

基于风险分析的三江平原灌区多水源 联合调度方案优化决策研究

陈红光, 李晨洋, 李晓丹

(东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:针对三江平原水稻灌区因缺水而造成的地下水超采问题,以开采地下水量最小为目标建立多水源联合调度模型,并利用 matlab 工具箱进行求解,确定满足不同约束条件的灌区多水源联合调度方案。同时,对方案运行存在的不确定性因素进行风险考究判别、风险损失估计与计算,以实现风险情况下的方案优选,确定该区多水源联合调度的优化方案,其结果可为决策管理部门提供参考。

关键词:三江平原; 灌区多水源; 调度方案; 风险分析

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0273-04

Study on the Water Joint Operation Scheme Optimization in Sanjiang Plain Irrigation Area Based on Risk Analysis

CHEN Hong-guang, LI Chen-yang, LI Xiao-dan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to mitigate lack of water caused by excessive exploitation of groundwater in Rice irrigation area of Sanjiang Plain, multi-resources scheduling model was developed with regard to a goal of minimizing exploitation of underground water, and the matlab toolbox was used to solve, satisfy different constraints of multi-resources scheduling scheme in irrigation district. At the same time, the risk identification, risk estimate and sophisticated calculation for uncertainty factors in the presence of program running were carried out in order to realize the risk case selection, and the combined water scheduling optimization scheme of the zone was determined. The results can be used as a reference for decision making management.

Key words: Sanjiang Plain; irrigation water; scheduling scheme; risk analysis

三江平原地处东北部边境,纬度较高,气候寒冷,冬季封冻期长达 4~6 个月,受该种气候的影响,降雨量年内、年际分配差异较大,所以常出现春旱秋涝的现象。三江平原地区不仅年内降雨量分布不均匀,而且在年际间丰枯水变幅也较大,并具有连丰连枯、丰枯交替出现的特点,通常情况下连续枯水年达 4~5 a。但据统计流经三江平原的省际河流、国际河流的水量就超过 3 000 亿 m^3 ,而这部分水资源很少被开发利用,尤其是国境界河水资源几乎完全没有得到开发利用。地下水总开采量达 47 亿 m^3 ,占可开采量的 85%,由于不合理的开井导致地下水水面下降,不少

地方出现了地下水漏斗现象,究其原因是因为地下水开采缺乏有效的控制和管理措施。灌区水源大部分取自松花江,但有些灌区由于地理位置的限制很难满足需水要求,松花江流域近年来受全球环境变化的影响,在 5 月、6 月降雨明显偏少,江水水位下降,难以满足提水要求^[1-2]。

故而,将各种地表水源、地下水、天然降雨等多水源进行联合运用,在保证作物有足够的农业用水量的前提下,以地下水开采最小为目标,同时考虑社会效益,确定多水源联合调度方案,达到水资源的高效可持续利用具有重要的现实意义。

收稿日期:2011-05-22

修回日期:2011-07-21

资助项目:哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2010RFQXN102);中国博士后基金(2013M531012);黑龙江省社会科学研究规划项目(12C032)

作者简介:陈红光(1976—),女,内蒙古根河人,副教授,工学博士,在站博士后,教师。主要研究方向:水资源优化利用与系统分析。
E-mail:chg218@126.com

通信作者:李晨洋(1978—),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要研究方向为管理科学与工程、环境工程。E-mail:cli703@aliyun.com

1 灌区多水源联合调度方案

利用地表水、地下水对作物进行充分灌溉时,由于在多年平均情况下地下水位在不断下降,因此需要将地表水、地下水、天然降雨等多水源进行优化调度,以期改善目前地下水超采的现状。本文设定在灌区水田总面积一定时,通过建立灌区多水源联合调度模型,把有限的水资源量分配给灌区内作物,拟定灌区地下水位在长期保持不变的情况下的多水源联合调度方案。

1.1 多水源联合调度模型建立

1.1.1 目标函数 本次优化以开采地下水量最小为优化调度准则,同时在满足以上约束条件下考虑社会、经济效益,以实现水资源的可持续利用。

(1) 地下开采量最小。

$$Z=\min(\sum_{i=1}^n Z_i) \tag{1}$$
$$Z_i=0.007P_iF+0.173025T_i-2919.4+0.95W_i(q) \tag{2}$$

式中: Z_i ——地下水蓄变量(10^4 m^3); P_i ——预测降雨量(mm),采用灰色 Gm(1,1)预测; F ——灌区总面积,取 10^2 hm^2 ; T_i ——渠道来水量(10^4 m^3); $W_i(q)$ ——灌溉期缺水水量(10^4 m^3); q ——灌溉定额(m^3/hm^2)。

(2) 社会效益,缺水损失或者生产浪费损失最小目标。

$$f_1(x)=\min\sum\text{GDP} \mid W_i(q)-\sum_{i=1}^m x_i \mid \tag{3}$$

式中:GDP——用户因缺水而导致的经济损失(元/ m^3); x_i ——调度周期内用户从第 i 水源调用的水量(10^4 m^3)。

(3) 经济效益,区域供水净效益最大。

$$\max f_2(x)=\sum_{i=1}^i (b_i-c_i)x_i \tag{4}$$

式中: b_i ——水源向用户的单位供水量效益系数(元/ m^3); c_i ——水源向用户的单位供水量费用系数(元/ m^3)。

1.1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。为了便于模拟分析,将灌区概化为一个系统,系统包括两大部分:水资源供给系统和水资源消耗系统。水资源供给系统包括降雨,地表灌溉水量等;水资源消耗系统包括腾发量,地下水开采量,径流量等,具体的水量平衡方程如式(5)所示。此处各变量的单位均化为 10^4 m^3 。

$$Q+P+E-S_i=Q_i-Q_i+\Delta S_w \tag{5}$$

式中: Q ——地表水灌溉量,其中包括渠道来水量、拦

蓄地表径流量等灌溉水量; P ——预测降雨量; E ——总腾发量; S_i ——径流量; Q_i ——入渗量,主要为降雨入渗量; ΔS_w ——土壤水蓄变量。

(2) 灌溉期缺水水量。

$$W_i(q)=T_i-q_iF/j$$

$$W_i(q)\leq 0$$

(3) 灌溉定额非负约束。

$$0\leq q_i\leq q_{\max}$$

(4) 渠道来水量非负约束。

$$T_{qi}>T_i>0$$

(5) 预测降雨量非负约束。

$$P_i>0$$

(6) 保证率约束。

1.1.3 灌溉制度分析 灌溉农业中的灌溉制度主要包括:灌溉定额,灌水时间和灌水次数。灌溉供水能够满足作物各生育阶段的需水量要求,本文直接以建三江平原常用灌溉制度为基础进行各类计算。采用浅—深—浅的灌水方法,即分蘖和分蘖以前采用浅灌,分蘖后期到乳熟前采用深灌,乳熟以后浅灌,黄熟以后落干。具体的灌溉定额和灌溉次数在应用实例时具体给出。

1.2 模型求解

在模型的建立及程序编制过程中对有关问题的处理如下:

(1) 以地下水蓄变量变化最小为目标;

(2) 水稻可采用两种灌溉方式,充分灌溉和控制灌溉;

(3) 水稻泡田用水量基本上是定值,用水时间、用水量比较集中,再考虑优化。

本文以地下水蓄变量变化最小为目标函数。由于该系统水利联系复杂,调用 matlab 软件优化工具箱自带的相应函数,并利用 matlab 编程技术求解目标函数。首先根据约束条件(1),(2),(3),(4),(5),按照调配原则优先满足改善生态环境的生态环境用水需求,计算出当地的缺水量,再根据各分区需水比例、兼考虑社会效益,对多水源供水进行调度分配,并按照在解空间均匀取值的办法初选样本方案。经过对模型的分解以及对各约束条件及调度原则的正确选取,能够大大减少非劣解集的数量,成功实现调度模型的调试计算,制定出切合实际的调度方式。

2 基于风险分析的灌区多水源联合调度方案优选

风险是指由于未来事件的不确定性而导致行为主体在某一时间内获得机会或遭受损失的大小以及

发生这种机会和损失的可能性。可以说,风险既强调不确定性,又强调这种不确定性给我们的事业和项目带来的机会与损害。由于工程管理中强调决策管理、目标规划和计划管理。工程目标规划和计划都是着眼于未来,而未来充满着不确定性因素,即充满着风险因素和风险事件。灌区多水源优化调度是采用水资源系统、优化建模等方法和技术,通过控制灌溉、地下水开发、地表水引用等非工程与工程措施,在满足农业用水、生态环境基本用水需求条件下,对地表水与地下水等多种水资源在多地地区及上下游之间进行合理调度,由于其系统的复杂性,及包含的大量随机性和不确定性因素,加上管理人员知识结构以及管理经验等主观因素的局限性,多水源优化调度方案必然存在一定的风险,因此需对调度方案进行风险分析,以实现决策方案的优选。

对灌区多水源联合调度进行风险分析与管理,可遵循风险管理的一般步骤实行,即要对灌区多水源联合调度方案存在的不确定性因素进行风险考究判别、风险定量测算、风险决策优选^[3]。

2.1 风险考究判别

灌区多水源联合调度方案的风险考究判别,是通过灌区自然概况、人工过程、水资源调配手段、灌区政策制度等进行全面系统地分析,确定影响调控结果的一般不确定性因素。影响水资源配置的因素有自然资源、社会经济、工程技术、科技管理等多个方面,需对风险因素进行初步筛选,通过定性分析筛选的风险因素与各调控目标之间的相互关系,辨识调控方案的主要风险因素。① 自然风险:描述灌区多水源联合调度自然环境方面的风险,包括水资源量、泥沙情况、水土流失情况、生态环境情况等风险因素。② 社会经济风险:描述研究区社会、经济发展方面的风险,包括人口与社会发展水平、经济结构与总量、经济增长率等风险因素。③ 工程风险:描述工程技术措施方面的风险,包括防洪、供水、水资源保护等措施的风险因素。④ 管理风险:描述通过管理手段调控方面的风险,包括法律、法规、水价、体制等风险因素。目前我国初始水权尚不明确,水价体制与机制并不完善,信息化技术远未普及,故管理风险暂不考虑,本文只研究前三种风险在多水源联合调度方案的损失。一般认为多水源联合调度方案的风险损失主要包括“缺水”(自然、工程风险)造成的经济(社会经济风险)损失和为规避风险而花费的投资额(社会经济风险)。由于区域内需水量以及系统供水工程规模在一定时期内基本稳定,而天然降雨的预测极其不确定,因此可利用的入渗量成为了重要的风险因子,研究风险问

题又需将各方案置于不同的来水频率下对不同入渗量产生的不同风险损失进行研究^[4]。

2.2 风险定量测算

采用 Monte-Carlo 随机模拟技术,结合多水源联合调度模型,计算不同风险因素组合下的经济和社会效益。风险计算是指在风险识别的基础上,通过对所收集的大量资料进行分析,运用概率论和数理统计的方法,对风险发生的概率及其损失程度做出定量估计,包括风险损失的估计、风险损失的概率分布的确定以及综合风险计算。风险损失估计:分别计算各种方案在不同保证率下的风险损失。风险损失的概率分布及计算:求解各方案对应风险损失的概率分布,即利用三角形分布;求解不同保证率下的的概率分布,根据估计的风险损失和风险损失的概率分布,确定各方案不同保证率下的风险。

2.3 决策优选

综上可知,灌区多水源联合调度方案的实际运行仍存在各种风险,而通过对个方案存在的风险进行估计又给出了各方案的风险大小排序,由于各行动方案总会出现不同程度的不确定性风险,假设各行动方案都会出现最坏的结果值,那么规避风险的做法就是选取这些最坏结果中的最小者所对应的行动方案,这样便能通过风险分析对灌区多水源的联合调度方案进行优化,为管理者进行投资决策提供参考。

3 实例研究

以黑龙江省农垦总局建三江分局为例进行实例研究。建三江分局位于黑龙江、乌苏里江、松花江交汇的三江平原东部,地跨两市两县:西北以青龙山与同江市为界,西南与富锦市相接,东北与抚远县接壤,南与饶河毗邻,东与俄罗斯隔江相望。该分局下辖15个大中型国有农场,139个管理区^[5]。水稻产量占黑龙江省净调出量的近1/5,近年来由于水稻种植发展迅猛,水稻种植主要依靠地下水井灌。根据统计资料,2009年水稻种植面积已达48.7万hm²,累积抽取地下水316333万m³,目前该地区地下水位平均下降1.45m左右,已出现超采现象,需对该区水资源进行优化调度,以实现水资源的高效利用,解决超采问题。

据相关统计资料,至2013年建三江分局水田面积将达66.7万hm²,本文以此为基数,并结合当地生产实际,利用建立的灌区多水源联合调度模型,给出相应水源调度方案。需要说明的有以下几点:依据建三江地区常规灌溉制度所确定的不同来水保证率(5%,25%,50%,75%,95%)下的水稻灌溉定额分别

为 4 824,5 031,5 413,6 029,6 404 m³/hm²;拦蓄径流主要是采取建节水闸等将地表径流水进行拦截,进而蓄入渠道转而灌溉给农田,达到减少水土流失提高水资源利用效率的目的。

利用计算机编程求解,研究在来水频率为 50%条件下求解多水源优化问题,调节计算一次运行得到 45 个最优解,每个最优解都代表一个关于多水源优化调度组合的决策方案。按照在解空间均匀取值的方法初选了其中 4 个样本方案(表 1)。

表 1 三江平原建三江水稻灌区多水源联合调度方案				
模型 最优解	多水源调度方案			
	降雨量/ mm	拦蓄径流 量/10 ⁴ m ³	渠道来水 量/10 ⁴ m ³	地下水开 采/10 ⁴ m ³
1	523.21	60127.28	161018.24	120763.68
2	523.21	62354.77	140890.96	161018.24
3	523.21	115731.86	105668.22	120763.68
4	523.21	105668.22	75477.3	161018.24

① 风险损失估计。由于多水源系统运行资料的缺乏,本研究将灌溉期缺水水量看作主要的不确定对象,灌溉期缺水量的不确定性主要是由于可利用的天然降雨多少的不确定性,也就是说入渗量是最明显的不确定性因素,因此把其他水源独立系统看作是满足供需要求的封闭系统,并依此求解区域缺水损失。对降雨量的预测值考虑 5 种来水保证率的情况,根据上述选取的 4 个最优解中其他水源配置方案,可通过水量平衡公式计算得到入渗量,利用公式(3)计算缺水经济损失兼具考虑各独立水源满足用水需求时多水源协调利用造成的费用损失额,最终确定多水源联合调度方案的风险损失(表 2)。

表 2 各调度方案的风险损失					万元
方案	来水保证率				
编号	$P=5\%$	$P=25\%$	$P=50\%$	$P=75\%$	$P=95\%$
1	9842.5	9350.4	8661.4	8464.4	7676.9
2	7873.6	6003.8	4133.9	2263.8	984.2
3	9103.8	8562.9	7283.5	3248.0	2460.6
4	4921.3	3444.9	2066.9	984.2	429.1

② 风险损失概率分布及风险计算。风险损失概率分布采用三角分布^[6],三角形分布是常用的主观概率分布,对所研究的风险变量只需专家提供最小值、最大值和最可能值 3 个数值,就可确定该风险变量的概率分布,同时认为灌区降雨量预测值的概率分布为正态分布,即风险损失的概率分布也定为正态分布。多水源优化调度方案在不同状态下的风险损失概率分布与各状态出现的概率分布相同。也就是说,表中的 4 个方案对应的损失变量的分布与预测降雨量来水保证率分布是等同的(表 3)。假定 5 种保证率的分布近似为正态分布,50%出现的可能性最大,25%,

75%保证率出现的可能性比 50%小,但比 5%,95%出现的可能性大(表 4)。

表 3 风险损失的标准化处理					
方案 编号	来水保证率				
	P=5%	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%
1	1	0.95	0.88	0.86	0.78
2	0.79	0.61	0.42	0.23	0.10
3	0.92	0.87	0.74	0.33	0.25
4	0.44	0.35	0.21	0.10	0.05

表 4 入渗量来水保证率的概率分布					
来水 保证率	$P=5\%$	$P=25\%$	$P=50\%$	$P=75\%$	$P=95\%$
概率	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1

风险计算采用常用公式: $R=p\times e^r$,其中 R 为风险计算结果, r 为标准化的风险损失,经过计算的得到的结果见表 5。

表 5 各方案面临不同入渗量保证率时的风险					
方案 编号	来水保证率				
	P=5%	P=25%	P=50%	P=75%	P=95%
1	0.27	0.51	0.72	0.47	0.22
2	0.22	0.36	0.45	0.25	0.11
3	0.25	0.48	0.62	0.29	0.13
4	0.16	0.31	0.37	0.22	0.11

根据计算结果确定最优方案,从上述方案风险评价中不难发现,各方案在不同保证率情况下均有最大可能风险,从各最大风险中选出最小风险的方案,即为最优方案。通过计算判断得出最优解为 0.37,位于第四方案 50%保证率概率下,因此通过风险分析评价最终得优化方案为方案 4(表 5)。

4 结 语

灌区多水源的调度问题应考虑地区自然状况、井渠工程、经济能力等多种要素,对灌区的水资源进行整体多阶段、多层次和多目标调度,本文针对三江平原水稻灌区日益增长的水资源供需矛盾,以及其地下水超采问题,建立多水源联合调度模型,利用 matlab 进行模型求解。由于多水源联合调度方案涉及许多不确定性因子,这些不确定性因子的存在往往使调度方案的运行存在一定风险,因此,本文对多水源联合调度方案进行了风险分析,通过风险考究判别、风险测算,研究了不同来水频率、不同降雨入渗量等不确定性因素产生的风险损失,为灌区多水源联合调度方案优选提供了决策依据。同时,本文以三江平原建三江管局为例进行实例研究,通过建模与求解得出满足约束条件的 4 种方案,并通过风险评价对方案进行了决策优选,得到风险情况下最优推荐调度方案为方案 4。调度结果在区域水资源管理时具有实用参考价值。

5 结 论

(1) 季节性冻土受气温、地温和积雪的影响,融雪期季节性冻土从表层向深层依次融化,融雪水的下渗也呈现出从地表向深层下渗的变化规律。

(2) 积雪的深度变化及冻土水分的下渗,共同决定了融雪洪水的流量,融雪期融雪洪水的流量持续时间较长,并显示出明显的周期性变化。

(3) 融雪期 10 cm 内季节性冻土湿度的变化,会产生较大融雪洪水,而 10 cm 以下季节性冻土湿度不大,下伏土壤冻层如果形成了阻隔层,其阻隔层离地表越近,洪水洪峰越大,且这一现象十分突出。消除阻隔层后,洪峰变得相对平缓。

参考文献:

[1] 田华,杨晓丹,张国平,等. 2009 年 3 月中旬新疆融雪型洪水气象成因分析[J]. 气象,2011,37(5):590-598.

[2] 傅华,贾丽红,肖继东,等. 阿克苏地区库玛拉克河流域融雪洪水分型及成因[J]. 干旱区研究,2011,28(3):433-437.

[3] 吴素芬,刘志辉,邱建华. 北疆地区融雪洪水及其前期气候积雪特征分析[J]. 水文,2006,26(6):84-87.

[4] 王志杰,迪里木拉提,李从林. 天山北麓低山丘陵地区春季融雪洪水的研究:以三工河古河道为例[J]. 干旱区地理,2002,25(4):302-308.

[5] 仇家琪,徐俊荣,陈亚宁. 天山北坡春季雪洪形成的气候因子分析[J]. 干旱区地理,1995,18(1):43-50.

[6] 俞永旺,徐冰,白东明,等. 天山北坡雀尔沟河春季融雪

洪水的成因分析[J]. 干旱区研究,1995,12(3):15-20.

[7] 梁春成,杨乃康,陈亚宁. 天山宁家河春季融雪洪水成因初探[J]. 干旱区地理,1993,16(3):75-79.

[8] 隗经斌. 新疆军塘湖河典型融雪洪水过程研究[J]. 冰川冻土,2006,28(4):530-534.

[9] 陆智,刘志辉,闫彦. 新疆融雪洪水特征分析及防洪措施研究[J]. 水土保持研究,2007,14(6):256-258,261.

[10] 魏守忠,常绪正,马健,等. 影响三工河干沟春季融雪洪水发生的气象因素[J]. 干旱区研究,2005,22(4):476-480.

[11] 刘艳,李杨,张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪—气象因子分析[J]. 水土保持研究,2010,17(2):145-149.

[12] 房世峰. 基于“3S”技术的分布式融雪径流模型的设计和应用[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2007.

[13] 秦艳. WRF 与干旱区分布式融雪径流模型的耦合及应用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2009.

[14] 乔鹏,秦艳,刘志辉. 基于能量平衡的分布式融雪径流模型[J]. 水文,2011,31(3):22-27.

[15] 房世峰,裴欢,刘志辉,等. 遥感和 GIS 支持下的分布式融雪径流过程模拟研究[J]. 遥感学报,2008,12(4):655-672.

[16] 裴欢,房世峰,刘志辉,等. 分布式融雪径流模型的设计及应用[J]. 资源科学,2008,30(3):454-459.

[17] 徐学祖. 冻土分类现状及建议[J]. 冰川冻土,1994,16(3):193-201.

[18] 戴长雷,孙思淼,叶勇. 高寒区土壤包气带融雪入渗特征及其影响因素分析[J]. 水土保持研究,2010,17(3):269-272.

[19] 王爱娟,张平仓. 水土保持措施对小流域洪水过程的影响研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):18-20.

(上接第 276 页)

参考文献:

[1] 王立坤. 三江平原井灌水稻灌溉制度建模及其优化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2002.

[2] 刘景瑞. 三江平原资源与生态水利的实施探讨[J]. 水利水电科技进展,2002,22(6):27-29.

[3] 李震. 多水源优化调度的管理与决策[D]. 天津:天津大

学,2009:40-43.

[4] 顾文权,邵东国,黄显峰,等. 水资源优化配置多目标风险分析方法研究[J]. 水利学报,2008,39(3):339-345.

[5] 邹元春,于晓菲,霍莉莉,等. 三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征[J]. 环境科学,2012,33(4):1209-1215.

[6] 丁大发,吴泽宁,王海政. 黄河流域水资源多维临界调控风险估计[J]. 人民黄河,2003,25(1):45-47.