

# Research on Sustainable Utilization of the Drainage Water in Jurassic Coal Field in Northern Shaanxi Province

Huaqi Wang<sup>1,2,3</sup>, Zhao Wu<sup>4</sup>, Shuaijun He<sup>1,2,3</sup>, Hongyun Ma<sup>1,2,3</sup>, Chengzhu Li<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Xi'an Center of Geology Survey, China Geology Survey, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Center of Water Resources and Environmental Engineering and Technology in Shaanxi Province, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>The Arid and Semi-Arid Regions Groundwater and Ecological Key Laboratory, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Xi'an Water Conservancy Planning Survey Design Institute, Xi'an Shaanxi

Email: whqi321@163.com

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2016; accepted: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2016; published: Oct. 26<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Aiming at the problem of the water resources shortage, blowing out water and bursting sand, water waste in the Energy Industry Base in the North of Shaanxi Province, how to deal with the reasonable utilization of the surface water, groundwater and drainage water avoiding the blowing out water and bursting sand is a scientific problem. Taking the Jurassic coal field in northern Shaanxi province for example, based on the analysis of the status and utilization feasibility of the drainage water, this paper constructed the multi-water source optimal allocation model considering the drainage water, and adopted the algorithm of the improved multi-objective particle group to simulate the model, and allocate the shortage water resources for the scientific decision of the managers.

## Keywords

Drainage Water Resources in Coal Mining, Water Resources Optimal Allocation, Multi-Objective Particle Group Algorithm, The Jurassic Coal Field in Northern Shaanxi Province

# 陕北侏罗纪煤田疏排水资源可持续利用研究

王化齐<sup>1,2,3</sup>, 吴 钊<sup>4</sup>, 贺帅军<sup>1,2,3</sup>, 马洪云<sup>1,2,3</sup>, 李成柱<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安

<sup>3</sup>干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安

<sup>4</sup>西安市水利规划勘测设计院, 陕西 西安

Email: whqi321@163.com

收稿日期: 2016年9月30日; 录用日期: 2016年10月23日; 发布日期: 2016年10月26日

## 摘要

针对陕北能源化工基地水资源短缺、突水溃砂以及疏排水资源浪费问题并存, 如何统筹兼顾, 既充分利用地表水、地下水和矿区疏排水资源又规避矿井突水溃砂灾害, 是研究区内水资源可持续利用面临的科学问题。本文以陕北侏罗纪煤田为示范研究区, 在系统分析区内疏排水资源现状以及利用的可行性分析的基础上, 将矿区疏排水资源纳入水资源优化配置中, 构建了考虑疏排水资源的多水源优化配置模型, 采用改进多目标粒子群算法进行模拟求解, 科学合理分配极其短缺的水资源, 以供管理者进行科学决策。

## 关键词

矿区疏排水资源, 水资源优化配置, 多目标粒子群算法, 陕北侏罗纪煤田

## 1. 引言

全国 91 个国有重点煤矿区中, 75%的矿区缺水, 44%的矿区严重缺水[1]。在我国, 煤炭生产以地下开采为主, 为了确保井下安全, 必须排除大量的矿井水[2]。根据国家发展改革委员会 2006 年编制的《矿井水利用专项规划》, 目前全国吨煤矿井水涌水量为  $2.15 \text{ m}^3$ , 每年涌水量约  $42 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 利用率仅为 26%。矿井水是煤矿生产的伴生物, 作为煤矿废水排出地面, 造成水资源的浪费和污染。因此, 在缺水严重的矿区, 对矿井水进行资源化利用是缓解水资源供需矛盾, 改善矿区生态环境的有效途径, 具有良好的社会、环境和经济效益[3]。

在疏排水资源利用研究方面, 陈科[4]、修海峰[5]等人详细分析了神东矿区矿井水水质特征, 探讨了资源化的处理技术、综合利用途径等。在对矿井水资源利用进行详细调查的基础上, 李翔[2]等人将矿井水进行分类优化设计, 不仅节约了水资源避免污染环境, 而且降低了煤矿经济投入成本, 具有良好的经济效益、社会效益和环保效益。党学亚等人[6]也从生态水文地质学的角度, 提出了充分利用煤田地下水满足强劲用水需求, 保护水资源的对策。刘永娟等人[7]结合矿井污水和采空区及其充填物的特点, 重点开发了矿井污水采空区过滤净化技术, 为矿井污水的净化与利用开辟了一条新途径。因此, 加强对矿井水的利用, 是建设资源节约型、环境友好型社会的需要, 也是陕北干旱半干旱缺水地区建设大型煤炭基地的必由之路, 也为资源枯竭型城市经济转型提供了有力的探索[8]。

陕北侏罗纪煤田是我国煤炭资源富集程度最高、煤质最好、开发前景最好的煤田, 是世界七大煤田之一[9]。采煤引起的突水溃砂、疏排水资源浪费以及污染问题成为威胁着矿井生产和人身安全的键科学问题, 而矿区排水大多都以工业废水形式排出, 使水资源受到严重污染、水质难以保证, 在一定程度上影响了煤矿所在地区国民经济的发展[10]。而解决这一关键问题, 使疏排水资源合理优化利用, 为保障矿区可持续发展提供科学支撑, 是本文的宗旨。

## 2. 疏排水资源现状分析

经调查分析, 陕北侏罗纪煤田矿坑排水污染主要表现在色度、浊度等物理指标和个别化学指标超标, 污染物主要是悬浮在排水中的煤、岩微粒, 属以煤尘、岩粉为主的单纯性物理指标及硫酸盐、化学需氧量等化学污染物(表 1、表 2 和表 3)。随着煤炭开采规模的逐步扩大, 矿坑排水对水环境的污染将呈现增加的趋势, 建议将矿坑水优先为生产用水所利用, 经处理使色度、浊度、悬浮物等指标达标后作为辅助水源复用或排放到周边地表水进行水循环, 而对于一些工业用水对水质要求不是很高, 因而可以采取适当处理, 如建立污水处理厂等方式, 加以净化处理使矿坑排水满足一般工业和农灌用水的需要从而进行重复使用, 如电厂的冷却用水、井下水力采煤用水等, 从而减少对未污染水资源的开采量[11]。

**Table 1.** The indexes of drainage in the coal field in Kaokaowusu Ditch

**表 1.** 考考乌素沟煤矿排水感官性指标测试成果统计表

分析项目	单位	限值	狼窝渠煤矿		神源煤矿	
			测试值	超标程度	测试值	超标程度
色度	度	15	5.0	未超标	5.0	未超标
浑浊度	度	3	>200.0	严重超标	180.0	严重超标
臭		无异臭	无	未超标	无	未超标
味		无异味	有, 煤焦油气味	严重超标	有, 煤焦油气味	严重超标
肉眼可见物		无	有, 含煤粉岩粉	严重超标	有, 含煤粉岩粉	严重超标

**Table 2.** The harmful indexes of drainage in the coal field in Kaokaowusu Ditch

**表 2.** 考考乌素沟煤矿排水有毒有害指标测试成果统计表

分析项目	限值(mg/L)	狼窝渠煤矿		神源煤矿	
		测试值(mg/L)	超标程度	测试值(mg/L)	超标程度
汞	0.001	<0.001	未超标	<0.001	未超标
砷	0.05	<0.02	未超标	<0.02	未超标
六价铬	0.05	0.02	未超标	0.03	未超标
挥发酚类	0.002	0.003	超标	0.003	超标
氰化物	0.05	<0.002	未超标	<0.002	未超标

**Table 3.** The chemical indexes of drainage in the coal field in Kaokaowusu water source

**表 3.** 考考乌素沟水源煤矿排水一般化学指标测试成果统计表

分析项目	单位	限值(mg/L)	狼窝渠煤矿		马家盖沟煤矿	
			测试值(mg/L)	超标程度	测试值(mg/L)	超标程度
pH		6.5~8.5	8.1	未超标	7.7	未超标
铁	mg/L	0.3	0.02	未超标	0.04	未超标
氯化物	mg/L	250	28.36	未超标	95.72	未超标
硫酸盐	mg/L	250	32.08	未超标	260.51	超标
溶解性总固体	mg/L	1000	315.96	未超标	683.68	未超标
总硬度	以 CaCO <sub>3</sub> 计, mg/L	450	182.32	未超标	339.32	未超标
化学耗氧量	以 O <sub>2</sub> 计, mg/L	3	10.99	严重超标	3.30	超标
氟化物	mg/L	1.0	0.97	未超标	1.10	超标

### 3. 矿井水资源利用的可行性和必要性

矿井水是伴随煤炭开采产生的地下涌水,是一种地下水资源[12]。通过以上调查数据分析,陕北侏罗纪煤田矿井水资源化利用有两个有利的条件:① 在开采过程中排放量相对稳定,作为水资源其水量有保证[10]。② 水质优良。而且,矿区排水主要来源于含水层的水和极少量的井下废水,其水质与地下水水质特征基本一致,水质是比较好的。如果将矿井水资源化后,可大大减轻由于矿区地下水资源过度开采而造成的环境资源破坏,具有良好的环境效益,同时处理后的矿井水可不同程度的满足生产生活用水,还可免缴排污费和水资源损失费,经济和社会效益十分明显。面对区内煤矿普遍缺水的状况,有必要对矿井水进行处理,因地制宜,因水制宜,因需而用,实现矿井水资源化。研究区地表水-地下水-矿区疏排水之间存在着密不可分的转化关系,不能单一地研究和开发某一部分水资源,必须统筹兼顾,联合调度,实现水资源的最优化利用。陕北侏罗纪煤田具有较丰富的矿井水资源,充分利用矿井水资源,不仅是基地建设的需要,也是促进基地建设持续健康发展的必然选择。

### 4. 考虑矿区疏排水资源的水资源优化调度模型

水资源优化配置问题一般是多目标优化的问题[13],求解多目标优化问题的方法一般是将多目标问题转化成为单目标问题[14],本文以社会效益、经济效益和生态效益最大化为总体目标,进行地表水、地下水及矿区疏排水等多水源优化调控研究,并采用改进多目标粒子群算法求解多目标优化模型的非劣解,详细刻画煤炭开发条件下多种水源的立体开发和优化调控,为大型煤炭基地的可持续发展提供新思路。考虑矿区安全和生态环境保护约束条件下,建立水资源优化调度问题一般是多目标优化的问题,目前求解多目标优化问题的方法一般是将多目标问题转化成为单目标问题,转化方法根据决策者的不同而不同,因此求解结果有可能不同。针对上述问题,利用 pareto 支配观念,针对粒子群算法容易陷入局部极值点、早熟等缺点,引入线性变换的惯性权重、遗传算法的变异思想、混沌优化思想去改进多目标粒子群算法,应用改进的多目标粒子群算法求解多目标的水资源优化调度模型[15]。

#### 4.1. 模型建立

水资源复杂系统的影响因素较多,且具有不同的量纲,大小不成比例,目标之间往往是相互制约的,因此对水资源系统进行优化配置是多目标的。根据水资源优化配置原则,模型设置经济及社会两个方面的目标,生态环境保护方面,体现在对生态用水的供水次序即供水系数上。

##### 4.1.1. 目标函数

模型目标函数可以表示为:

$$Z = \text{opt}[f_1(x), f_2(x)] \quad (1)$$

1) 采用供水带来的直接效益作为经济目标。

$$\max f_1(x) = \min(-f_1(x)) = \min\left(-\sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(i)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k \beta_j^k w_k\right) \quad (2)$$

式中:  $x_{ij}^k$  为第  $i$  水源向第  $k$  子区第  $j$  用户的供水量;  $b_{ij}^k$  为第  $i$  水源向第  $k$  子区第  $j$  用户供水的效益系数;  $c_{ij}^k$  为第  $i$  水源向第  $k$  子区第  $j$  用户供水的费用系数;  $\alpha_i^k$  为第  $k$  子区水源  $i$  的供水次序系数;  $\beta_j^k$  为第  $k$  子区第  $j$  用户的用水公平系数;  $w_k$  为第  $k$  子区权重系数;  $k$  为区域内用水系统个数;  $I(k)$  为用水系统水源个数;  $J(k)$  为  $k$  用水系统用户个数。

2) 由于社会效益难以度量,而区域缺水量的大小或缺水程度对社会的发展有所影响,因而采用区域

总缺水量最小作为社会目标。

$$\min f_2(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[ \frac{D_j^k - \sum_{i=1}^{I(i)} x_{ij}^k}{D_j^k} \right]^2 \quad (3)$$

式中： $D_j^k$ 为第  $k$  子区第  $j$  用户的需水量； $x_{ij}^k$  为第  $i$  水源向第  $k$  子区第  $j$  用户的供水量。

3) 生态目标均在用水顺序上体现。

#### 4.1.2. 约束条件

1) 供水保证率约束

对各行业采用不同的保证率进行水资源配置，其中生活用水系统供水保证率为 98%，生态用水系统的保证率为 97%，工业、建筑业和第三产业用水系统的供水保证率为 95%，农业用水系统的供水保证率为 75%。

2) 水源可供水量约束

$$\sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq KG_i^k \quad (4)$$

3) 变量非负约束

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad (5)$$

#### 4.1.3. 模型参数

1) 用水系统权重系数  $w_k$

用水系统权重系数  $w_k$  是  $k$  用水系统对整个研究区的重要程度，可以根据 AHP 法确定。

2) 供水次序系数( $\alpha_i^k$ )与用水公平系数( $\beta_j^k$ )

研究区属于多水源综合利用，联合供水，各水源的供水次序为：疏排水、城市中水、地表水、地下水以及外域调水。

$$\alpha_i^k = \frac{1 + n_{\max}^k - n_i^k}{\sum_{i=1}^I [1 + n_{\max}^k - n_i^k]} \quad (6)$$

式中： $n_i^k$  为  $k$  用水系统  $i$  水源供水次序， $n_{\max}^k$  为  $k$  用水系统供水次序最大值。

用水公平系数  $\beta_j^k$ ，是指  $k$  用水系统内  $j$  用户相对其他用户优先得到水资源的程度。即城镇生活 > 农村生活；绿地 > 环卫；工业 > 建筑业；大牲畜 > 小牲畜 > 农田灌溉 > 林地 > 人工草地。

3) 效益系数和费用系数

效益系数：① 工业用水的效益系数，取用水定额(工业万元产值取水量，单位： $\text{m}^3/\text{万元}$ )的倒数；② 第三产业用水的效益系数按第三产业产值除以第三产业总用水量确定；③ 农业用水效益系数按农业产值除以农业总用水量确定；④ 生活用水和生态用水效益系数一般难以定量化，为保证其得到满足，效益系数赋予较大值。

费用系数：不同水源供水于不同用户的费用系数，可参考其水费征收标准确定。对于有资料的水源工程，根据资料计算确定；缺乏资料时，可参考临近地区类似水源工程选取。

根据榆林地区或者临近地区的相关情况，确定该研究区效益系数及费用系数如下：



效益系数：① 生活用水的效益系数一般难以量化，为保证其得到满足，应赋予较大值。根据矿区的实际情况，生活用水的效益系数取为 500 元/m<sup>3</sup>。② 生态用水，主要指研究区城镇生态环境用水；由于城镇生态环境与城镇居民的生活息息相关，所以取环境用水的效益系数等于生活用水的效益系数，为 500 元/m<sup>3</sup>。③ 工业用水的效益系数，取用水定额的倒数。2005 年，榆林市工业总产值 174.3 亿元，工业总用水量为 6393 万 m<sup>3</sup>；参考现状国内相关城市工业用水情况的基础上，将工业用水定额取为 36 m<sup>3</sup>/万元；所以工业用水的效益系数为 280 元/m<sup>3</sup>。④ 农业灌溉用水的效益系数按灌溉后的农业增产效益乘以水利分摊系数确定。2005 年，榆林市农业总产值为 23.53 亿元，农业灌溉总用水量为 49,779 万 m<sup>3</sup>；此处，将农业灌溉万元产值取水量定为 2115 m<sup>3</sup>/万元，水利分摊系数取 0.3，则农业灌溉用水的效益系数为 1 元/m<sup>3</sup>。

费用系数：榆林市供给居民生活用水的费用系数定为 2.38 元/m<sup>3</sup>，供给工业用水的费用系数定为 3.78 元/m<sup>3</sup>，供给城镇生态环境用水的费用系数定为 2.38 元/m<sup>3</sup>。灌溉用水系数定为 0.3 元/m<sup>3</sup>。

#### 4.2. 模型求解

借鉴多目标进化算法的思想，对多目标粒子群算法求解多目标优化问题所存在的问题，引入了全局最优解和个体最优解的选择策略、精英保留策略以及约束主导原理。根据以上思想，将改进后的多目标粒子群算法引入到水资源优化配置中，得到了该区域水资源优化配置的非劣解集。由于非劣解较多，需要选择出最佳协调解的问题，引入了基于模糊近似理想点法的非劣解集评价模型。对多个目标函数提出一个大致的权重范围，利用三角形模糊法对权重进行模糊处理，并将该模糊权重加权到目标函数的满意度中，通过计算该满意度的三角形模糊数的重心和均方差，确定最佳方案。

本文采用 Matlab 进行汇编多目标粒子群优化算法程序，然后采用 Matlab、JavaScript 与 Visual Studio 混合编程技术，实现多目标多水源优化配置模型与前台界面的无缝链接，界面如图和图。系统可以进行配置管理层次的选择，配置层次包括水源地层次、重点工业区层次、流域层次以及行政区层次。年份可以选择 2010、2020 以及 2030 年，方案这次研究中建立 10 个配置方案可进行选择。通过模拟，2020 年、2030 年配置结果见图 1。



Figure 1. The results of water optimal allocation considering the mining drainage water

图 1. 考虑矿区疏排水资源的优化配置结果

## 5. 主要结论

本文针对陕北能源化工基地生态环境-水资源-煤炭资源系统特征, 如何要实现水资源和煤炭资源的合理开发利用、生态环境良性循环和经济社会可持续发展的目标, 仍存在很多关键性技术难题。在系统收集已有煤田地质勘查资料与采煤保水研究成果的基础上, 构建了考虑疏排水资源的多水源开发利用模式, 在行政区、流域以及重点水源地三个层次上, 将矿区疏排水资源纳入水资源优化配置中, 并基于多规则理论, 结合层次单排序法进行供水水源赋权, 在保证人-水-生态和谐发展的前提下, 建立水资源多目标多层次的水资源优化配置模型, 基于改进多目标粒子群算法, 科学合理分配极其短缺的水资源, 以供管理者进行科学决策。

## 基金项目

陕西省科学计划项目(2015KJXX-70)。

## 参考文献 (References)

- [1] 白海波, 茅献彪, 姚邦华, 等. 潞安矿区煤水共采技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 395-402.
- [2] 徐建文, 于东阳, 孙康. 我国煤矿矿井水的资源化利用探讨[J]. 江西煤炭科技, 2010(3): 92-94.
- [3] 袁航, 石辉. 矿井水资源利用的研究进展与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 50-57.
- [4] 陈科, 任丽韞. 神东矿区矿井水综合利用研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(2): 208-209.
- [5] 修海峰, 朱仲元. 神东矿区高矿化度矿井水资源化探讨[J]. 能源环境保护, 2009, 23(6): 31-33.
- [6] 党学亚, 张茂省, 董英, 等. 陕北侏罗纪煤田地下水保护对策与开采利用方案研究[J]. 地质前缘, 2010, 17(6): 200-207.
- [7] 刘永娟, 韩宝平, 曹建军. 神东矿井污水的开发与利用[J]. 污染防治技术, 2003, 16(4): 88-91.
- [8] 陈洪彪, 吴庆深. 矿井疏干水开发利用可行性研究[J]. 煤炭技术, 2006, 24(6): 10-11.
- [9] 王双明, 范立民, 黄庆享, 等. 陕北生态脆弱矿区煤炭与地下水组合特征及保水开采[J]. 金属矿山, 2009, 697-707.
- [10] 李翔, 李德忠, 付志亮. 淮南矿区矿井水资源综合利用的新探索[J]. 煤炭技术, 2010, 29(12): 225-226.
- [11] 张茂省, 党学亚, 杜中宁, 等. 陕北能源化工基地地下水勘查研究[R]. 西安, 西安地质矿产研究所, 2010.
- [12] 傅成诚, 梅凡民, 马建宏, 等. 我国煤矿矿井水资源化现状[J]. 现代矿业, 2009(3): 15-17.
- [13] 董增川. 大规模多目标系统决策理论、方法及应用[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 1990.
- [14] 刘卫林. 水资源配置系统的计算智能方法及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2008.
- [15] 郭慧芳, 马海波, 董增川, 等. 改进的多目标粒子群算法在鄱阳湖水资源优化配置中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 61-64.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ojswc@hanspub.org](mailto:ojswc@hanspub.org)