

柴达木盆地香日德绿洲水资源优化配置研究

卢晓杰¹, 张克斌², 李瑞²

(1. 上海勘测设计研究院, 上海 200434; 2. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 该文采用统计学、气象学等相关知识, 在研究区水资源供需平衡分析的基础上, 采用多目标优化方法, 分高、中、低3个方案对研究区水资源进行了优化配置, 并对配置结果进行了分析讨论。优化总用水量高、中、低方案分别为1.09亿 m^3 、1.14亿 m^3 、1.21亿 m^3 ; 总供水费用高、中、低方案分别为403.96万元、338.33万元、266.54万元。结果表明: 优化方案保证了全区的生活用水和基本生态用水, 使得总用水量控制在可开采量范围内, 用水成本合理, 可保证研究区社会、经济、环境可持续发展。

关键词: 水资源; 优化配置; 供需平衡; 可持续发展

中图分类号: F323.213

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0232-05

Study on Optimized Allocation of Water Resources of Xiangride Oasis in Qaidum Basin

LU Xiao-jie¹, ZHANG Ke-bin², LI Rui²

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China;

2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key laboratory of Soil
and Water Conservation and desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on water resources balance, the water resources distribution was optimized by using the method of multi-objective optimization, three proposals were made and analyzed. Total water consumption for high middle and low proposals are 1.09 billion m^3 , 1.14 billion m^3 and 1.21 billion m^3 , and total expense on water supply is 4 039 600 yuan, 3 383 300 yuan, 2 665 400 yuan, respectively. Result shows that optimized proposal could guarantee domestic water and the basic ecology water use in the area at a reasonable cost, and limit the total water consumption under allowable yield, and achieve sustainable development in the research area.

Key words: water resources; optimized allocation; balance of supply and demand; sustainable development

水资源作为一种可再生的自然资源, 由于自身的特殊性, 涉及到社会、经济、生态环境及资源系统的各个方面, 其配置是一个复杂的理论实践过程。现有的水资源配置理论主要有4种: “以需定供”^[1]、“以供定需”^[1]、基于宏观经济^[2-3]和可持续发展的水资源优化配置^[4-7]。这些水资源配置理论为解决我国水资源供求矛盾, 促使水资源高效安全利用和社会经济的发展做出了很大的贡献。

当前国际上水资源系统规划优化配置的发展趋势, 一是对水资源系统结构、供求关系的描述更深入和具体, 更多地采用水文长系列分析方法; 二是从区域社会、经济、环境及生态持续发展的动态角度研究

水资源布局与供需平衡^[8]。自20世纪80年代初以来, 国内外开展了一系列大型水资源项目, 有力地推动了水资源系统分析理论方法和模型技术的发展和运用^[9-13]。目前, 多目标优化模型较为成熟, 应用也较为广泛, 陈守煜等^[14]以大连市水资源利用与宏观经济协调发展为研究对象, 建立了多目标群决策模型与方法; 蔡喜明等^[15]研究了基于宏观经济的区域水资源多目标集成系统; 王丽婧等^[16]采用基于IMOP进行了流域环境与经济系统的规划。这些都是成功的研究与应用实例。

随着我国西部干旱区经济的发展和人口的快速增长, 水资源的消耗越来越多, 经济活动所依赖的生

收稿日期: 2010-10-24

修回日期: 2011-01-17

资助项目: “十五”国家科技攻关项目(2005BA517A04, 2005BA517A07); 国家林业局项目“盐池荒漠化定位监测”(660550)

作者简介: 卢晓杰(1982-), 男, 山东莱州人, 硕士, 研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: luxiaojie5172@163.com

通信作者: 张克斌(1957-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士, 研究方向: 荒漠化防治与监测及干旱区环境管理。E-mail: etced@bjfu.edu.cn

©1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

态环境质量在不断遭到严重破坏,在这种严峻态势面前,寻求合理的水资源利用方式或合理的组合与配置方式,显然有其紧迫性和必要性^[17-18]。在西部干旱区,由于经济与生态对水资源的双重依赖,水与生态问题密切相关^[19]。如何协调和解决经济与生态环境之间的关系是水资源配置需要重点研究和解决的关键问题^[20]。

本文以“以供定需”和“可持续发展”的水资源配置理论为基础,在分析区域水资源供需关系的基础上研究了青海都兰香日德绿洲开发过程中的水资源合理配置问题。所用模型是在中国水利水电科学研究院研制的水资源配置模型基础上根据研究区实地情况加以修正的,它反映的因素相对比较全面,全面考虑了生活、生产和生态环境的需水要求。本研究制定了高、中、低3个配置方案,并对3个方案进行了综合评价,研究结果对青海香日德绿洲开发过程中的水资源合理开发利用具有十分重要的理论意义和实际应用价值。

1 研究区概况

香日德绿洲在青海省海西蒙古族藏族自治州都兰县南部,柴达木河上游,北距都兰县城察汗乌苏60 km,其地理位置为 $35^{\circ}52'53''-36^{\circ}07'06''\text{N}$, $97^{\circ}45'28''-98^{\circ}00'58''\text{E}$ 。在行政上包括香日德镇、香加乡灌区,总面积为18万 hm^2 。研究区具有典型高寒大陆性荒漠气候特征,属高原大陆性气候。年平均气温 4°C 左右,寒冷、干燥、富日照、太阳辐射强、多风。年均降水132.8 mm,年均水面蒸发量1475.4 mm,干燥系数为11.11。本区内主要的河流有察汗乌苏河、香日德河、诺木洪河和夏日哈河。这些河流在其下游汇入柴达木河,流入南、北霍鲁逊湖。发源于阿拉克湖、冬给措纳河的香日德河,自东南向西北斜穿香日德绿洲,河流总长250 km,多年流量13.8 m^3/s ,多年平均径流量4.352亿 m^3 ,是该区主要地表水源。区内的主要湖泊为南、北霍鲁逊湖,湖泊总面积为182.7 km^2 ,为盐湖。在昆仑山地河流的源头有几个淡水湖,其中以托索湖和阿拉克湖最大。该区的主导产业以农牧业为主,全区总产值6314.8万元,其中农牧业总产值5426.09万元,所以该区的产业耗水主要为农牧业耗水,其他产业耗水量较小。

香日德地区以旱生、超旱生及盐生植物为主。盆地内草地类型有:温性草原草地类、高寒草原草地类、低地草甸草地类、高寒草甸草地类。以温性荒漠草地类为主,植物类型以小灌木骆驼刺等荒漠植被居多。

2 研究方法

(1) 通过现场典型调查结合以往的研究成果,采用统计学、气象学等相关学科的知识,结合区域经济社会的发展现状及发展趋势,分析研究区水资源开发利用现状和水资源供需平衡。

(2) 以计算作物蒸发蒸腾量(参考作物蒸散量) ET_0 的彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式计算天然草地生态需水量,如式(1)所示。

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量(mm/d); Δ ——温度-饱和水汽压关系曲线在 T 处的切线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); T ——平均气温($^{\circ}\text{C}$); e_a ——饱和水汽压(kPa); R_n ——净辐射 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; e_d ——实际水汽压(kPa); G ——土壤热通量 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; γ ——湿度表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); U_2 ——2 m高处风速(m/s)。

(3) 以人口、资源、环境和经济协调的可持续发展为目的,采用多目标规划模型,分高、中、低3个方案进行研究区水资源优化配置,建模的具体步骤为:

① 决策变量及模型参数的确定。研究区用水部门主要集中在生活、生产和生态环境三大模块。将生活用水和生态用水作为定量,在此基础上选择决策变量和参数。

④ 建立目标函数。其目标有:A 首先保证生活用水和基本的生态环境用水(作为定值);B 尽量降低供水费用;C 通过控制地下水的开采量,控制地下水水位,达到地下水资源补采平衡;D 地表水用水量控制在可供水量范围内。

(四) 变量的上下限约束。根据基准年和近期水平年用水需水情况以及供水情况,限定各决策变量的上下限约束。

$\frac{1}{4}$ 模型求解。多目标规划模型都要转化成单目标进行求解,将目标进行归一化,求出非劣解集,产生决策方案,最后进行决策,得到优选方案的非劣解—多目标模型最优解,又称最佳权衡解或伯力图(Pareto)最优解。

3 研究区水资源供需平衡分析

3.1 需水量预测

3.1.1 生态需水量预测 生态需水指天然生态系统为维持其正常结构和功能所需的水量。其供给既可

以是直接的降水供给,也可以是降水转换的地表径流或地下径流的供给。

本文根据彭曼-蒙蒂斯法估算研究区各月参考作物蒸发蒸腾量,然后据此计算天然草地、林地及河道湖泊的生态需水量。

根据香日德地区实测资料,利用彭曼-蒙蒂斯公式,计算结果如表 1 所示。

表 1 研究区参考作物多年平均蒸发蒸腾量计算结果

月份	ET ₀	月份	ET ₀
	作物多年平均蒸散量/(mm·d ⁻¹)		作物多年平均蒸散量/(mm·d ⁻¹)
1	0.54	7	6.20
2	1.10	8	5.95
3	2.42	9	4.75
4	4.03	10	3.26
5	5.28	11	1.57
6	6.00	12	0.68

根据多年平均蒸发蒸腾量计算结果,各种类型生态需水量的预测值如表 2 所示。

表 2 研究区 2020 年生态需水量预测值

土地利用类型	项目	预测值		
		高	中	低
灌溉草场	灌溉标准/(m ³ ·hm ⁻²)	6600	7080	7530
	发展规模/hm ²	57.33	57.33	57.33
	生态需水量/万 m ³	38	41	43
灌溉林地	灌溉标准/(m ³ ·hm ⁻²)	8100	8595	9090
	发展规模/hm ²	1432	1432	1432
	生态需水量/万 m ³	1160	1231	1302
天然草地	生态需水量/万 m ³	93		
天然林	生态需水量/万 m ³	3485		
河道湖泊	生态需水量/万 m ³	899		
合计	生态需水量/万 m ³	5675	5749	5822

天然草地年生态需水量=草地年蒸发蒸腾量(m)×草地面积(m²)

天然林年生态需水量=每 1 hm² 每年天然林蒸散量(m³)×天然林地面积(hm²);

河道湖泊年生态需水量=年均水面蒸发量(m)×河道湖泊面积(m²)。

3.1.2 各行业(工农牧业及生活)需水量预测 需水量除受人口、经济等因素影响之外,还与水资源条件和需水特性、节水水平和节水潜力、需水管理方式等密切相关。此外,在市场经济作用下,水价因素也会影响需水的发展趋势。

根据 2020 年规划纲要,到 2020 年项目区总人口 21 912 人,第二产业和第三产业总产值预计分别为 838.71 万元和 50 万元,大、小牲畜将分别发展到

1.39 万头和 27.99 万头,灌溉耕地面积为 8 978.5 hm²。项目区第二产业、第三产业用水定额最低方案分别为 118 m³/万元、60 m³/万元,生活用水定额预计为 65 L/(人·d),大牲畜用水定额为 5 L/(头·d),小牲畜用水定额为 2.5 L/(头·d),水浇地灌溉定额预计为 7 290 m³/hm²。

3.2 可供水量的预测

本地区生态环境脆弱,随着绿洲开发规模的增大和全球气候变暖对水资源的影响,绿洲水资源利用的供需失调日益严重。毛军等在“柴达木盆地香日德绿洲灌溉对地下水的影响及生态响应研究”一文中根据地下水位与天然植被的对应关系和天然植被的保护目标对水资源开发方案进行了评估。研究认为,香日德地区绿洲灌溉引水在 1~1.5 亿 m³ 是引水危险区,可能使地下水位和下游泉水出露带无法维持现状,导致下游地下水埋深面积发生变化。

3.3 供需平衡分析

本区年用水量超过 1.5 亿 m³ 将导致下游地下水位下降,致使绿洲面积呈缩小趋势。用水量在 1~1.5 亿 m³ 的范围属于危险用水范围,本区用水必须保证年引水量低于 1.5 亿 m³,尽量使用水量不超过 1 亿 m³。到 2020 年研究区预计年累计需水量 1.24 亿 m³,超出安全用水范围 0.24 亿 m³。

为实现区域水资源的可持续利用,使该区未来的发展不致于因水问题而出现停滞现象,本文对全区水资源进行优化配置。

4 水资源优化配置模型的建立及求解

根据研究区社会发展和经济规划的要求,将优化配置选为近期水平规划年 2020 年。

4.1 变量的设置

本模型中主要的决策变量分为 3 类:

(1) 第一产业。X₁:灌溉草场面积(hm²);X₂:灌溉林地面积(hm²);X₃:天然草场面积(hm²);X₄:天然林地面积(hm²);X₅:河道湖泊面积(hm²);X₆:耕地面积(hm²)。

(2) 第二产业。X₇:工业和建筑业产值(万元)。

(3) 第三产业。X₈:第三产业产值(万元)。

4.2 参数的确定

根据研究区 2020 年近期规划目标,并对本区实际用水情况实地调查后,本着首先满足生活用水,保证生态向良性方向发展的同时,追求用水量最小和供水费用最低原则,确定模型参数值。各参数值如表 3 所示:

表 3 研究区 2020 年目标规划参数值

参数	参数值		
	高方案	中方案	低方案
灌溉草场用水定额/(m ³ · hm ⁻²)	6600	7080	7530
灌溉林地用水定额/(m ³ · hm ⁻²)	8100	8595	9090
天然草场用水定额/(m ³ · hm ⁻²)	12433.8	12433.8	12433.8
天然林地用水定额/(m ³ · hm ⁻²)	4500	4500	4500
河道湖泊用水定额/(m ³ · hm ⁻²)	14754.75	14754.75	14754.75
耕地灌溉定额/(m ³ · hm ⁻²)	5625.9	62510	6945.6
工业和建筑业万元产值耗水量(m ³ / 万元)	104.26	110.92	118
第三产业万元产值耗水量(m ³ / 万元)	53.02	56.4	60
生活用水[L/(人 · d)]	55	60	65
大牲畜用水[L/(头 · d)]	5	5	5
小牲畜用水[L/(头 · d)]	2.5	2.5	2.5
灌溉用水供水成本价格/(元 · hm ⁻²)	165	150	135
第二、三产业用水供水成本价格/(元 · m ⁻³)	0.20	0.15	0.10

耕地灌水定额为各作物种类综合净灌水定额, 其中小麦种植比例 51.76%, 灌溉定额 6 300 m³/hm²; 青稞种植比例 9.41%, 灌溉定额 5 700 m³/hm²; 豆类种植比例 8.24%, 灌溉定额 4 800 m³/hm²; 油菜种植比例 25.88%, 灌溉定额 4 800 m³/hm²; 马铃薯种植比例 4.71%, 灌溉定额 4 050 m³/hm²; 生活用水定额参照青海省人民政府办公厅转发的省水利厅关于青海省用水定额规定, 并根据研究区实地情况和发展预期做了适当修正。

4.3 约束和目标分析

供水费用约束和目标: 各行业供水总费用 F 为:

$$F = \sum n_i \lambda X_i - \mathcal{G}_i^+ \tag{2}$$

式中: n_i ——各变量的用水定额; λ ——各变量供水成本费; X_i ——各用水变量; \mathcal{G}_i^+ ——各行业总供水费用的正偏差变量, 等价于最小化总供水费用, 目标函数为:

$$\min z = \delta f_i^+ \tag{3}$$

水资源约束: 地表水使用不得超过供水能力, 地下水的抽水总量不能大于其可开采资源量, 用水量约束可表示为:

$$\sum X S_i \leqslant X S_{\text{供}} \tag{4}$$

式中: $X S_i$ ——各变量用水量; $X S_{\text{供}}$ ——研究区可供水量。

变量的上下限约束: 根据基准年和近期水平年用水需水情况以及供水设施情况, 限定各决策变量的上下限约束。

由各变量、参数和变量的上下限约束组成的研究区水资源多目标优化配置模型, 用运筹学专业软件 Lindo 6.1 进行求解, 得出研究区各用水单元的最佳分配方案。

4.4 模型运行方案

本研究确定计算机模拟模型运行方案共 3 个。运行方案按高、中、低 3 种方案进行研究区水资源优化配置, 运行结果见表 4。

表 4 研究区 2020 年水资源优化配置方案成果

种类	年用水量/ 万 m ³			年用水成本/ 万元		
	高方案	中方案	低方案	高方案	中方案	低方案
灌溉草场	38	41	43	7.600	6.150	4.300
灌溉林地	1160	1231	1302	232.000	184.650	132.000
天然草场	93	93	93	0	0	0
天然林地	3485	3485	3485	0	0	0
河道湖泊	899	899	899	0	0	0
耕地	5052	5613	6236	148.146	134.68	121.210
工业和建筑业	8.74	9.30	9.90	1.748	1.395	0.99
第三产业	0.265	0.282	0.30	0.053	0.0423	0.03
生活用水	43.99	47.99	51.97	8.798	7.1985	5.197
大牲畜用水	2.54	2.54	2.54	0.508	0.381	0.254
小牲畜用水	25.54	25.54	25.54	5.108	3.831	2.554
合计	10862	11447	12148	403.961	338.326	266.535

5 水资源配置结果分析

5.1 水量分析

尽管优化模型对水资源进行了优化调度和合理配置,但由于研究区总水资源量相对较少,使得多半用水单元存在不同程度的缺水。优化总用水量高、中、低方案分别为 1.09 亿 m^3 、1.14 亿 m^3 、1.21 亿 m^3 ,均控制在可供水量和可开采量范围内,优化方案保证了全区的生活用水和基本生态用水。其中,生态用水和耕地灌溉用水是研究区的主要用水单元,占总用水量的 95% 以上。

研究区第二、三产业由于产业不发达,耗水较少。在配置中优先保证了二、三产业的充足用水,以促进本区的经济发展。耕地用水耗水量大,占研究区总用水量的 50% 以上,且用水效率不高,后期应着重搞好节水灌溉措施,将节约的水用于其它产业的发展。

5.2 供水费用分析

根据优化结果和供水价格,计算出研究区高、中、低方案总供水费用分别为 403.96 万元、338.33 万元、266.54 万元,三套方案供水费用皆偏低,其中单位供水成本与全国其它地区相比相对偏低,这一方面是因为该区经济发展水平较低;另一方面,为鼓励本区经济发展,第二三产业的水价定值略低一些,以促进产业发展。

另外,由于地下水的供水成本相对比地表水低得多,加之地下水水质较好,因而各单位都倾向于多用自备井开采地下水,产业用水类型的趋向对控制地下水开采量是不利的,同时也造成了供水价格较难控制。后期应采取措施提高部分供水价格以提高供水效率,减少水资源浪费。

5.3 高、中、低方案比较分析

从低方案到高方案,考虑节水技术的进步和用水效率的提高,对各用水单元的用水配额逐渐减少,配水总量从 1.21 亿 m^3 递减到 1.09 亿 m^3 ,可有效缓解研究区用水压力,有利于当地水资源的良性循环。同时,考虑到地区经济的发展和节水需要,供水成本价格相对提高,在总用水量相对减少的情况下,总供水费用相对提高,年用水成本从 266.54 万元提高到 403.96 万元,如果用水效率提高到相应水平同时经济条件允许,则选取高方案是明智之举。

参考文献:

[1] 王顺久,侯玉,张欣莉,等.中国水资源优化配置研究的

进展与展望[J].水利发展研究,2002,2(9):9-11.

- [2] 翁文斌,蔡喜明,史慧斌,等.宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J].水利学报,1995(2):1-11.
- [3] 许新宜,王浩,甘泓,等.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997.
- [4] 冯尚友,刘国全.水资源持续利用的框架[J].水科学进展,1997,8(4):301-307.
- [5] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].北京:科学出版社,2000.
- [6] 谢新民,张海庆,尹明万.水资源评价及可持续利用规划理论与实践[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [7] 王浩,秦大庸,王建华,等.黄淮海流域水资源合理配置[M].北京:科学出版社,2003.
- [8] 方乐润.水资源工程系统分析[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [9] 叶永毅,黄守信,秦大庸.水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编[M].北京:中国科学技术出版社,1995.
- [10] Huffaker R. The role of prior appropriation in allocating water resources into the 21st century[J]. Water Resources Department, 2000, 16(2): 265-273.
- [11] 许新宜,王浩,甘泓,等.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997.
- [12] 尹明万,甘泓,汪党献,等.智能型水供需平衡模型及其应用[J].水利学报,2000(10):71-76.
- [13] Dai Tewei, Labadie J W. River basin network model for integrated water quantity/ quality management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001(5): 295-305.
- [14] 陈守煜,黄宪成,李登峰.大连市水资源利用与宏观经济协调发展的多目标群决策模型[J].水利学报,2003,9(3):42-48.
- [15] 蔡喜明,翁文斌,史慧斌.基于宏观经济的区域水资源多目标集成系统[J].水科学进展,1995,6(2):139-144.
- [16] 王丽婧,郭怀成,王吉华,等.基于 IMOP 的流域环境与经济系统优化设计[J].地理学报,2005,60(2):219-228.
- [17] 刘昌明,傅国斌,李丽娟.西部水资源与生态环境建设[J].矿物岩石地球化学学报,2002,21(1):5-91.
- [18] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].北京:科学出版社,2000.
- [19] 陈敏建.我国水资源研究的发展趋势[J].水利水电技术,2001,32(1):16-19.
- [20] 冯尚友,刘国全,梅亚东.水资源生态经济复合系统及其持续发展[J].武汉水利电力大学学报,1995,28(6):624-629.