

宁东能源化工基地水资源优化配置研究

范磊^{1,2}, 赵振宏³, 王旭升⁴, 钱会¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市城市规划设计研究院, 陕西 西安 710082;
3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 宁东能源化工基地水资源极为贫乏,合理配置基地内的水资源对能源基地的发展极其重要。论文采用线性规划模型对宁东能源化工基地的联合供水方案进行了优化研究,提出了地表水和地下水联合供水方案,确定了供水方案中地下水的实际配额和供水路线,得到下述结论:陶乐傍河水源地可向平罗精细化工基地供水 $0.065 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;骆驼井应急水源地向横城和鸳鸯湖工矿区供水 $0.019 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;吴忠平原 2 号和 3 号备选水源地向灵武工矿区供水 $0.089 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $0.067 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;大泉地区的 1 号水源地向南部的马家滩和积家井工矿区供水 $0.054 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。按地下水总供水量 $0.294 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和最佳供水路线联合配置地下水,地表水配额只需供水 $3.136 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,既能满足宁东能源化工基地 2020 年规划对水资源需求,又可实现社会经济和环境效益的最大化。

关键词: 水资源; 水资源优化配置; 线性规划模型; 宁东能源化工基地

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)04-0041-06

Research on optimal allocation of water resources in Ningdong energy chemical industrybase

FAN Lei^{1,2}, ZHAO Zhenhong³, WANG Xusheng⁴, QIAN Hui¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Urban Planning and Design Institute, Xi'an 710082, China; 3. Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 4. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Ningdong energy and chemical industrial base is an area with acute shortage of water resources, how to reasonably allocate the water resources is vital to the development of the industrial base. In this paper, the water resources of Ningdong energy and chemical industrial base are optimized using linear programming model, a plan of conjunctive use of surface water and underground water was proposed. In the plan, the actual quotas and routes of groundwater supply were also determined and the following conclusions were drawn. The Pingluo fine chemical base was supplied by water resource Taolebang River with $0.065 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, Hengcheng and Yuanyanghu chemical base was supplied by Luotuojing emergency water resources with $0.019 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, Lingwu industrial and mining areas was supplied by water resources of No. 2 and 3 chemical base with $0.089 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ and $0.067 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ on Wuzhong plain; Majiatan and Jijiajing industrial and mining areas was supplied by No. 1 water resource in Daquan area with $0.054 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. The groundwater was jointly allocated according to the total groundwater supply of $0.294 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ and the optimal supply route, and the quota of surface water was only $3.136 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, which can not only meet the water resources demand of Ningdong energy chemical industrial base in 2020, but also maximize the social, economic and environmental benefits.

Key words: water resources; optimized allocation of water resources; linear programming model; Ningdong energy chemical industry base

收稿日期:2018-03-28; 修回日期:2017-04-16

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目:鄂尔多斯盆地(宁夏)能源基地地下水勘查(1212011121162)

作者简介:范磊(1985-),男,陕西西安人,博士研究生,工程师,主要从事水资源与环境研究。

通讯作者:赵振宏(1968-),男,陕西眉县人,教授级高级工程师,主要从事地下水调查研究。

1 研究背景

宁东能源化工基地是国务院批准的国家重点开发区、国家重要的大型煤炭生产基地、“西电东送”火电基地、煤化工产业基地和循环经济示范区。基地位于鄂尔多斯盆地西缘灵盐台地之上,水资源极为贫乏,供水来源单一,绝大部分供水来源于黄河,少量来源于吴忠平原地下水。黄河引水不但用水成本很高,而且地表水易受污染,输水又具有季节性,保障程度低。因此,如何高效利用水资源是宁东能源化工基地建设面临的重要问题,受到社会各界的广泛关注。本研究提出了基地地表水和地下水联合配置供水方案,并对方案进行了优化研究。

水资源优化配置是在流域或特定的区域范围内,根据相关原则,通过合理抑制需求,保障有效供给等手段,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行调配^[1]。1960年,Colorado大学对各部门需水计划和未来水资源可供量进行的合作研究,是水资源优化配置思想的雏形。此后,水资源优化配置模型的研究快速发展,近年来兴起的遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)等新的优化算法,使水资源优化配置研究有效性显著提高。我国的水资源优化配置研究起步较晚,但进展迅速。20世纪80-90年代,贺北方^[2]对区域水资源优化配置模型及实际应用问题进行了探索;2000年以来,水资源优化配置研究发展较快,在优化理论、优化方法和实际应用等方面的研究都取得了较大发展^[3-7]。近年来,水资源优化配置问题的研究主要集中于对优化方法的探索及实际应用问题的解决^[8-12],尤其对矿区水资源综合利用和优化配置进行了有益的探索^[13-16],对宁夏等干旱半干旱地区依据不同目的和需求的水资源优化配置研究也取得了可喜的进展^[17-20]。对于宁东能源化工基地的水资源优化配置问题,目前只是给出了基地各类水(黄河水、矿井疏干水、处理污水)配置数量,提出了矿井水、各类废水处理利用及节约用水解决基地供水的措施^[13-14],尚未涉及基地地表水与地下水的联合运用以及水资源优化配置问题。因而前人的研究对基地合理高效开发利用水资源的实际指导作用尚有欠缺,有必要进行深入研究。本研究依据“鄂尔多斯盆地(宁夏)能源基地地下水勘查”项目的地下水资源评价资料,结合宁东能源化工基地建设规划对水资源需求,提出了地表水和地下水联合配置供水方案,并采用线性规划模型对供水方案进行了优化研究,为基地水资源高效利用

提供基础依据,也为干旱区工业基地经济合理利用水资源提供参考。

2 研究资料和研究方法

本研究根据宁东能源化工基地产业规划对水资源的需求及供水现状,依据“鄂尔多斯盆地(宁夏)能源基地地下水勘查”项目的地下水资源评价资料(2014年),利用拓扑图方式表达地表水与地下水联合供水方案的基本内容,采用线性规划模型对联合供水方案进行优化研究,确定供水方案中地下水和地表水的实际配额及地下水供水路线。

2.1 宁东能源化工基地产业规划对水资源的需求及供水现状

2.1.1 宁东能源化工基地产业规划 按照宁东能源化工基地总体规划,基地以煤炭、电力和煤化工为3大主导产业,辅助发展石油天然气化工、精细化工、材料工业和其他服务业。煤矿区包括灵武、鸳鸯湖、横城、马家滩、积家井等矿区和井田,电厂包括马连台电厂、灵州煤矸石综合电厂、灵武电厂、鸳鸯湖电厂、水洞沟电厂、方家庄电厂和枣泉电厂等。3个工业园区包括煤化工园区、临河综合项目区和灵州综合项目区。在宁夏东北部与内蒙古交界地带建设了平罗精细化工基地。宁东能源化工基地地理位置及主要厂矿的分布见图1所示。

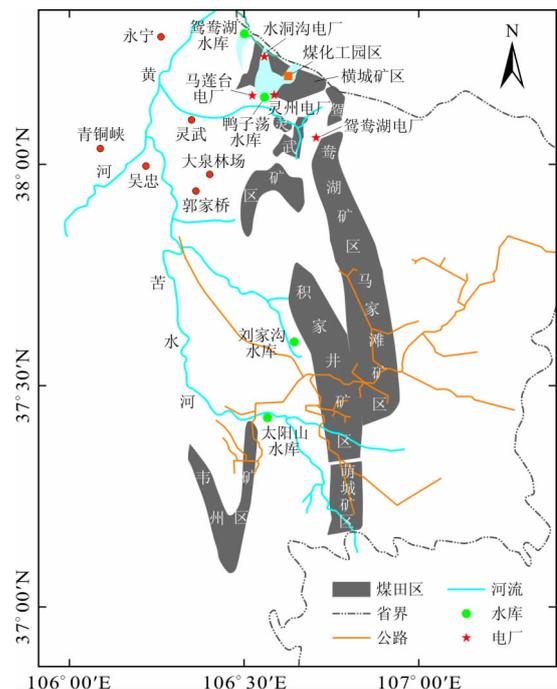


图1 宁东能源化工基地厂矿分布图

2.1.2 宁东基地对水资源的需求 根据《宁东基

地总体规划与建设纲要》,2020年总需水量达到 $3.43 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中煤矿生产生活用水 $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,电厂生产生活用水 $0.29 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,煤化工生产用水 $2.98 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,以煤化工用水量最大。环保绿化需水可通过矿坑废水和工业废水的处理或再循环利用解决。

2.1.3 宁东基地引黄供水工程和应急水源需求

(1)引黄供水工程。鸭子荡水库位于基地北部,2020年供水量可以达到 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;太阳山供水工程(刘家沟水库)位于基地南部,供水量为 $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。这两座水库的水源均来自黄河,水量的配额来自水权置换,即把农业节约用水所产生的余额分配给工业用水。

(2)应急水源需求。应急水源首先保障煤矿生产生活、电厂生产生活用水的需求,即2020年煤矿生产生活用水 $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,电厂生产生活用水 $0.29 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,合计 $0.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。煤化工项目的用水需求暂且不纳入应急供水保障范围。

2.2 地下水源地及其供水潜力

目前,已经探明可以向宁东能源化工基地供水的地下水水源地有5处。通过对“鄂尔多斯盆地(宁夏)能源基地地下水勘查”项目地下水资源评价资料的归纳整理,可向宁东能源化工基地提供淡水的地下水水源地的现状开采量、工程可开采量及开采潜力(供水能力)统计见表1。

表1 宁东能源化工基地水源地地下水开采量及开采潜力统计表 $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$

水源地	位置	现状开采量	工程可开采量	开采潜力
骆驼井水源地	基地西部	0.018	0.064	0.046
灵武大泉水源地	基地东部	0.090	0.279	0.189
灵武崇兴水源地	基地东部	0.040	0.070	0.030
陶乐平原水源地	基地北部	0.010	0.123	0.113
吴忠平原傍河水源地	基地东部	0	0.246	0.246
总计		0.158	0.782	0.624

(1)骆驼井水源地:处于基地西部,属于北大池闭流区。现状开采量 $0.018 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,工程可开采量 $0.064 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,尚有 $0.046 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 开采潜力(供水能力)。

(2)灵武大泉水源地:包括北部大泉乡现有水源地和大泉1号备选水源地。北部大泉乡现有水源地(直接供给神华基地),现状开采量 0.090×10^8

m^3/a ,工程可开采量 $0.109 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;大泉1号备选水源地,现状无开采,工程可开采量 $0.170 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。该水源地尚有 $0.189 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 开采潜力。

(3)灵武崇兴水源地:现状开采量 $0.040 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,工程可开采量 $0.070 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,该水源地尚有 $0.030 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 开采潜力。该水源地已经是灵武市区的供水水源地。

(4)陶乐平原水源地:处于基地北部。高仁镇水源地已开采 $0.010 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,傍河水源地工程可开采量 $0.113 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,该水源地尚有 $0.113 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 开采潜力。

(5)吴忠平原傍河水源地:包括吴忠2号应急备选水源地和灵武西侧的梧桐树3号备选傍河水源地。吴忠2号应急备选水源地位于黄河东岸,可开采量 $0.153 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;灵武西侧的梧桐树3号备选傍河水源地可开采量 $0.093 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。两水源地现状无开采,该水源地开采潜力 $0.246 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

归纳得出:宁东能源化工基地西部的盐池骆驼井地区水源地可供水 $0.046 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,东部的灵武地区水源地可供水 $0.465 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,而北部的陶乐地区水源地可供水 $0.113 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。可向宁东能源化工基地供水的地下水水源地合计供水能力为 $0.624 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

3 结果与讨论

3.1 地表水与地下水联合配置供水方案

按照宁东能源基地的总体规划,能源化工企业的用水主要由鸭子荡水库和刘家沟水库提供。引黄供水维护运营的成本很高,蒸发渗漏造成的水资源浪费较大,而且地表水易受污染,保障程度低。在探明了地下水水源地之后,通过适当引入地下水的供水工程,可以减少蒸发损失,降低运营成本,并起到应急供水的作用,提高用水保障程度。但是,仅由现有的地下水水源地,还不能满足能源化工基地的全部新鲜淡水需求。因此,采用地表水与地下水联合配置供水方案,将更有利于区域水资源的高效开发利用。经分析研究,提出了如图2所示的宁东能源化工基地地表水与地下水联合配置供水方案。

方案的要点如下:

(1)陶乐水源地向平罗精细化工基地单独供水。平罗精细化工基地在陶乐地区的北端,目前的供水措施是引黄河水。该基地规划供水为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ($0.073 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),而陶乐傍河水源地的可开采量达到 $0.113 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,能够满足平罗精细

化工基地的需求。

(2) 修建输水管道和配水站联合基地西部骆驼井水源地,向横城工矿区 and 鸳鸯湖矿区供水。骆驼井水源地的供水能力为 $0.046 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(3) 在灵武地区,修建配水站和输水管道联合傍河3号水源地和鸭子荡水库的供水管道,向横城工矿区供水。另外修建配水站联合现有的崇兴水源地和2号备选水源地联合鸭子荡水库的供水管道,向灵武工矿区提供煤矿和电厂的生产生活用水。这种与鸭子荡水库联合调度的方案中,地下水的可供水量达到 $0.276 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。鸭子荡水库则向煤化工基地提供煤化工项目的新鲜淡水需求,2020年设计供水能力为 $2.98 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,地下水可供水量占比很小。

(4) 在灵武南部地区,将大泉水源地与1号备选水源地与刘家沟水库的地表水进行联合调度,向积家井和马家滩工矿区供水。马家滩和积家井矿区2020年规划需要 $0.054 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的新鲜淡水,低于刘家沟水库的供水能力。大泉水源地和1号水源地的可供水总量为 $0.189 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,比马家滩和积家井矿区需求量还大,因此剩余的水量可以向北分配到灵武工矿区。

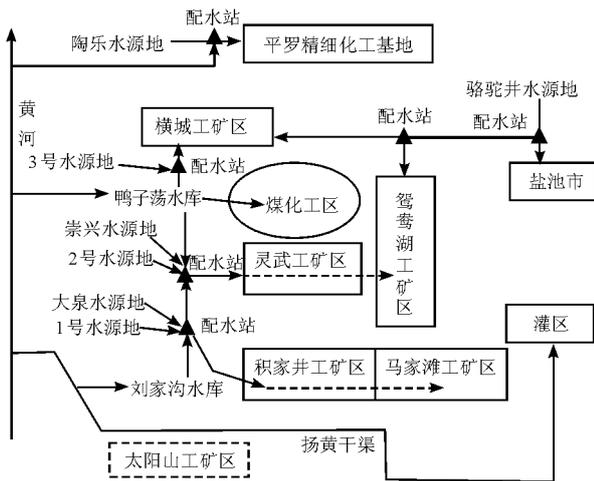


图2 宁东能源化工基地地表水与地下水联合配置供水方案拓扑图

3.2 宁东能源化工基地地表水和地下水联合配置供水方案的优化

以上的讨论提出了宁东能源化工基地地表水与地下水联合配置供水方案,确定了周边地下水水源地的供水线路和最大可能供水规模,但还存在很大的不确定性,即地表水和地下水的实际配额达到多大才是经济合理的方案。为了定量的确定方案中的供水配额,

本文依据线性规划理论,通过建模和模型求解对联合供水方案进行优化,即在最低的经济成本达到供水目标前提下对地表水和地下水资源进行优化配置。

线性规划法是数学规划的一个重要分支,是研究在现有人力、物力等资源条件下,合理调配和有效使用资源,以达到最优目标(产量最高、利润最大、成本最小、资源消耗最少等)的一种数学方法。线性规划法是水资源优化配置方法中最基本的方法,建模简单,并可通过计算机软件进行计算^[10]。

3.2.1 模型方程的建立 宁东能源化工基地地表水与地下水联合配置供水方案优化的基本思路是用最低的经济成本达到供水目标。因为引用黄河水的供水方案是已经有规划的,工程建设已经部分完成。因此,在本模型中不再考虑地表供水工程的基础设施投资,而主要考虑地下水供水工程的基础设施投资和运营成本。

供水总量取决于需求,应满足以下关系式

$$Q_1 + Q_2 = Q_x \quad (1)$$

式中: Q_1 为地表水的有效供水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_2 为地下水的供水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_x 为需要达到的总供水量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。设地表水引水量为 Q_s ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),考虑到蒸发和渗漏损失量,地表水有效供水量与引水量关系为:

$$Q_1 = (1 - \eta) Q_s \quad (2)$$

式中: η 为损失系数(无量纲),按照鸭子荡水库的有关资料, η 可取 3.3% (源自“宁东能源化工基地一期供水工程水资源论证报告书”)。

对于损失的水量,属于水资源的浪费,引入以下罚函数:

$$J_w = \left(q_s + e_s \frac{\eta}{1 - \eta} Q_1 \right) \frac{\eta}{1 - \eta} Q_1 \quad (3)$$

式中: J_w 为模型中引入的处罚成本; q_s 为为单方水的水权置换成本; e_s 为处罚的倍增函数(即每多浪费 1 m^3 水需要增加的单方成本)。根据宁夏地区水权置换的经验, $q_s = 2.0 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。 e_s 可取 $0.01 \text{ 元}/10^4 \text{ m}^3$,表示每浪费 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水单价上涨 0.01 元。

对于任一地下水水源地,开采量会引起当地供水和生态环境压力,其水权置换的单方成本随着实际开采量与可开采量的比例(环境压力增大)增加,计算公式为:

$$M_p = q_g \left(1 + 3 \frac{Q_2}{Q_p} \right) Q_2 \quad (4)$$

式中: q_g 为地下水的基础水权置换单方成本,取值为 $2.0 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

总的经济成本按下式计算:

$$J_x(Q_1, Q_2) = J_w + \frac{M_p}{\Delta t} + \frac{q_s Q_1}{(1 - \eta)\Delta t} + \frac{q_g Q_2 L_g}{\Delta t} + m_s Q_1 + m_g Q_2 \quad (5)$$

式中: Δt 为模型考虑的投资回收周期, a, 取 $\Delta t = 20a$; $q_s Q_1$ 为地表水的水权置换成本; q_g 为地下水供水工程的基础设施投资单方成本, $0.04 \text{ 元}/\text{m}^3 \cdot \text{km}$; L_g 为输水距离, km; m_s 为地表水供水工程的运营配水成本, $1.5 \text{ 元}/\text{m}^3$; m_g 为地下水供水工程的配水运营成本, $1.0 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

规划模型的目标函数为:

$$J_x = \min J_x(Q_s, Q_g) \quad (6)$$

即联合供水方案在 20 a 内的总成本达到最低的情况下, 确定地表水的供水量 Q_s 及地下水的供水量 Q_g 。

地表水和地下水供水均需满足以下约束条件:

$$Q_s \leq Q_R; Q_g \leq Q_P \quad (7)$$

式中: Q_R 为地表水库的供水能力, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; Q_P 为地下水的可开采量, $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

3.2.2 模型求解 模型求解通过计算机软件进行。对图 2 中的供水方案可以分解为陶乐地区、中部工矿区及南部工矿区几个组成部分, 分别求解各自的优化模型, 遵循用最低的经济成本达到供水目标的原则, 对各区地表水和地下水资源进行优化配置。

(1) 陶乐地区水资源优化配置方案。陶乐地区平罗精细化工基地的需水量为 $Q_x = 0.073 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 而陶乐水源地地下水可开采量 $Q_P = 0.113 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 目前黄河三棵柳引水工程供水能力为 $Q_R = 0.055 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 输水距离是 $L_g = 40 \text{ km}$ 。模型求解得到的结果如图 3 所示。

图 3 可以看出: 随着地下水的供水量增加, 供水经济成本总体呈现下降趋势。当地下水的供水量达到 $0.065 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时, 供水成本降低到最低。陶乐傍河水源地的可开采量达到 $0.113 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 但只需开采 $0.065 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 就可以满足经济成本最优的供水目

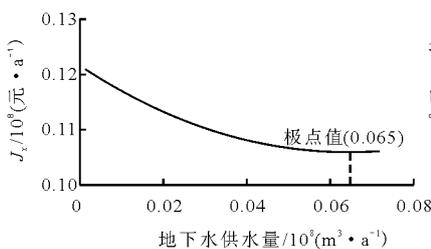


图3 陶乐地区供水方案经济成本随地下水供水量的变化曲线

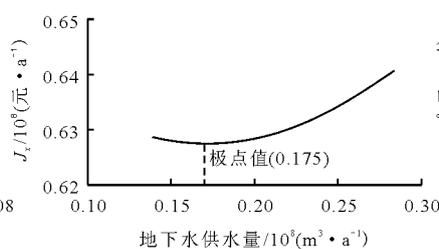


图4 中部工矿区供水方案经济成本随地下水供水量的变化曲线

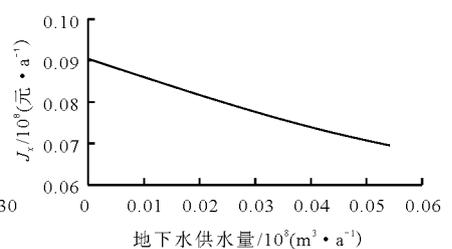


图5 南部工矿区供水方案经济成本随地下水供水量的变化曲线

标, 这样地表水需要调度配置 $0.008 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(2) 中部工矿区水资源优化配置方案。中部工矿区包括横城工矿区、灵武工矿区及鸳鸯湖工矿区, 联合供水的总需水量为 $Q_x = 0.396 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地表供水工程为鸭子荡水库, 除去向煤化工的供水外, 剩余供水能力为 $0.256 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。可供水的地下水水源有 4 个: 骆驼井水源地、现有的灵武崇兴水源地、3 号备选水源地和 2 号备选水源地, 地下水总计可供水量 $0.352 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。首先进行总量的优化选择, 然后按照各个水源地的供水能力分配供水量, 平均输水距离按照 60 km 计, 模型求解得到的结果如图 4 所示。

图 4 可以看出: 随着地下水的供水量增加, 供水经济成本总体呈现上升趋势, 但当地下水的供水量达到 $0.175 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时, 供水成本降低到最低。因中部矿区联合供水的总需水量为 $Q_x = 0.396 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 故中部工矿区水资源最优配置方案应为: 地下水的供水总量采用 $0.175 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 地表水的供水量为 $0.245 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。在周边水源地中, 崇兴水源地已是灵武市供水水源地, 可不作为宁东基地供水水源地考虑; 2 号水源地与 3 号水源地按照供水能力和输水距离进行比例划分, 建议开采方案为: 骆驼井水源地 $0.019 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (骆驼井水源地可开采量 $0.046 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 占可开采量 41%); 灵武平原 2 号备选水源地 $0.089 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (占可开采量 58%); 灵武平原 3 号备选水源地 $0.067 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (占可开采量 72%)。

(3) 南部工矿区水资源优化配置方案。南部工矿区包括马家滩工矿区和积家井工矿区, 联合供水的总需水量为 $Q_x = 0.054 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地表供水工程为刘家沟水库, 供水能力为 $0.061 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水水源地为大泉乡水源地和 1 号备选水源地, 可开采量为 $0.189 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 输水距离为 50 km。模型求解得到的结果如图 5 所示。

图5可以看出:采用地下水可以降低供水成本,且全部采用地下水时成本最低。灵武1号备选水源地的可开采量为 $0.170 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,超过了南部工矿区的需水量,因此南部工矿区可以考虑全部由1号备选水源地供水。

3.2.3 联合供水方案地下水的实际供水路线和供水配额 为实现用最低的经济成本达到供水目标,通过对地表水与地下水联合配置供水方案优化,地下水的实际供水路线和供水配额归纳见表2。

表2 联合供水方案地下水的实际供水路线和供水配额

水源地	供水路线	供水配额/ $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$
陶乐傍河水源地	平罗精细化工基地	0.065
骆驼井应急水源地	横城和鸳鸯湖工矿区	0.019
吴忠2号备选水源地	灵武工矿区	0.089
吴忠3号备选水源地	灵武工矿区	0.067
大泉地区的1号水源地	马家滩和积家井工矿区	0.054
总计		0.294

由表2可知,按总供水量 $0.294 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和最佳供水路线联合配置地下水,地表水配额只需 $3.136 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,既能满足宁东能源化工基地2020年规划对水资源需求,又能提高用水保障程度,实现社会经济和环境效益的最大化。

4 结论

(1)研究了宁东能源化工基地地表水和地下水联合配置供水的方案,并采用线性规划模型对联合配置供水方案进行优化,根据优化方案确定了地下水的实际供水路线和供水配额。陶乐傍河水源地可向平罗精细化工基地供水 $0.065 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;骆驼井应急水源地向横城和鸳鸯湖工矿区供水 $0.019 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;吴忠平原2号和3号备选水源地向灵武工矿区供水 $0.089 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $0.067 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;大泉地区的1号水源地向南部的马家滩和积家井工矿区供水 $0.054 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(2)根据优化方案确定的地下水实际供水路线及配额联合地表水供水,既可实现用最低的经济成本达到宁东能源化工基地2020年规划的供水目标,又能提高基地供水保障程度,减少地表水蒸发等造成的水资源损失,从而实现区域水资源的高效开发利用。

参考文献:

- [1] 吴泽宁,索丽生.水资源优化配置研究进展[J].灌溉排水学报,2004,23(2):1-5.
- [2] 贺北方.区域水资源优化分配的大系统优化模型[J].武汉水利电力学院学报,1988(5):109-118.
- [3] 王浩,王建华,秦大庸.流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J].水科学进展,2004,15(1):123-128.
- [4] 徐振国,李强,杨天祥,等.水资源优化配置研究现状及展望[J].河南水利与南水北调,2008(11):29-31.
- [5] 王浩,游进军.水资源合理配置研究历程与进展[J].水利学报,2008,39(10):1168-1175.
- [6] 陈太政,侯景伟,陈准.中国水资源优化配置定量研究进展[J].资源科学,2013,35(1):132-139.
- [7] 靳晓莉,王君勤,高鹏.中国灌区水资源优化配置研究进展[J].人民珠江,2018,39(3):62-65.
- [8] Singh A, Panda S N. Optimization and simulation model - ling for managing the problems of water resources[J]. Water Resources Management, 2013, 27(9): 3421-3431.
- [9] 鹿海员,谢新民,郭克贞,等.基于水资源优化配置的地下水可开采量研究[J].水利学报,2013,44(10):1182-1188.
- [10] 康永辉,王宝红.线性规划法在水资源系统规划优化配置中的应用[J].科学之友,2010(7):6-12.
- [11] 张玲玲,高亮.多目标约束下区域水资源优化配置研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):16-19.
- [12] 杨丽丽,王云霞,谢新民.基于地表水和地下水联合调控的水资源配置模型研究[J].水电能源科学,2010,28(7):23-27.
- [13] 陈丹,李淑霞,李岩.宁东能源化工基地水资源配置[J].宁夏农林科技,2012,53(7):107-108.
- [14] 张华,包淑萍.宁东能源化工基地水资源配置及用水解决途径的探讨[J].中国水利,2014(13):23-25.
- [15] 尹尚先.试论矿井水资源化与矿区水资源优化配置[J].华北科技学院学报,2012,9(1):6-10.
- [16] 连会青,夏向学,冉伟,等.干旱区矿区水资源综合利用和优化配置研究[J].华北科技学院学报,2014,11(9):21-26.
- [17] 马晓兵,郭梁.浅议宁夏河东灌区水资源优化配置[J].科技经济导刊,2017(35):86-88.
- [18] 黄晓荣,张新海,裴源生,等.基于宏观经济结构合理化的宁夏水资源合理配置[J].水利学报,2006,37(3):371-375.
- [19] 谢新民,赵文骏,裴源生,等.宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [20] 曹建忠.宁夏中南部城乡饮水安全工程受水区水资源优化配置[J].水利规划与设计,2014(3):26-28.