予不同的值。本文选择了三种不同方案:(1)  $Q_1 : Q_2 : Q_3 = 1 : 1 : 1$ , 灌区经济效益、社会效益、生态效益比重一样, 灌区综合效益最大化;(2)  $Q_1 : Q_2 : Q_3 = 1 : 0 : 0$ , 灌区经济效益最大化, 不考虑社会效益和生态效益;(3)  $Q_1 : Q_2 : Q_3 = 4 : 3 : 3$ , 灌区在综合效益最大化中, 重点考虑经济效益, 社会效益和生态效益同等对待。

模型中还有一些参数取值及约束条件, 在此不再列举。

3.3.2 模型计算及结果分析 解决经济用水模型多目标规划问题的难点在于基本方程的非线性与变量离散性的矛盾问题, 模型计算时采用全新的基于遗传算法的 Matlab 软件工具, 以目标函数值为搜索依据, 通过群体优化搜索和随机执行基本遗传运算实现遗传群体的不断优化, 解决离散组合优化问题。通过计算结果对比分析, 优化效果显著。模型计算结果具体见下表 3 所列。

表 3 经济配水模式计算结果

Table 3 The calculation results of economical water distribution model

典型年(P) Typical year (rain frequency)	灌溉制度 Irrigation program	方案 1 Scenario 1			方案 2 Scenario 2			方案 3 Scenario 3		
		灌溉 需水量 Irrigation water demand ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	供水量 Water supply ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	缺水量 Water shortage ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	灌溉 需水量 Irrigation water demand ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	供水量 Water supply ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	缺水量 Water shortage ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	灌溉 需水量 Irrigation water demand ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	供水量 Water supply ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	缺水量 Water shortage ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )
丰水年(25%) Wet year	充分 Full	10.5206	11.0172	-0.4966	10.5206	10.7974	0.2768	10.5206	10.6316	0.1110
平水年(50%) Normal year	非充分 Non full	8.3158	8.5699	0.2541	8.3158	8.4413	0.1255	8.3158	8.3556	0.0398
枯水年(75%) Dry year	非充分 Non full	10.0109	6.7251	3.2858	10.0109	6.4225	3.5885	10.0109	6.1137	3.8972

通过对以上的结果进行分析可知:(1)灌区经济用水模式与灌区平衡计算、优化调配模型相比,有着极大的优越性。它在水资源总量控制约束下,根据不同典型年采用不同的灌溉制度,选取不同的目标函数,合理进行渠道配水,科学利用水资源,以达到灌区经济效益或综合效益的最大化;(2)灌区丰水年( $P=25\%$ )供水量大于需水量,水量有盈余。灌区经济用水推荐采用充分灌溉制度,目标函数以经济效益最大化为目标。虽然余水量最小,但可保证灌区获得最大经济效益,促进灌区经济发展,同时可应用盈余水量进行社会效益和生态效益的补偿;(3)灌区平水年( $P=50\%$ )供水量小于需水量,灌区缺水。灌区经济用水推荐采用非充分灌溉制度,目标函数为灌区综合效益最大化,经济效益、社会效益、生态效益比重一样,灌区不再缺水,略有盈余,同时保证渭河下游河道的生态基流量,保护河道生态安全;(4)灌区枯水年( $P=75\%$ )供水量小于需水量,灌区严重缺水。灌区经济用水推荐采用非充分灌溉制度,目标函数为灌区综合效益最大化,经济效益、社会效益、生态效益比重一样,灌区缺水量最小,灌区供需矛盾有所缓解。

## 4 结 论

宝鸡峡灌区采用目前传统的灌溉用水模式,平水年( $P=50\%$ )灌溉缺水量为  $0.4370 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,采用经济用水模式方案 1 后,缺水量为  $0.2541 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可节约用水  $0.1829 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,采用方案 2 后,缺水量为  $0.1255 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可节约用水  $0.2541 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,采用方案 3 后,缺水量为  $0.0398 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可节约用水  $0.3972 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。枯水年( $P=75\%$ )灌溉缺水量为  $6.4893 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,采用经济用水模式方案 1 后,缺水

量为  $3.2858 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可节约用水  $3.2035 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;采用方案 2 后,缺水量为  $3.5885 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可节约用水  $2.9008 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;采用方案 3 后,缺水量为  $3.8972 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可节约用水  $2.5921 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该计算结果与宝鸡峡灌区历史灌溉数据比较,吻合率较高,适用性较强。由此可见,经济用水模式的研究和应用,必将为宝鸡峡灌区以及其它同类干旱缺水型灌区在枯水期节约大量用水,从而产生巨大经济、社会和生态效益,保证灌区经济社会健康稳定可持续发展。

## 参 考 文 献:

- [1] 方乐润. 水资源工程系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 39-108.
- [2] 冯尚友, 王先甲. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 63-102.
- [3] 李 周, 包晓斌, 尹晓青. 我国水资源的严重性与危险性[OL]. 2004-6-14[2003-4-3]. <http://www.cass.net.cn/chinese/s05-sjj/igteweb-old/hjzx/lt00036.htm>.
- [4] 胡和平, 雷志栋, 杨诗秀. 农业水资源的高效利用与可持续发展[J]. 中国农村水利水电, 1999, (1): 13-17.
- [5] 郭元裕. 农田水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 31-77.
- [6] 上官周平, 邵明安. 21 世纪农业高效用水技术展望[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 17-21.
- [7] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999: 69-99.
- [8] 王家仁, 常 华, 张 里, 等. 农业高效用水模式研究与效益分析[J]. 排灌机械, 1999, (1): 39-44.
- [9] 赵建林. 农业高效用水模式研究[J]. 节水灌溉, 2000, (7): 14.
- [10] 徐振辞. 井灌类型区农业高效用水模式及产业化示范[J]. 中国水利, 2000, (10): 22-23.
- [11] 吴普特, 范兴科. 渠灌类型区农业高效用水模式与产业化研究目标及方案[J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 4-8.

## Study on economical water-use model for dry and water scarcity irrigation district —Taking Baojixia Irrigation District as a Research Object

WANG Xiao-feng, WANG Ji-hong, ZHAO Lu

(College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

**Abstract:** Taking Baojixia Irrigation District as a research object based on on-the-spot investigation and research both home and abroad, the concept of economical water-use model is proposed, and the frame system is conducted from three aspects: total quantity control of water use constraints, water-saving irrigation model and economical water distribution model. In the process of study, combining qualitative and quantitative analysis, a multi-objective programming mathematical model whose object function is to maximize economic and social benefits is set up based on the factor weight method. In this model at normal years ( $P=50\%$ ) water shortage is  $0.0398 \times 10^8 \text{ m}^3$ , water saving  $0.3972 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; at dry years ( $P=75\%$ ) water shortage is  $3.2858 \times 10^8 \text{ m}^3$ , water saving  $3.2035 \times 10^8 \text{ m}^3$ . With the irrigation district history data comparison, the model has high matching rate and applicability.

**Keywords:** Baojixia Irrigation District; economical water-use model; multi-object programming mathematical model

(上接第 92 页)

## Characters of soil moisture niche-fitness of locust forest in the Loess Plateau

MENG Qin-qian<sup>1</sup>, CAI Huan-jie<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, ZHANG Qing-feng<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The soil moisture of locust forest at different period and slope aspect from different geographic locations in the Loess Plateau is analyzed with the help of the model of the moisture niche-fitness. The results show that the value of the soil moisture niche-fitness of locust forest declines gradually from the South (Chunhua County, 97.5%) to the North (Mizhi County, 53.2%) of the Loess Plateau. The growth of the locust forest is affected more by the soil moisture factor. The highest value of the moisture niche-fitness is in the north-slope, while the lowest is in the south-slope. During the growth period in a year, the drought in spring can reduce the soil moisture capacity, and it can even cause the lowest soil moisture niche-fitness at the beginning of July. Along with the increase of the age and thickness of stand, the soil moisture niche-fitness is in a downward trend. So the suitable density of stand can promote the growth of the forest.

**Keywords:** locust forest; soil moisture; niche-fitness; Loess Plateau