

基于网络模拟模型的石羊河流域武威属区 水资源合理配置研究

张廉祥¹, 蔡焕杰^{1*}, 张同泽², 褚建华²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 甘肃省武威市水利水电勘测设计院, 甘肃 武威 733000)

摘 要: 针对石羊河流域武威属区的水资源状况, 对石羊河流域水资源系统进行合理的概化, 并提出基于目标、约束条件及边界函数的网络模拟计算流程, 建立该流域生态与正常用水相结合的石羊河流域武威属区水资源合理配置网络模拟模型。在模型中, 采用典型年法以季度为计算时段进行了不同保证率不同水平年的水资源配置模拟计算, 提出了多年平均的不同水平年的推荐方案, 为缓解石羊河流域武威属区供需水矛盾、经济发展及环境规划提供依据。

关键词: 水资源合理配置; 网络模拟; 石羊河流域

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0037-06

经研究表明石羊河流域水资源呈现出趋势水资源短缺、供需水矛盾突出、地下水超采、生态环境恶化、水污染严重、水资源涵养衰减、沙漠化趋势明显、用水结构不合理、水资源管理落后、水权分配不完善, 为解决此类问题, 本文提出了用网络模拟模型配置该区水资源。网络模拟模型是对拟定的一些比较方案进行模拟计算, 得到多方案的各种评价指标值, 然后进行评价择优^[1]。其优点在于不管系统多么错综复杂, 只要事先确定调度原则和选择好有较好代表性的输入信息就能得出分析结果。它可以通过一系列的模拟计算来回答决策者关心的各种问题, 发挥决策支持作用。通过不同运行规则模拟的结果来改善系统运行规则, 也可以用来评价不同的规划方案。这种模型计算简单、不存在维数灾, 适用于求解复杂条件下的水资源配置问题。本文综合考虑石羊河流域系统的复杂性, 分析水资源系统供、需、耗、排过程中所涉及的各种要素与要素的内在关系及相互作用, 采用抽象、概化、专家商讨的手段对石羊河流域水资源系统进行准确、合理的概化, 并提出基于目标、约束条件及边界函数的网络模拟计算流程, 建立该流域生态与正常用水相结合的石羊河流域武威属区水资源合理配置网络模拟模型。

1 研究区概况

石羊河流域位于河西走廊东端, 是甘肃省的三

大内陆河流之一, 流域水系发源于祁连山, 自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河 8 条河流组成。流域贯穿武威市辖区的三县一区, 即凉州区、民勤县、古浪县、天祝县。截止 2006 年, 属区总人口达 183.05 万人, 其中城镇人口 56.55 万人, 农村人口 126.50 万人, 城镇化率 30.91%。石羊河流域武威属区多年平均水资源总量 11.17 亿 m³, 人均占有水资源量不足 700 m³, 约为全省的 1/2、全国的 1/3。耕地水资源量 220 m³/667m², 约为全省的 1/3, 全国的 1/9。近 20 a 来, 全流域人口增加了 33%, 农田灌溉面积增加了 30%, 粮食产量增加了 45%, 国内生产总值(GDP)增加了约 6 倍, 而水资源量不但没有增加反而减少了约 1%, 年超采地下水量达 3.37 亿 m³, 现状工业废水排放总量 590.67 万 t, 工业废水排放达标量 404.68 万 t, 工业废水排放达标率 66.3%, 水资源供需矛盾十分尖锐。石羊河流域水资源短缺, 供需水矛盾突出, 已经严重制约了整个流域经济社会的可持续发展。研究石羊河流域武威属区的水资源供需特点及变化趋势, 建立科学、合理、实用、灵活的水资源网络模拟模型, 对属区水资源供需做合理的平衡分析, 结合当地的政治、经济、文化特点, 制定地表水和地下水的联合配置方案, 对武威属区的社会经济可持续发展提供坚实的基础。

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA100202); 甘肃省水利重点科研计划项目

作者简介: 张廉祥(1985—), 男, 甘肃白银人, 在读硕士, 主要从事水资源高效利用研究。E-mail: zlxgansu@126.com。

* 通讯作者: 蔡焕杰(1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事节水农业与水资源高效利用研究。E-mail: huanjie@tom.com。

2 水资源调配模型的建立

2.1 模拟规则

本研究的系统水源使用优先序为: 优先满足城乡生活用水; 其次, 保障稳定人工绿洲的基本生态用水; 第三, 基本满足工业用水, 公平保障农业基本用水, 协调分配其他生态用水等。为了合理开发和充分利用灌区水资源, 同时依据中华人民共和国新水法规定, 以“先生活后生产, 先节水后调水, 先地表后地下”为总调水原则。应尽量减少输水损失, 就近调水, 具体为: 先引用外调水, 后分配当地水; 先引河道天然来水, 后取水库蓄水; 先引用地表来水, 地表来

水不能满足时引用地下水。

2.2 模拟流程

该网络模拟模型计算以时段为总体循环, 其内部的各层循环按照对本地水资源利用的优先序逐步计算水源对各类用户的配置。各类水源到用户的分配计算模块再以用水量和基本分配比例等参数进行具体的分配。各模型子系统的计算又以计算单元为顺序逐个依次计算, 外调水和当地地表水供水计算模块则以水源工程顺序, 结合受水单元需水满足状况多次循环分配计算。水资源配置流程如图 1 所示。

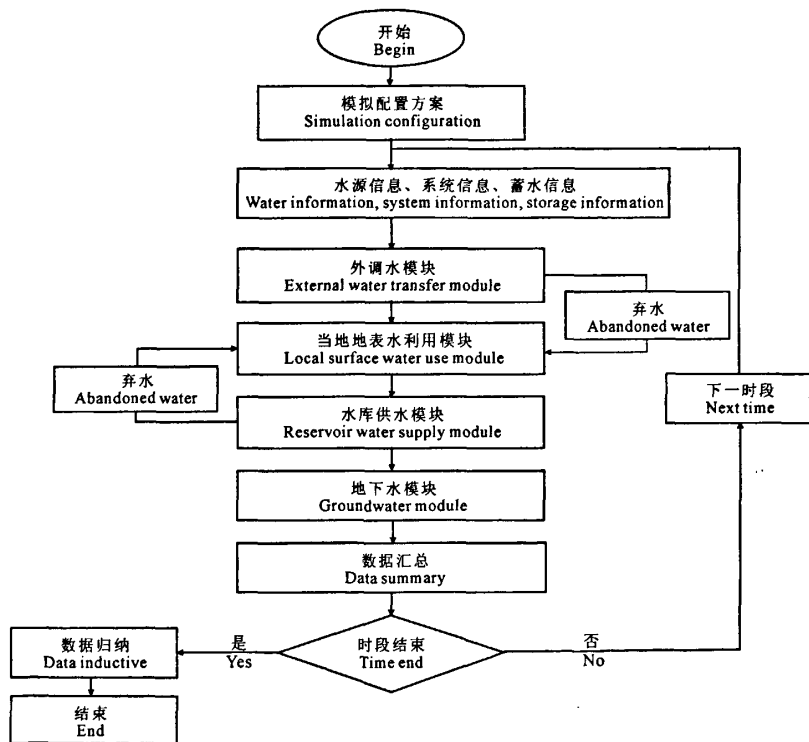


图 1 模拟模型计算流程

Fig.1 Computing flow graph of

2.3 系统概化

水资源系统涉及因素较多, 过程复杂, 为了反映系统的关键环节和主要问题, 将系统所涉及的各类实体可概括为点和线两类基本要素^[2-3]。水资源配置网络模拟模型是将实际水资源系统概化为由节点和有向线段构成的网络, 以重要水库、计算单元和主要河道交汇点为节点, 以各供水水源为计算单元, 以有向线段代表天然河道或人工输水渠, 来传输节点与节点和配置目标间的关系。

根据石羊河流域行政区域、水系、工程布局 and 供水等情况, 将石羊河流域分为 11 个子系统计算单元, 即大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河、武威城镇及井灌区、民勤盆地、昌宁盆地。其中, 武威属区包括古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河和武威城镇及井灌区七个子系统计算单元, 本次主要针对武威属区进行水资源配置网络模拟分析。具体网络模拟模型的系统要素和模型规模见表 1。根据石羊河流域水资源

调配的实际状况,考虑水源、用水户和供给关系等多
方面因素对石羊河流域水资源系统进行网络概化,

概化后的石羊河流域水资源配置模型的网络概化如
图 2 所示。图中各代码代表意义见表 2。

表 1 石羊河流域武威属区网络模拟模型的系统要素和模型规模

Table 1 Model elements and the size of the system for the catchments of The Shiyang River located in Wuwei

要素名称 Element name	单位 Unit	数目 Number	要素名称 Element name	单位 Unit	数目 Number
系统计算单元 System calculation unit	个	7	用水区 Water consumption region	个	14
系统控制节点 System control node	个	52	跨流域调水工程 Inter-basin water transfer project	项	2
行政区 Government division region	个	4	水文系列年 Hydrological series year	年	50
水源个数 Number of water resources	个	15	规划水平年 Planning horizon year	个	5
水库 Reservoir	座	10	涉及流域 Watershed involved	个	1

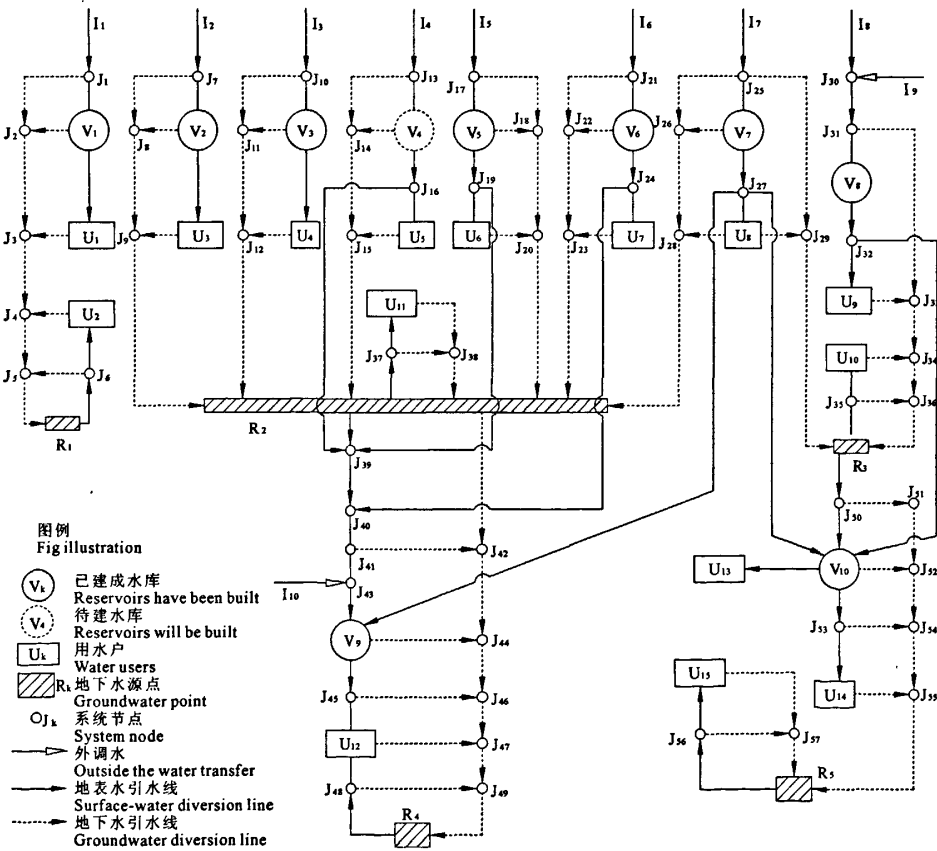


图 2 石羊河流域水资源配置系统网络概化

Fig.2 The generalized sketch of water resources system network for the catchments of the the Shiyang River

2.4 数学模型的建立

本配置模型以水资源供需平衡模拟模型为核心,以预测的各计算单元各行业的需水量和需水过程为需求依据,以水资源系统中的各种水源作为可供水资源,以追求可持续发展为目标,优先保证生活用水和河道生态用水,通过水资源配置方案的优化选择(包括水资源系统供水方案的优化选择和各种

水源的优化调度),得到各水资源配置方案的供需平衡结果。

综合考虑石羊河流域的长期发展规划,确定以生态环境和水资源优化利用为模型目标,以水库水量平衡约束、水库的调蓄能力约束、天然来水使用量约束、引提水量为约束函数,并以起调库容传递条件、节水水量传递条件为边界函数进行不同方案的

水量配置。

表 2 石羊河流域水资源配置系统网络节点代码

Table 2 The node code of water resources system network for the catchments of the Shiyang River

水源代码 Water resources code		用水区代码 Water consumption region code		水库代码 Reservoirs code
大靖河 I ₁ Dajing River I ₁	大靖地下含水层 R ₁ Dajing aquifer R ₁	大靖渠灌区 U ₁ Dajing channel irrigation U ₁	武威城镇及井灌区 U ₁₁ Wuwei city and well irrigation U ₁₁	大靖水库 V ₁ Dajing reservoir V ₁
古浪河 I ₂ Gulang River I ₂	武威地下含水层 R ₂ Wuwei aquifer R ₂	大靖井灌区 U ₂ Dajing well irrigation U ₂	民勤混灌区 U ₁₂ Minqin mixing irrigation U ₁₂	古浪水库 V ₂ Gulang reservoir V ₂
黄羊河 I ₃ Huangyang River I ₃	四坝地下含水层 R ₃ Four dam aquifer R ₃	古浪渠灌区 U ₃ Gulang channel irrigation U ₃	金昌市城镇及工业区 U ₁₃ Jinchang city and production U ₁₃	黄羊水库 V ₃ Huangyang reservoir V ₃
杂木河 I ₄ Zamu River I ₄	民勤地下含水层 R ₄ Mingqin aquifer R ₄	黄羊渠灌区 U ₄ Huangyang channel irrigation U ₄	金川渠灌区 U ₁₄ Jinchuan channel irrigation U ₁₄	杂木水库 V ₄ Zamu reservoir V ₄
金塔河 I ₅ Jinta River I ₅	昌宁地下含水层 R ₅ Changning aquifer R ₅	杂木渠灌区 U ₅ Zamu channel irrigation U ₅	金川井灌区 U ₁₅ Jinchuan well irrigation U ₁₅	南营水库 V ₅ Nanying reservoir V ₅
西营河 I ₆ Xiying River I ₆		金塔渠灌区 U ₆ Jinta channel irrigation U ₆		西营水库 V ₆ Xiying reservoir V ₆
东大河 I ₇ Dongda River I ₇		西营渠灌区 U ₇ Xiying channel irrigation U ₇		皇城水库 V ₇ Huangcheng reservoir V ₇
西大河 I ₈ Xida River I ₈		东河渠灌区 U ₈ Donghe channel irrigation U ₈		西大河水库 V ₈ Xidahe reservoir V ₈
引疏济金调水 I ₉ Yinliujijin water transfer I ₉		西河渠灌区 U ₉ Xihe channel irrigation U ₉		红崖山水库 V ₉ Hongyashan reservoir V ₉
景电二期延长调水 I ₁₀ Jingdian second time water transfer I ₁₀		四坝井灌区 U ₁₀ Four dam channel irrigation U ₁₀		金川峡水库 V ₁₀ Jinchuanxia reservoir V ₁₀

(1) 生态环境目标

为保持河流健康,实现水资源可持续发展,流域内主要控制断面的流量必须要满足河道内生态用水要求,即:

$$Q = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_e(i, t) \quad (1)$$

式中, $W_e(i, t)$ 表示第 i 个二级子系统内第 t 时段的河道内生态用水量; n, m 分别表示控制时段总数、二级子系统总数。

(2) 水资源优化利用目标

考虑不同地区不同部门的需水要求,合理分配水资源,使得流域内缺水量最小,即:

$$Q = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l W_q(i, j, t) \quad (2)$$

式中, $W_q(i, j, t)$ 表示第 i 个二级子系统第 j 个用水区第 t 时段的缺水量; n, m, l 分别表示控制时段总数、二级子系统总数、三级子系统总数。

约束条件包括:

供需水平衡约束:

$$\sum_{k=1}^m W_s(i, j, k, t) = W(i, j, t) - \sum_{k=1}^m W_{use}(i, j, k, t) \quad (3)$$

式中, $W(i, j, t)$ 表示第 i, j 子系统 t 时段内可供水

量; $W_s(i, j, k, t)$ 、 $W_{use}(i, j, k, t)$ 分别表示第 i, j 子系统 t 时段内 k 项用水量 and 余(缺)水量; m 为用水项总数。

水库水量平衡约束:

$$V(i, j, t + 1) = V(i, j, t) + Q_{in}(i, j, t) - Q_{out}(i, j, t) - Q_w(i, j, t) \quad (4)$$

式中, $V(i, j, t + 1)$ 、 $V(i, j, t)$ 分别表示第 i, j 子系统内 t 时段末和 t 时段初水库蓄水量; $Q_{in}(i, j, t)$ 、 $Q_{out}(i, j, t)$ 分别表示第 i, j 子系统在第 t 时段的入库水量和供水量; $Q_w(i, j, t)$ 表示第 i, j 子系统在第 t 时段的弃水量。

水库的调蓄能力约束:

$$V_{\min}(i, j) \leq V(i, j, t) \leq V_{\max}(i, j) \quad (5)$$

式中, $V_{\min}(i, j)$ 、 $V_{\max}(i, j)$ 分别为第 i, j 子系统内水库蓄水的死库容和兴利库容。

天然来水使用量约束:

$$W_{use}(i, j, t) \leq W_{come}(i, j) \quad (6)$$

式中, $W_{use}(i, j, t)$ 、 $W_{come}(i, j)$ 分别表示为第 i, j 子系统内第 t 时段的天然来水使用量和系统内天然来水量。

引提水量约束:

$$W(i, j, t) \leq W_{devise}(i, j) \quad (7)$$

式中, $W_{devise}(i,j)$ 表示为第 i,j 子系统中渠首引水设计流量。

其它非负约束:所有变量均大于等于零。

边界函数包括:

起调库容:

$$V(i,j,1) = V_{\min}(i,j), (i,j = 1,2,\cdots,n) \quad (8)$$

式中, $V(i,j,1)$ 表示第 i,j 系统第 1 时段的库容。

传递条件:

$$V(i,j,t) = V(i,j-1,t+1) \quad (9)$$

式中, $V(i,j-1,t+1)$ 表示第 $i,j-1$ 子系统内 t 时段末水库蓄水量。

节点水量传递条件:

$$W_{in}(i,j,t) = W_{out}(i,j-1,t) + W_{region}[i,j-(j-1),t] \quad (10)$$

式中, $W_{in}(i,j,t)$ 表示第 i,j 子系统在第 t 时段流入节点水量; $W_{out}(i,j-1,t)$ 表示第 $i,j-1$ 子系统在第 t 时段内流出节点水量; $W_{region}[i,j-(j-1),t]$ 表示第 i,j 到 $j-1$ 子系统间第 t 时段内的区间产水量。

3 配置方案及结果分析

本研究中主要考虑生活、农业、工业、生态 4 项目标,分别提出各项目标的三种需水方案,再把各项

目标对应的三种需水方案进行耦合,最后确定出不同水平年的区域需水预测方案。根据不同水平年的需水预测及供水预测的成果,经认真研究提出三种基本的水资源的配置方案:方案一在维持现有农业、生态灌溉规模和用水量的前提下,计入工业和生活的用水增长;方案二在区域范围内大力实施农业节水灌溉;方案三以《石羊河流域重点治理规划》为目标措施,大规模实施农业节水措施和压缩农田灌溉配水面积。

根据以上水资源配置思路和方案比选方法编制石羊河流域武威属区的水资源配置网络模拟模型,利用水资源配置网络模拟模型,采用 1956~2006 年共 50 a 的长系列水文资料对该区多方案、不同保证率、不同水平年的供需平衡状况和区域水资源总体平衡状况进行分析计算,其中配置水平年选定为:2006 年为现状水平年,2007、2008 年为实施水平年,2010、2020 为预测水平年,计算时段为季度。经过一系列供需模拟计算,分析得出方案三可实现民勤县蔡旗断面水量目标,实现了中游地下水的采补平衡,最终实现水资源供需的基本平衡。故把方案三确定为该区域水资源配置的推荐方案,推荐方案的具体模拟计算结果如表 1 所示。

表 3 石羊河流域武威属区水资源多年平均年供需平衡成果(10⁸ m³)

Table 3 Results of mean annual amount of water supply and demand balance for in the water resources of the catchments of the Shiyang River located in Wuwei

区域名称 Region name	项目 Item	水平年 Year				
		2006	2007	2008	2010	2020
武威市 Wuwei	配水量 Amount of water supply	22.548	20.833	19.732	17.497	16.641
	缺水量 Water deficit	-5.994	-4.237	-3.224	-1.270	-0.308
	缺水率 Water deficient ratio	26.58%	20.34%	16.34%	7.26%	1.85%
凉州区 Liangzhou	配水量 Amount of water supply	13.168	12.202	11.757	10.978	10.037
	缺水量 Water deficit	-0.718	0.091	0.101	-0.379	0.360
	缺水率 Water deficient ratio	5.45%	0.75%	0.86%	3.45%	3.59%
民勤县 Minqin	配水量 Amount of water supply	7.262	6.996	6.417	5.117	5.555
	缺水量 Water deficit	-4.442	-3.979	-3.053	-0.769	-0.848
	缺水率 Water deficient ratio	61.17%	56.88%	47.58%	15.03%	15.27%
古浪县 Gulang	配水量 Amount of water supply	1.941	1.555	1.477	1.321	0.968
	缺水量 Water deficit	-0.761	-0.375	-0.297	-0.146	0.158
	缺水率 Water deficient ratio	39.21%	24.12%	20.11%	11.05%	16.32%
天祝县 Tianzhu	配水量 Amount of water supply	0.178	0.081	0.081	0.081	0.081
	缺水量 Water deficit	-0.072	0.025	0.025	0.024	0.022
	缺水率 Water deficient ratio	40.45%	30.86%	30.86%	29.63%	27.16%

依据《石羊河流域综合治理规划》水量目标,2010 年全流域供需水缺口控制在 2.5 亿 m³, 六河

(古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河)中游实现地下水的采补平衡,其中武威南盆地供需

水缺口 0.809 亿 m^3 , 地下水达到正均衡 0.0564 万 m^3 。民勤盆地供需水达到平衡, 地下水达到正均衡 0.0128 万 m^3 。2020 年全流域供需水缺口控制在 0.18 亿 m^3 , 其中武威南盆地供需水缺口 0.053 亿 m^3 , 地下水达到正均衡 0.036 亿 m^3 。民勤盆地供需水达到平衡, 实现民勤盆地地下水正均衡 0.26 万 m^3 , 使地下水浅埋区(埋深小于 3 m)范围逐步扩大。

根据方案三的模拟计算结果分析可知, 通过大规模实施农业节水措施和压缩农田灌溉配水面积, 使石羊河流域武威属区的年需水量、供需水缺口逐年减少, 2010 年需水量为 17.497 亿 m^3 , 在多年平均来水情况下, 供需水缺口达 1.270 亿 m^3 , 地下水超采量达 0.508 亿 m^3 ; 2020 年需水量为 16.641 亿 m^3 , 在多年平均来水情况下, 供需水缺口达 0.308 亿 m^3 , 地下水均衡值达到 0.0706 亿 m^3 , 可实现民勤县蔡旗断面水量目标, 实现中游地下水的采补平衡, 基本上达到了《石羊河流域综合治理规划》的水量控制目标。

4 结 语

通过分析石羊河流域武威属区的水资源分配现

状, 考虑到该水资源配置系统是一个涉及多水源多用户的复杂大系统, 具有半结构化、多层次、多目标、多属性、多阶段及多不确定性因素等系统固有的特征, 建立了基于多目标、多约束的水资源配置网络模拟模型, 对该区水资源进行了模拟配置。其配置结果表明: 在多年平均来水情况下, 石羊河流域武威属区的年供需水缺口呈逐年递减趋势, 到 2020 年就能基本实现《石羊河流域综合治理规划》的水量控制目标。因此, 该网络模拟模型不仅为武威属区提供了宏观的中、长期水资源合理分配结果, 也为其他地区合理配置水资源此类复杂问题提供了可以借鉴的依据。

参 考 文 献:

- [1] 王 浩, 秦大庸, 等. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 游进军, 甘 泓, 王 浩. 基于规则的水资源系统模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1043—1056.
- [3] 李 群, 贾明敏, 陈南祥, 等. 优化与模拟耦合模型在水资源合理配置中的应用[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 142—146.
- [4] 王忠静, 赵建世, 熊雁晖. 现代水资源规划若干问题及其解决途径与技术方法(三)[J]. 海河水利, 2003, (3): 15—19.

Research on the network simulation model of water resources rational allocation in the water resources of the catchments of the Shiyang River located in Wuwei

ZHANG Lian-xiang¹, ZHANG Tong-ze^{1,2}, CAI Huan-jie¹, CHU Jian-hua²

(1. Key Lab for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education,

Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Wuwei Hydraulic Engineering Institute, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: Considering the water resources condition in the catchments of the Shiyang River located in Wuwei, we generalized the system of water resources there, and established a network simulation model for rational allocation of water resources in the catchments, which combined water requirements for ecological environment and normal water consumption. Meanwhile, this model proposed, based on the goal, the constraints and boundary function, a network simulation computation flow. According to the methods of the typical years, the allocation of water resources is simulated in different guaranteed efficiency and different horizontal years, and the scheme is put forward for the mean and different horizontal years, so as to make a foundation for alleviating the contradiction among supply and demand of water in the catchments, developing local economy and planning the environmental protection.

Keywords: rational allocation of water resources; network simulation model; the catchments of the Shiyang River