

基于大系统递阶理论的区域抗旱应急调水方案

王双银, 曹红霞, 朱晓群

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘 要: 为了解决旱情紧急情况下关中西部各灌区和各用水部门之间的用水矛盾, 该文以大系统递阶理论为基础, 采用动态规划方法建立了以总用水量最大为目标的区域水量优化调配模型, 根据需水与来水的不同频率组合, 拟定了 3 种一级备选配水方案 (第 3 方案有 27 种二级备选配水方案), 通过对各方案调度结果分析, 并考虑实际调度运行的可操作性, 推荐采用第 3 种方案以夏灌调水量作为主要控制因素进行归类合并后形成 4 灌区 11 种调水方案。该调水方案在 2005—2007 年的实际使用中, 取得了很好的效果, 对该区域的抗旱应急调水提供了科学依据。

关键词: 分层系统, 动态规划, 干旱, 灌溉, 大系统递阶理论, 关中西部

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.001

中图分类号: TV697.1⁺2, O221.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0001-05

王双银, 曹红霞, 朱晓群. 基于大系统递阶理论的区域抗旱应急调水方案[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 1—5.

Wang Shuangyin, Cao Hongxia, Zhu Xiaqun. Emergency water transfer scheme on regional combating drought based on hierarchical theory of large system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 1—5. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在中国, 特别是在西北地区, 干旱是影响农业生产最主要的因素。在水资源短缺的条件下, 灌溉农业能否实现高效率用水, 直接影响到农业的持续发展。为了提高灌区水资源的利用效率, 国内外学者进行了大量理论研究和实践, 先后将线性规划、动态规划、二次规划等系统分析方法应用于灌区水资源配置中^[1-5], 并在系统分析方法与大系统理论结合方面做了大量的研究^[6-10]。这些研究大多是针对常规农业用水调度进行的, 而对于旱情情况下 (特别是旱情紧急情况下) 的水源工程 (特别是多目标综合利用水库) 联合调度研究较少。

关中西部 4 灌区是陕西省主要粮食和经济作物的基地之一, 又是其主要的水源地。随着国民经济的发展和人民生活水平的不断提高, 特别是 20 世纪 90 年代以来, 由于气候反常, 降水量偏少, 河川径流量锐减, 使得该区的可利用水资源量越来越少, 农业干旱问题越来越突出。为了解决在旱情紧急情况下关中西部各行政区和各用水部门之间的用水矛盾, 本文拟基于大系统递阶理论为基础建立本区域抗旱应急调水方案, 为解决旱情紧急情况下关中西部各灌区和各用水部门之间的用水矛盾提供依据。

1 研究区概况

关中西部是指陕西境内秦岭以北, 泾河和灞河以西的范围, 该区是陕西省主要的粮食、油料、果林、蔬菜

产地和工业生产基地, 区内有 4 个大型灌区: 宝鸡峡灌区、冯家山水库灌区、羊毛湾水库灌区和石头河水库灌区, 总灌溉面积 328 016 hm², 占全省总灌溉面积 (1 311 012 hm², 2000 年底) 的 24.6%, 占关中地区灌溉面积 (961 381 hm²) 的 34%。各灌区的位置如图 1^[11-12]。

宝鸡峡灌区以渭河为水源分为塬下灌区和塬上灌区, 分别从魏家堡和林家村引水, 控制流域面积分别为 37 006 和 30 661 km², 现状最大引水能力分别为 50 和 60 m³/s, 总灌溉面积 198 677 hm², 其中塬上灌区 120 006 hm², 塬下灌区 78 671 hm²。塬下灌区渠首无调节水库, 塬上灌区渠首水库总库容 0.5×10⁸ m³, 兴利库容 0.38×10⁸ m³, 灌区还有王家崖、信义沟、大北沟、泔河等渠库结合水库, 总兴利库容 1.6930×10⁸ m³, 形成长藤结瓜式引水。

冯家山水库控制流域面积为 3 232 km², 总库容 3.89×10⁸ m³, 有效库容 2.86×10⁸ m³。灌区灌溉面积 90 671 hm², 水库向宝鸡市年供水 0.3×10⁸ m³, 向宝鸡二电厂年供水 0.4×10⁸ m³, 同时向羊毛湾水库年调水 0.3×10⁸ m³。

羊毛湾水库控制流域面积 1 100 km², 总库容 1.2×10⁸ m³, 兴利库容 0.522×10⁸ m³, 灌区有效灌溉面积 16 000 hm²。

石头河水库控制流域面积 673 km², 总库容 1.47×10⁸ m³, 有效库容 1.2×10⁸ m³, 灌区有效灌溉面积 22 678 hm², 向西安市年供水量 1.0×10⁸ m³。

2 调度模型的建立

抗旱是对水资源管理方式的最严峻考验, 此时供水管理者宁愿出现连续的较小缺水, 而不愿出现一次灾难性缺水。因而为了减轻潜在缺水而引起的严重后果, 进行限制供水和配给供水, 这就要求供水系统进行节水以满足基本需水要求。在干旱期, 大多数供水系统都是基于把缺水造成的经济损失或干旱风险降到最低, 为了遵

收稿日期: 2009-03-03 修订日期: 2009-11-13

基金项目: 陕西省水利厅课题“关中西部四灌区抗旱应急水量调度预案”

作者简介: 王双银 (1969—), 男, 甘肃镇原人, 副教授, 博士生, 主要从事水文分析和水库调度方面研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: wshy6986@yahoo.com.cn

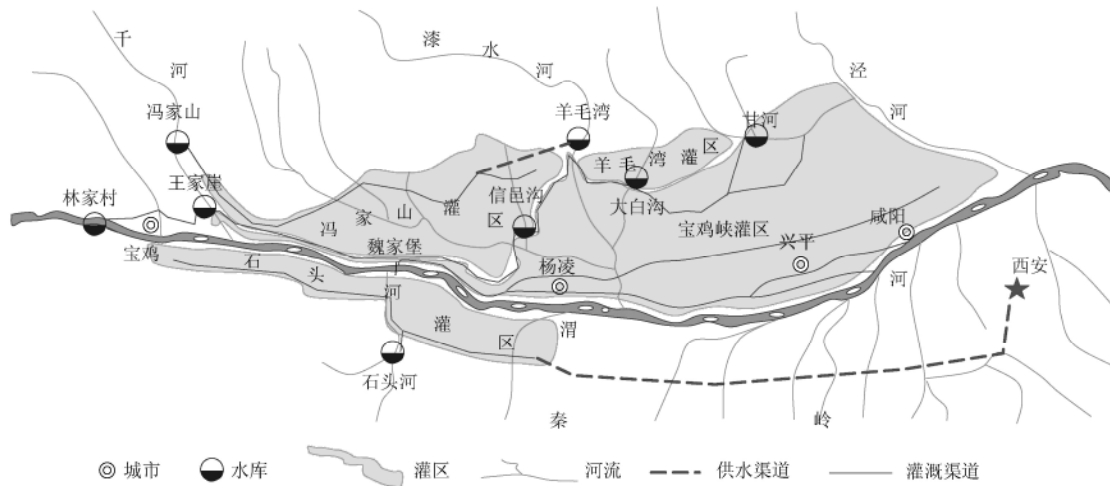


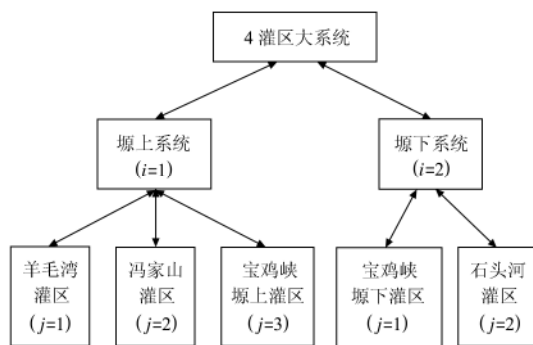
图 1 关中西部 4 灌区位置示意图

Fig.1 Location of four irrigation districts in the west of Guanzhong Region

循这个基本原则, 可以通过系统优化或风险分析 2 种途径来建立供水系统的干旱管理模型。本文以大系统递阶理论^[6-8]为基础, 应用系统优化方法建立关中西部 4 灌区的抗旱应急调水方案。

2.1 系统划分

本次将关中西部 4 灌区作为 1 个大系统, 按照现有水源工程位置和相互之间的水力联系, 共划分了 2 个二级子系统, 各单个水源工程形成二级子系统, 具体划分如图 2。



注: i —二级系统数; j —灌区数

图 2 大系统递阶结构图

Fig.2 Hierarchical structure of large system

2.2 数学模型

把供水水源 (水库) 的整个调度期, 按旬划分为 n 个时段, 作为时段变量, 以水库的蓄水量 V 或蓄水位 Z 作为状态变量, 以水库放水量 W 作为决策变量, 以水库水量平衡条件作为状态转移方程, 再考虑必要的约束条件, 按用水量最大 (或缺水量最小) 作为目标函数建立多阶段确定性动态规划数学模型^[13-16]。

2.2.1 目标函数

考虑到系统的主要功能是灌溉, 因此用水量最大 (或缺水量最小) 便成为系统优化调度的目标, 目标函数可表示如下

$$W = \max \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^l W(i, j, t) \quad (1)$$

式中: $W(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区第 t 时段的用水量; n 、 p 、 l ——调节时段总数、二级子系统总数、三级子系统总数。

2.2.2 约束条件

1) 水量平衡约束

(1) 供需水平衡条件

$$W(i, j, t) - \sum_{k=1}^m WX(i, j, k, t) = WU(i, j, t) \quad (2)$$

式中: $WX(i, j, k, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段第 k 项需水量; $WU(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段的缺水量; m ——用水项总数。

(2) 水库水量平衡条件

$$V(i, j, t+1) = V(i, j, t) + WL(i, j, t) - W(i, j, t) - WQ(i, j, t) - WSH(i, j, t) \quad (3)$$

式中: $V(i, j, t+1)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段末水库蓄水量; $V(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段初水库蓄水量; $WL(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段内的水库来水量; $WQ(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段内水库弃水量; $WSH(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段内水库蒸发渗漏量。

2) 渠首引水流量约束

$$W(i, j, t) \leq WS(i, j) \quad (4)$$

式中 $WS(i, j)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区的渠首引水设计流量。

3) 水库蓄水约束

$$\text{汛期: } VSQ(i, j) \leq V(i, j, t) \leq VSN(i, j) \quad (5)$$

$$\text{非汛期: } VSQ(i, j) \leq V(i, j, t) \leq VS(i, j) \quad (6)$$

式中: $VSQ(i, j)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区水库的

死库容； $VSN(i, j)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区水库汛限水位以下的库容； $VS(i, j)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区水库正常蓄水位以下的库容。

4) 渠首引水及水库充库含沙量约束

如 $QR(i, j, t) < QRO(i, j, t)$ ，则可从河道或水库引水；如 $QR(i, j, t) \geq QRO(i, j, t)$ ，则 $W(i, j, t) = 0$ （超沙限时供水为 0）。

式中： $QR(i, j, t)$ ——第 i 个二级子系统第 j 个灌区 t 时段河源来水的含沙量； $QRO(i, j, t)$ ——表示引水、充库的允许含沙量。

5) 非负约束

所有变量均大于等于零。

2.3 供水原则和次序

2.3.1 供水原则

1) 用水和需水原则：灌溉季节，先满足灌溉用水，再向水库充水；

2) 林家村渠首与其灌区库运行原则，先蓄灌区库，再蓄渠首库，以确保蓄水的安全性和有效性。

3) 先引河道天然来水，后取水库蓄水。

2.3.2 供水次序

依据“中华人民共和国新水法”和国务院提出的“先生活后生产，先节水后调水，先地表后地下”的原则，综合考虑研究区的实际情况，本次确定的供水顺序为：城市供水→工业用水→灌溉用水，生态用水依靠渠库弃水补充。

2.4 调度框架

在系统优化时，各子系统在优先满足本系统用水的基础上，再考虑其他系统的缺水。同时依据各工程间的水力联系，石头河水库只有可能向魏家堡系统补水，冯家山水库若有余水既可以给羊毛湾水库补水也可直接向宝鸡峡塬上灌区补水，由于无法确定其优先次序，只能将二者统一考虑，系统的优化调度是在这一条件下进行。

对于单库子系统，可在满足用水的前提下，通过控制用水量 $W(i, j, t)$ 和水库蓄水，达到弃水 $WQ(i, j, t)$ 最小的目的。

通过单库优化调度运行，向其上级系统即二级子系统反馈余缺水量信息。根据余缺情况，由二级子系统进行协调。若灌区有余水时则向缺水灌区调水。若灌区都余水（缺水），则二级子系统余水（缺水）。

3 备选方案拟定

从遭遇多年连续枯水、需水与来水的不同频率组合两个角度考虑，拟定出以下 3 种一级备选配水方案：

方案 1：采用代表枯水段（1990-10—2000-09）的来水与非充分灌溉情况下的需水组合；

方案 2：采用代表枯水段（1990-10—2000-09）的来水与充分灌溉情况下的需水组合；

方案 3：采用需水与来水的不同频率组合编制。由于组合的情况比较多，相应的子方案也较多。我们仅考虑比较不利的频率组合，考虑到灌溉制度的采用，共形成

27 种备选方案（图 3）。

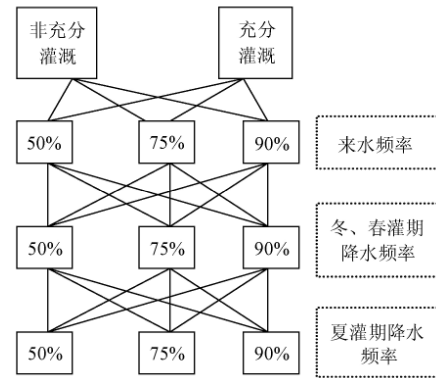


图 3 备选方案组成

Fig.3 Composition of proposed schemes

4 模型求解

4.1 模型参数确定

1) 按旬划分阶段，对方案 1、方案 2 分别划分为 360 个阶段，对方案 3 划分为 36 个阶段。

2) 对水库工程，备选方案中的初始库容为

$$V(i, j, 1) = VSQ(i, j) + \frac{2[VS(i, j) - VSQ(i, j)]}{3} \quad (7)$$

3) 对水库工程，其时段蒸发渗漏损失为

$$WSH(i, j, t) = \frac{V(i, j, t+1) + V(i, j, t)}{2} \times 3\% \quad (8)$$

4) 沙限

从河道引入水库时 $QRO(i, j, t) = 30 \text{ kg/m}^3$ （3%沙限），从河道或水库引水时 $QRO(i, j, t) = 170 \text{ kg/m}^3$ （15%沙限）。

4.2 求解方法

关中西部灌区各子系统按地理位置和水力联系方式可分为有水库调节的工程和无调节的引水工程 2 种类型。由于不同类型工程的运行机制不同，因此水资源优化也应分为水库优化和引水工程优化 2 种形式。

水库水量优化调度选用确定性动态多目标非线性数学模型，依据水量平衡原理确定状态转移方程，根据供水原则和次序，分步满足模型中的约束条件；依据目标函数的具体要求，确定用水量最大的递推方程，及时记忆所经历的路线。

本文采用局部加密法以逆序递推的方法寻找系统全过程的最优解^[17]。局部加密法，亦称增量动态规划法，其基本方法是对状态先取较大的格点间隔（疏网格），求出较粗略的最优解，再在最优解附近缩小格点间隔（密网格），再求最优解，以此继续下去直到求得满意的最优解为止。本次以水库蓄水量作为网格划分的状态，具体做法是：在一次优化中，首先以可利用库容的 1/10 为初始蓄水网格，经过求解获得较粗略的最优解后，再在最优解的上下按可利用库容的 1/100 为初始蓄水各取一些网格进行求解，得到新的最优解，以此继续，直到蓄水网格小于最小库容网格为止。

当求得最优解后依据所记忆的路线、正向推算各阶段的决策,包括专项用水、生活用水、灌溉用水和弃水。

自流引水工程优化调度原理和水库优化基本相似,也将全过程离散化 n 个阶段,按照时段进行供水水平衡分析计算,并考虑输水能力和含沙量的限制,将时段来水按照供水原则和次序合理分配到各用水部门。

4.3 方案筛选

通过各灌区历年的实际运行情况发现,缺水季节主要在夏灌,所以对结果分析筛选时,在考虑系统调水量大、缺水量小的原则下,以夏灌调水量作为其主要因素。同时,为了在实际抗早期进行水量调配,选取研究区内的林家村水文站和兴平气象站作为方案启动的判别条件。

经过对备选方案调度结果进行分析发现,方案 1 和

方案 2 的各部门用水、缺水和调水之间的差别比较大,而且同一方案之间不同年型之间也存在着不协调性,这主要是因为用水是由需水和来水 2 个方面决定,本文研究是以各作物生育期的降水量匹配灌溉制度计算的需水量,全年降水量的频率与各作物生育期降水量的频率有差别;同时各水源工程的来水与研究区降水在大部分年份是不同步的,特别是宝鸡峡渠首和冯家山水库,它们的集水区域绝大部分位于省外,与研究区的气象条件差别较大。因此方案 1 和方案 2 不能为实际调水服务。

通过对各灌区历年的实际运行情况发现,缺水季节主要在夏灌,所以在对结果分析筛选时,在考虑系统调水量大、缺水量小的原则下,以夏灌调水量作为其主要因素,对方案 3 进行归类合并,最终在整个关中西部 4 灌区形成了 11 种调水方案(表 1)。

表 1 关中西部 4 灌区抗旱应急水量调配方案表

Table 1 Emergency water transfer schemes for four irrigation districts in the west of Guanzhong Region on regional combating drought

序号	林家村 年来水量/ 10^8 m^3	兴平降水量/mm		石头河水库调入宝鸡峡下灌区 的水量/ 10^8 m^3			冯家山水库调入宝鸡峡上灌区和 羊毛湾水库的水量/ 10^8 m^3		
		冬春灌期	夏灌期	冬灌	春灌	夏灌	冬灌	春灌	夏灌
1	16~22	200~250	<250	2 399	988	6 581	628	39	0
2		<200	250~220, <190	2 603	3 372	3 974	15	28	62
3		<200	220~190	2 603	3 372	3 974	15	32	0
4	11~16	150~250	250~220, <190	1 914	1 079	1 090	0	0	1 130
5		150~250	220~190	1 914	1 079	2 180	0	0	1 190
6		<150	250~220, <190	1 914	1 079	1 090	0	0	57
7		<150	220~190	1 914	1 079	2 180	0	0	881
8	<11	150~250	250~220, <190	2 468	1 301	1 929	0	503	1 080
9		150~250	220~190	2 468	1 301	3 034	0	503	1 324
10		<150	250~220, <190	2 468	1 301	1 929	32	0	985
11		<150	220~190	2 468	1 301	3 034	32	0	1 687

5 结 论

本文在充分考虑关中西部 4 灌区水源工程和灌区之间的水力联系,各用水部门的需水特点和旱情特征后,本文以大系统递阶理论为基础,应用系统优化方法建立了关中西部 4 灌区的抗旱应急调水系统,并以全系统用水量最大作为目标函数,以水库的蓄水量作为状态变量,以水库放水量作为决策变量,以水库水量平衡条件作为状态转移方程建立了多阶段确定性动态规划数学模型。通过对模型求解、归类合并,最终形成了整个系统在发生旱情时的 11 种调水方案。

整合后的调水方案在 2005—2007 年的实际使用中后,取得了很好的效果。据陕西省防汛抗旱指挥部统计,宝鸡峡灌区每年夏灌从石头河、冯家山水库外购水源 $4\,000\sim6\,000\times10^4\text{ m}^3$,为夏粮浇上了“保命水”,羊毛湾灌区每年从冯家山水库调水约 $1\,000\times10^4\text{ m}^3$ 。该方案最大限度地利用了现有灌区的水利设施和水资源条件,解决了各行政区和各用水部门之间的矛盾,全面提高了灌区抗旱能力。

[参 考 文 献]

[1] Takeuchi K, Moreau D H. Optimal control of muti-uniy interbasin water resource system[J]. Water Resources Research, 1974, 10(3): 407—414.

[2] Lee Soontak, Sung-sup Ahn. A system model for optimal water allocation through inter-basin water transfer[C]// Proceedings Vol 1 of APD 5th Congrress of IAHR,Scoul. Korea, 1986.

[3] Wardlaw R, Barnes J. Optimal allocation of irrigation water in real time[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1999, 125(6): 345—354.

[4] 吴浩东, 胡建平, 莫莉萍. 运用动态规划方法来解决水资源的最优分配[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(6): 781—783.

Wu Haodong, Hu Jianping, Mo Liping. Application of dynamic programming method to the potimum allocation of water resources[J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(6): 781—783. (in Chinese with English abstract)

[5] 柴福鑫, 邱林, 谢新民. 灌区水资源实时优化调度[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 710—716.

Cai Fuxin, Qiu Lin, Xie Xinmin. Real time optimal dispatch of water resources for irrigation area[J]. Journal of Hydraulic

- Engineering, 2007, 38(6): 710—716. (in Chinese with English abstract)
- [6] Haimes Y Y. Large-Scale Systems[M]. New York: North Holland, 1982.
- [7] Zhu Wenbin, Chen Shouyu, Wang Bende. Study of multilevel hierarchical model and its application to Dalian city[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(3): 362—366.
- [8] Pierre Carpentier, Guy Cohen. Applied mathematics in water supply network management[J]. Automatica, 1993, 29(5): 1215—1250.
- [9] 余美, 芮孝芳. 宁夏银北灌区水资源优化配置模型及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7): 181—192.
Yu Mei, Rui Xiaofang. Model of water resources optimal allocation and application in the Yinbei irrigation district of Ningxia[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(7): 181—192. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈晓楠, 段春青, 邱林, 等. 基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 103—106.
Chen Xiaonan, Duan Chunqing, Qiu Lin, et al. Application of large scale system model based on particle swarm optimization to optimal allocation of water resources in irrigation areas[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 103—106. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志·水利志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1999.
- [12] 任三成. 陕西灌区管理[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [13] Gal S. Optimal management of a multi-reservoir water supply system[J]. Water Resources Research, 1979, 15(4): 737—749.
- [14] Yakowitz S. Dynamic programming applications in water resources[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 673—696.
- [15] 黄强, 沈晋. 水库联合调度的多目标多模型及分解协调算法[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(1): 75—82.
Huang Qiang, Shen Jin. Multi purpose and muliti model of joint reservoir operation as well as decomposition and coordination algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(7): 75—82. (in Chinese with English abstract)
- [16] 梅亚东, 熊莹, 陈立华. 梯级水库综合利用调度的动态规划方法研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(2): 1—4.
Mei Yadong, Xiong Ying, Chen Lihua. A dynamic programming method for the multi-purpose operation of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(2): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王双银, 刘俊民. 综合利用水库兴利调度的二次优化法[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 11—16.
Wang Shuangyin, Liu Junmin. Method of second optimization of scheduling beneficial use of the multi-purpose reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 11—16. (in Chinese with English abstract)

Emergency water transfer scheme on regional combating drought based on hierarchical theory of large system

Wang Shuangyin, Cao Hongxia, Zhu Xiaoqun

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to solve water use conflict occurred in different water requirement departments at the irrigation districts in the west of Guanzhong Region under emergent drought situation, the authors set up a regional optimal water allocation model which aimed at largest total water use quantity at the four irrigation districts by using dynamic programming based on hierarchical theory of large system. Three types of first class choice schemes (the third one is made up of 27 second class choice) for water distribution were made according to different frequencies combination between water needs and inflow. Based on the analysis results of various options scheduling, and considering the actual operation interoperability, water transfer quantity in summer irrigation was taken as main control factor. Through classification and combination, the third scheme was recommended, which includes 11 types of water transfer schemes for four irrigation districts. Satisfied results were obtained by applying the scheme during 2005—2007. This scheme provides scientific basis for emergency water transfer on drought combating.

Key words: hierarchical system, dynamic programming, drought, irrigation, hierarchical theory of large system, the west of Guanzhong Region