

# Water Allocation Optimization Model Studies of Handan City Water Ecological Network Construction

Xinsuo Hu, Weizhou Xing, Yumei Wang

Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Handan, Handan Hebei  
Email: [wangym\\_0070@163.com](mailto:wangym_0070@163.com)

Received: Apr. 6<sup>th</sup>, 2015; accepted: Apr. 24<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 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

Faced with growing water shortages and deteriorating ecological environment, Handan municipal government constructed ecological water network project and improved situation of severe water shortage through the regional water transfer. Confront with a variety of water diversion options, a water optimization model formulation was established by using economic, social and environmental benefits of the three objective functions. And the traditional “environmental benefits” function has been improved, emphasized the role of the “Water Quality” target in the selection of water diversion, which played a crucial role in environmental remediation.

## Keywords

Ecological Water, Optimal Allocation of Water, Model, Environmental Remediation, Public Water, Independent Water Source

---

# 邯郸市生态水网建设水源优化配置模型研究

胡新锁, 邢威洲, 王玉梅

河北省邯郸水文水资源勘测局, 河北 邯郸  
Email: [wangym\\_0070@163.com](mailto:wangym_0070@163.com)

---

作者简介: 胡新锁(1957-), 男, 汉族, 河北衡水人, 现就职于河北省邯郸水文水资源勘测局, 教授级高工, 主要从事水文水资源方面的研究工作。

收稿日期：2015年4月6日；录用日期：2015年4月24日；发布日期：2015年4月30日

## 摘要

面对日益凸显的缺水局面和生态环境恶化，邯郸市政府开发建设了邯郸生态水网工程，通过区域性调水，改善了区域严重缺水的现状。面对多种水源的调水选择，采用经济效益、社会效益和环境效益三大目标函数建立了水源优化配制模型。并对传统“环境效益”函数进行了改进，凸显了“水质质量”指标在选取调水水源中的作用，这一改进对区域水环境修复起到至关重要的作用。

## 关键词

生态水网，水资源优化配置，模型，生态环境修复，公共水源，独立水源

## 1. 引言

邯郸市是河北省南部的中心城市，位于晋冀鲁豫的中心地带，面积 12047 km<sup>2</sup>，人口 980 万。西部山区的煤炭、冶金、建材、电力、陶瓷、医药和化工是本市的重要产业，东部平原区土质肥沃，日照充足，是全省粮、棉、油的高产区之一。平原区自 80 年代以来，由于降水减少、河流干涸，地下水大量超采，出现地下水位持续下降、漏斗区范围扩大等水生态环境恶化现象，且有继续恶化趋势。随着经济与社会的快速发展，需水量不断增加，缺水形势日趋严重，旱灾损失也在逐年加大，不仅给农业生产带来了极大的损失，同时对工业生产、人民生活 and 生态环境也造成巨大影响。面对日益突显的缺水局面和生态环境恶化的有效应对，区域性调水成为解决这一问题的最优途径。邯郸市政府采取果断措施，开发邯郸生态水网建设工程。

## 2. 邯郸市生态水网建设

生态水网工程根据邯郸市东部平原、中部城市和西部山区的不同特点，分别实施“东蓄、中调、西治”的生态水网建设，营造河湖清澈、绿树环抱、道路畅通、景观秀美、生态和谐的园林式、生态型邯郸。一是东蓄：在东部沟通滏阳河、民有渠、东风渠、卫河四大骨干渠系，拦蓄地表水、补充地下水、涵养生态水，并实施水、林、路一体化建设，做好水林生态文章。二是中调：实施连通两库“引漳入滏”、恢复高级渠“引水入沁”，将岳城、东武仕两大水库水源调入主城区，为主城区水林生态景观建设提供水源保障。三是西治：在西部山区实施生态水保，搞好中小水库、生态水域和小型集雨设施建设，涵养生态水源。随着南水北调中线工程的实施，为东部水网工程的“东蓄”、“中调”提供了新的供水水源。

生态水网水源配置涉及到水资源、生态环境、社会经济等方面，是一个典型的半结构化、多层次、多目标的水资源系统决策问题。做好水资源系统配置要注重其内部组成要素、外部环境以及协调要素和环境的组织和谐性，充分考虑系统内要素与要素之间、要素与环境之间、环境与环境之间的关系，使水资源系统的整体功能达到最大[1]。

## 3. 模型的建立

### 3.1. 邯郸市东部水网地区供水水源

邯郸市东部水网地区供水水源分两部分，一部分是区域内水源，另一部分为区域外水源。区域内水源主要包括岳城水库水源、东武仕水库水源、地下水水源、污水回用水源等五种供水水源；区域外水源包括南水北调水源、引黄水源和引卫水源。

邯郸市东部水网地区各水源相对位置见图 1。

### 3.2. 子区的划分及水源用户组成

邯郸市东部水网地区供水水源包括中水、地下水、岳城水库、东武仕水库、调水(引黄河水、引卫河水和南水北调工程中线引长江水)。其中,中水、地下水仅可供本区使用,故称为独立水源;其他五种水源均作公共水源处理,可向任意子区供水。用水户分别为生活、生态环境、工业、农业四个用水部门。本次水资源合理配置的计算子区以行政区划划分。

### 3.3. 模型实现目标

模型的建立优先考虑社会、经济和生态环境三大指标。经济效益的指标值用调水带来的净效益表示,即以调水净效益最大为目标;社会效益的指标值用社会各用水户年内缺水量最小来表示,即以缺水量最小为目标;环境效益用“生态环境修复”最大来反映环境效益指标。三个指标中既有越大越好的目标又有越小越好的目标,为了统一目标方向,把经济效益目标、环境效益目标函数前加上负号,三个目标函数都变成了越小越好。

#### 3.3.1. 经济效益目标

反映效益的目标众多,如产值、利润、利润率、社会总产值、国民生产总值和国内生产总值等。对区域层次而言,水质水量优化配置是属于宏观层面的问题,故衡量配置经济效益的指标应从宏观经济指标中选取。同时从资源优化利用的角度看,在追求经济总量的同时,更注重经济效率。本文采用供水带来的直接经济效益来表示区域的经济效益。

$$\min f_1(x) = -\max \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left[ \sum_{i=1}^I (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k a_i^k + \sum_{c=1}^M (b_{cj}^k - c_{cj}^k) x_{cj}^k a_c^k \right] \lambda_j^k \beta_j^k \right\} \quad (2-1)$$

式中:  $x_{ij}^k$ 、 $x_{cj}^k$  分别为独立水源  $i$ 、公共水源  $c$  向  $k$  子区  $j$  用户的供水量(万  $m^3$ );  $b_{ij}^k$ 、 $b_{cj}^k$  分别为独立水源  $i$ 、公共水源  $c$  向  $k$  子区  $j$  用户的单位供水量的效益系数(元/ $m^3$ );  $c_{ij}^k$ 、 $c_{cj}^k$  分别为独立水源  $i$ 、公共水源  $c$  向  $k$  子区  $j$  用

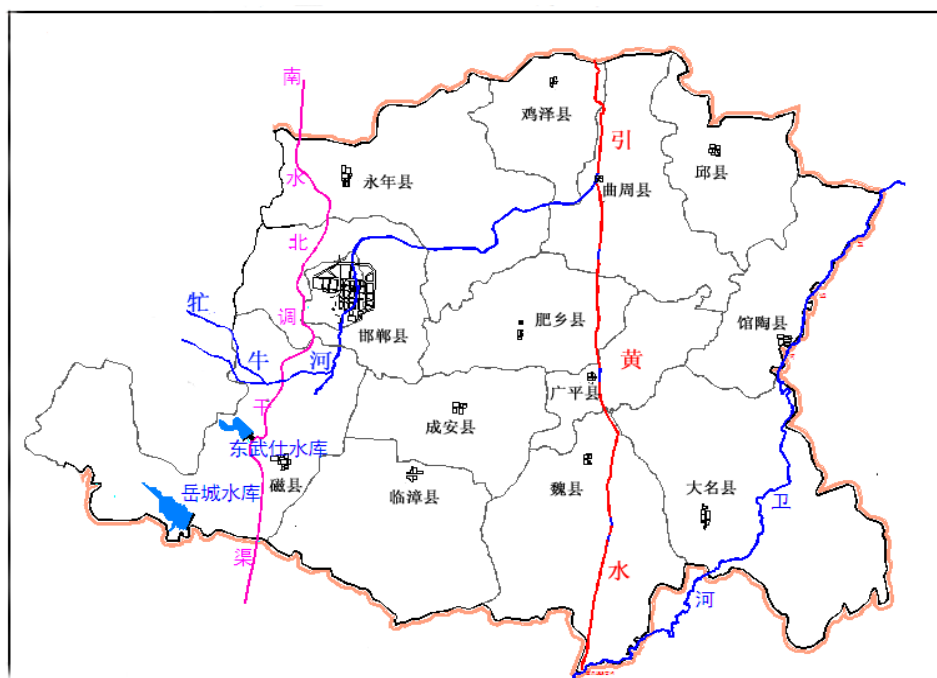


Figure 1. The relative positions of water sources in Handan water area network of eastern region  
图 1. 邯郸东部水网地区各水源相对位置图

户供水费用系数(元/m<sup>3</sup>)； $a_i^k$ 、 $a_c^k$ 分别为 $k$ 子区独立水源 $i$ 、公共水源 $c$ 的供水次序系数； $\lambda_j^k$ 为第 $k$ 子区的第 $i$ 用户的用水公平系数； $\beta_j^k$ 为第 $k$ 子区的权重系数。

### 3.3.2. 社会效益目标

社会目标涉及到社会的方方面面，从社会稳定到全民的生活质量、就业率等内容。一方面，这些指标的经济价值不好度量，因而建立水资源与这些指标的定量关系还很困难。故采用区域水资源缺水率最小来间接反映社会效益这一指标。

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

式中： $D_j^k$ 为 $k$ 子区 $j$ 用户的需水量(万 m<sup>3</sup>)； $x_{ij}^k$ 、 $x_{cj}^k$ 分别为独立水源 $i$ 、公共水源 $c$ 向 $k$ 子区 $j$ 用户的供水量(万 m<sup>3</sup>)。

### 3.3.3. 环境效益目标

水资源优化配置对环境有多方面的影响，如大气环境、土壤植被、水环境等。但从水资源配置方面考虑，影响最大的方面依然是水环境。“环境效益”指标，通常以废水排放量大小来概化。为充分反应区域调水对生态环境的影响程度，用供水水源的水质控制环境效益，因为在水量同等机会的条件下(社会效益目标中已控制了水量)，水质质量的优劣直接影响着受水区水环境质量，进而对区域性水环境修复起着决定作用。考虑到引水水质与废水排放指标影响不大，本文改变了环境效益指标表示方法。引入“生态环境修复”指标控制环境效益。

通过概化系数用生态环境修复最大来反映环境效益指标。

$$\min f_3(x) = -\max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[ d_{ij}^k \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + d_{cj}^k \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right] \quad (2-3)$$

式中： $d_{ij}^k$ 、 $d_{cj}^k$ 为独立水源 $i$ 、公共水源 $c$ 向 $k$ 子区 $j$ 用户的生态环境修复系数； $x_{ij}^k$ 、 $x_{cj}^k$ 分别为独立水源 $i$ 、公共水源 $c$ 向 $k$ 子区 $j$ 用户的供水量(万 m<sup>3</sup>)。

## 3.4. 模型约束条件

约束条件从两方面入手，一是从水资源优化配置系统的各个环节分别进行分析，二是从社会、经济、生态环境的协调方面进行分析。

### 3.4.1. 供水系统的供水能力约束

$$\text{公共水源} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{cj}^k \leq W_c \quad (2-4)$$

$$\sum_{k=1}^K W_c^k \leq W_c \quad (2-5)$$

$$\text{独立水源} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ij}^k \leq W_i^k \quad (2-6)$$

式中： $x_{cj}^k$ 为公共水源 $c$ 供给 $k$ 子区 $j$ 用户的水量，单位万 m<sup>3</sup>； $W_c$ 为公共水源 $c$ 的可供水量，单位万 m<sup>3</sup>； $x_{ij}^k$ 为独立水源 $i$ 供给 $k$ 子区 $j$ 用户的水量，单位万 m<sup>3</sup>； $W_i^k$ 为 $k$ 子区独立水源 $i$ 的可供水量，单位万 m<sup>3</sup>。

### 3.4.2. 供水水质约束

$$d_j^k \geq q \quad (2-7)$$

式中： $q$  为水源供水水质类别， $d_j^k$  为  $k$  子区  $j$  用户的用水水质类别。质量标准以《地表水环境质量标准》GB3838-2002 为参比，水质质量共分五类，类别越小水质质量越优。

### 3.4.3. 输水系统的输水能力约束

$$\text{公共水源 } x_{cj}^k \leq Q_{c\max}^k \quad (2-8)$$

$$\text{独立水源 } x_{ij}^k \leq Q_{i\max}^k \quad (2-9)$$

式中： $Q_{c\max}^k$  为公共水源  $c$  供给  $k$  子区的最大输水能力，单位万  $m^3$ ； $Q_{i\max}^k$  为独立水源  $i$  供给  $k$  子区的最大输水能力，单位万  $m^3$ 。

### 3.4.4. 用水系统的供需变化约束

$$D_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \leq D_{j\max}^k \quad (2-10)$$

式中： $D_{j\min}^k$  为  $k$  子区  $j$  用户的最小需水量，单位万  $m^3$ ； $D_{j\max}^k$  为  $k$  子区  $j$  用户的最大需水量，单位万  $m^3$ 。

### 3.4.5. 区域发展协调约束

根据可持续发展的原则，水资源配置区域的社会、经济、资源、环境的协调、持续发展为第一目标，区域的社会经济发展应该在资源和环境所允许的范围内运行，其发展速度和规模应与水资源、环境的承载能力相适应。本模型中使用“区域协调发展指数”来度量资源与经济、社会的协调程度。该指数用来度量区域内社会、经济、资源、环境的协调程度。它包括水资源利用与区域经济协调的协调，经济发展与水环境质量改善的协调两个方面。协调程度是一个模糊概念，可用模糊数学中的隶属函数表示这两方面的协调度，即：

$$\mu = \sqrt{\mu_{B1}(\sigma_1)\mu_{B2}(\sigma_2)} \geq \mu^* \quad (2-11)$$

式中： $\mu$ 、 $\mu^*$  分别为区域协调发展指数及其最低值； $\mu_{B1}(\sigma_1)$  表示水资源利用与区域经济协调的协调度； $\mu_{B2}(\sigma_2)$  表示区域经济发展与环境改善之间的协调度。

由于各部门的需水量在一定程度上间接反映了经济的发展程度，所以，水资源利用与经济协调的比值  $\sigma_1$ ，此处可看作是所有用水部门的供水量与需水量之和的比。区域水资源利用与经济协调的比值  $\sigma_1$  取为各子区比值的加权和。

$$\text{子区: } \sigma_1^k = \frac{\sum_{j=1}^{J(k)} \left[ \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right]}{\sum_{j=1}^{J(k)} D_j^k} \quad (2-12)$$

$$\text{全区: } \sigma_1 = \sum_{k=1}^K W_k \sigma_1^k \quad (2-13)$$

取隶属函数：

$$\mu_{B1}(\sigma_1) = \begin{cases} 1.0 & \sigma_1 \geq \sigma_1^* \\ \exp(-4(\sigma_1 - \sigma_1^*)) & \sigma_1 < \sigma_1^* \end{cases} \quad (2-14)$$

式中： $\sigma_1^k$ 、 $\sigma_1$  分别为  $k$  子区和整个区域的水资源利用与经济协调的比值(供需水量比值)； $\sigma_1^*$  为区域水资源利用与经济协调的最佳比值，本文取 1.0； $B1$  为水资源利用与经济协调的模糊子集，隶属函数  $\mu_{B1}(\sigma_1)$  表示资源与经济的协调度。同理，以  $B2$  为经济发展与环境改善相协调的模糊子集， $\mu_{B2}(\sigma_2)$  为区域经济发展与环境改

善之间的协调度。 $\sigma_2$ 为区域经济发展与经济改善程度的比值。

$$\text{子区: } \sigma_2^k = \frac{E^k/E_0^k}{f^k/f_0^k} \quad (2-15)$$

$$\text{全区: } \sigma_2 = \sum W_k * \sigma_2^k \quad (2-16)$$

隶属度函数:

$$\mu_{B2}(\sigma_2) = \exp\left[-4(\sigma_2 - \sigma_2^*)^2\right] \quad (2-17)$$

式中： $\sigma_2^*$ 为区域经济发展与环境改善程度的最佳比值，视具体情况而定，本文取 1.0； $E_0^k$ 、 $E^k$ 分别为基准年和规划水平年  $k$  子区的经济学指标(人均 GDP、人均纯收入等)； $f_0^k$ 、 $f^k$ 分别为基准年和规划水平年  $k$  子区的水质质量指标。对于表示协调度的隶属函数  $\mu_{B1}(\sigma_1)$ 、 $\mu_{B2}(\sigma_2)$ ，采用的是指数函数，视情况可选用模糊统计法、德尔菲法、极值统计法等。最后，将上述水资源利用与区域经济发展、经济发展与水环境质量改善这两方面的协调度聚合在一起，构成区域协调发展指数  $\mu$ ：

$$\mu = \mu_{B1}(\sigma_1)^{r_1} * \mu_{B2}(\sigma_2)^{r_2} \quad (2-18)$$

式中： $r_1$ 、 $r_2$ 分别是给定  $\mu_{B1}(\sigma_1)$  和  $\mu_{B2}(\sigma_2)$  的一个指数权重，根据其重要程度给  $r_1$ 、 $r_2$  赋值，通常取  $r_1 = r_2 = 0.5$  即：

$$\mu = \sqrt{\mu_{B1}(\sigma_1) * \mu_{B2}(\sigma_2)} \quad (2-19)$$

### 3.4.6. 变量非负约束

$$x_{ij}^k, x_{cj}^k \geq 0 \quad (2-20)$$

## 4. 水资源优化配置模型的求解

### 4.1. 多目标优化方法的引进

水资源多目标优化配置模型具有多目标、多约束、多关联、非线性的特点，是一个规模庞大、结构复杂、影响因素众多的大系统多目标模型。

多目标优化问题有多种解法，本文采用目标达到法的改进法。利用目标达到法来求解多目标规划问题通常指，已知目标函数系列为  $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\}$ ，对应有其目标值系列  $F^* = \{f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*\}$ 。允许目标函数有正负偏差，偏差的大小由加权系数向量  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  控制，于是目标达到问题就可以表达为标准的最优问题：

$$\begin{aligned} & \min_{x \in R, x \in \Omega} \gamma \\ & \text{sub. } f_i(x) - w_i \gamma \leq f_i^* \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (3-1)$$

指定目标  $\{F_1^*, F_2^*, F_3^*\}$ ，定义目标点  $P$ 。权重向量定义从  $P$  到可行域空间  $\Lambda(\gamma)$  的搜索方向，优化过程中， $\gamma$  的变化改变可行域的大小，约束边界变为唯一解点  $F_{1s}$ 、 $F_{2s}$ 、 $F_{3s}$ 。

目标达到法的最大好处是可以将多目标最优化问题转化为非线性规划问题，但是，在序列二次规划(SQP)过程中，一维搜索的目标函数选择不是一件容易的事情，因为很多情况下，很难决定是使目标函数变大好还是变小好。这就导致目标达到法改进的提出，可以通过将目标达到问题变为最大最小化问题来获得更合适的目标函数。

$$\min_{x \in R^*} \max_i \{\Lambda_i\} \quad (3-2)$$



式中,  $\Lambda_i = \frac{F_i(x) - F_i^*}{W_i}, i = 1, \dots, m$ 。

在 Matlab 优化工具箱中, 函数 *fgoalattain* 实现了上述改进, 使得多目标优化算法更具有稳定性。

### 4.2. 相关函数介绍

水资源多目标优化配置模型具有多目标、多约束、多关联、非线性的特点, 是一个规模庞大、结构复杂、影响因素众多的大系统多目标模型。多目标优化问题有多种解法, 本文采用目标达到法的改进法, 即 Matlab 中的 *fgoalattain* 函数。

Matlab 包含很多工具箱, 携带大量的函数, 主要用来扩充 Matlab 的数值计算、符号运算、图形建模仿真等功能, 可供用户选择使用, 减少了编程任务量。*fgoalattain* 函数, 即存在于优化工具箱, 功能在于求解多目标优化问题, 其数学模型如下[2]-[11]:

$$s.t. \begin{cases} f(x) - weight \cdot \gamma \leq goal \\ c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (3-3)$$

上式中,  $x$ 、 $weight$ 、 $goal$ 、 $b$ 、 $beq$ 、 $lb$ 、 $ub$  为向量;  $A$  和  $Aeq$  为矩阵;  $c(x)$ 、 $ceq(x)$  和  $f(x)$  为函数和返回向量, 可以是非线性函数。

在 Matlab 优化工具箱中, 函数 *fgoalattain* 的调用格式如下:

$[x, fval] = fgoalattain(fun, x0, goal, weight, A, b, Aeq, beq, lb, ub, c, ceq)$

各参数含义如下:

*fun*: 代表要优化的目标函数, 返回在  $x$  点处的向量值  $f$ ;

$x0$ : 代表优化搜索的起始点;

*goal*: 代表函数 *fun* 要达到的目标值, 是一个向量, 它的维数大小等于目标函数 *fun* 返回向量  $f$  的维数大小, *fgoalattain* 的优化过程就是使得  $f$  逼近 *goal*;

*weight*: 代表给定的权值向量, 用于控制目标逼近过程的步长;

*fval*: 返回目标函数在最优解  $x$  点处的函数值。

本文采用 *fgoalattain* 函数, 依据模型的相应约束条件, 针对三个目标函数不断迭代, 从而求得最优解。

### 4.3. 数学模型

由上述的目标函数和约束条件组合构成水资源合理配置模型, 该模型是一个复杂的多目标多水源多用户的优化模型。模型如下:

$$F(x) = \min [f_1(x), f_2(x), f_3(x)] = \left\{ \begin{array}{l} -\max \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left[ \sum_{i=1}^I (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k + \sum_{c=1}^M (b_{cj}^k - c_{cj}^k) x_{cj}^k \alpha_c^k \right] \lambda_j^k \beta_j^k \right\} \\ \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left[ D_j^k - \left( \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right) \right] \right\} \\ -\max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left[ d_{ij}^k \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + d_{cj}^k \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right] \end{array} \right.$$

$$\begin{cases}
 \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq W_c^k, \sum_{k=1}^K W_c^k \leq W_c, \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ij}^k \leq W_i^k \\
 d_j^k \geq q_c \\
 x_{cj}^k \leq Q_{c \max}^k, x_{ij}^k \leq Q_{i \max}^k \\
 D_{j \min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{ij}^k \leq D_{j \max}^k \\
 \mu = \sqrt{\mu_{B1}(\sigma_1) \mu_{B2}(\sigma_2)} \geq \mu^* \\
 x_{ij}^k, x_{cj}^k \geq 0
 \end{cases} \quad (3-4)$$

式中各符号意义同上。

#### 4.4. 模型参数确定

##### (1) 效益系数 $b$

由于资料不足,本文采用规划水平年工业用水定额的倒数,即每耗用单位水量生成的产值,单位为万元/m<sup>3</sup>。2015、2020年工业用水定额分别为7.5 m<sup>3</sup>/万元、7.0 m<sup>3</sup>/万元。

生活、环境及公共施用水的效益是间接而复杂的,不仅有经济效益,同时又有社会效益。根据生活和环境用水优先配置的原则,计算时赋予了较大权重的系数,即500元/m<sup>3</sup>,以体现民生和生态环境保护的重要性。

农业用水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。由于资料缺乏,本文借用衡水市农业用水效益系数[12],确定2015、2020年农业用水效益系数分别为5元/m<sup>3</sup>、7.5元/m<sup>3</sup>。

##### (2) 费用系数 $c$

由水厂取水的用户以水价作为其费用系数;由自备井取水的用户以水资源费、污水处理费和取水成本之和作为其费用系数;由水利工程取水的用户以水资源费、污水处理费和输水成本之和作为其费用系数;农业用水的费用系数以水费征收标准选取。

##### (3) 用水户的用水公平系数 $\lambda$

用水户的用水次序是先满足生活和生态环境用水,在此基础上再满足工业用水、农业用水。以  $n_j^k$  作为  $k$  子区用水户  $j$  用水次序序号,  $n_{\max}^k$  为  $k$  子区用水次序序号的最大值,则  $\lambda_j^k$  可由(3-5)式确定。

$$\lambda_j^k = \frac{1 + n_{\max}^k - n_j^k}{\sum_{j=1}^{J(k)} (1 + n_{\max}^k - n_j^k)} \quad (3-5)$$

故生活用水、环境用水、工业用水和农业用水的公平系数分别为0.4、0.3、0.2、0.1。

##### (4) 各水源的供水次序系数 $a$

根据各水源的特性,模型优先使用中水,其次是水库水和外调水,最后使用地下水。同时考虑水源的输水距离不同,对于不同子区,输水成本出现差异。输水距离越远,输水成本越高,故对于不同子区而言,各水源的供水次序有所不同。各水源针对不同子区的供水次序系数采用公式(3-5)进行计算,结果见表1。

##### (5) 各子区的权重系数 $\beta$ 。

子区权重系数  $\beta_k$  表示  $k$  子区对整个区域而言的重要性程度。目标权重系数  $w_k$  表示第  $k$  个子区对其他子区而言的重要性程度。

本文采用二元对比法,确定子区权重系数,见表2。

##### (6) 生态环境修复系数 $d$ 。

“生态环境修复系数”用水质类别概化,取值如表3。



## 5. 模型计算结果

根据上述模型及其求解方法，计算出 2015 水平年和 2020 水平年丰、平、枯水年邯郸市区域内水资源优化配置结果，详见表 4~5。

由表 4 可知，2015 丰水年、平水年、枯水年各水源供水总量分别为 13.99、16.03、16.90 亿  $m^3$ ，依次增大；2020 丰水年、平水年、枯水年各水源供水总量分别为 19.28、17.50、18.39 亿  $m^3$ ，较 2015 年有所增加。就总的

**Table 1. Water supply order coefficient in Handan City**

**表 1. 邯郸市各水源供水次序系数**

子区	中水	地下水	岳城水库	东武仕水库	牯牛河	卫河水	引黄	南水北调
邯郸市区	0.22	0.03	0.11	0.14	0.17	0.08	0.06	0.19
邯郸县	0.22	0.03	0.11	0.14	0.17	0.08	0.06	0.19
磁县	0.22	0.03	0.14	0.11	0.17	0.08	0.06	0.19
永年县	0.22	0.03	0.08	0.11	0.17	0.06	0.14	0.19
临漳县	0.22	0.03	0.14	0.17	0.06	0.08	0.11	0.19
成安县	0.22	0.03	0.08	0.11	0.14	0.06	0.19	0.17
肥乡县	0.22	0.03	0.08	0.11	0.14	0.06	0.19	0.17
广平县	0.22	0.03	0.06	0.08	0.11	0.17	0.19	0.14
鸡泽县	0.22	0.03	0.08	0.11	0.14	0.06	0.19	0.17
曲周县	0.22	0.03	0.06	0.08	0.11	0.14	0.19	0.17
邱县	0.22	0.03	0.06	0.08	0.11	0.17	0.19	0.14
魏县	0.22	0.03	0.08	0.11	0.06	0.17	0.19	0.14
大名县	0.22	0.03	0.08	0.11	0.06	0.19	0.17	0.14
馆陶县	0.22	0.03	0.06	0.08	0.11	0.19	0.17	0.14

**Table 2. Weighting factor of the promoter region in Handan City**

**表 2. 邯郸市各子区权重系数**

子区	$\beta$	子区	$\beta$
邯郸市区	0.171	广平县	0.011
邯郸县	0.043	鸡泽县	0.011
磁县	0.092	曲周县	0.043
永年县	0.151	邱县	0.007
临漳县	0.073	魏县	0.145
成安县	0.037	大名县	0.140
肥乡县	0.030	馆陶县	0.045

**Table 3. Environmental remediation coefficient generalization**

**表 3. 生态环境修复系数概化表**

水质类别	I	II	III	IV	V	劣 V
环境系数	1	1	0.7	0.5	0.3	0

**Table 4. Various sources of water use during the different hydrological years**  
**表 4. 不同水平年条件下各水源的用水情况**

配置方案	水源	可供水量(万 m <sup>3</sup> )		用水量(万 m <sup>3</sup> )		剩余量(万 m <sup>3</sup> )		利用率(%)	
		2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
丰水年	中水	14782.00	36499.50	7722.97	16087.09	7059.03	20412.41	52.25	44.07
	地下水	78467.00	78467.00	18979.56	23044.74	59487.44	55422.26	24.19	29.37
	岳城水库	83193.00	83193.00	38376.58	40272.24	44816.42	42920.76	46.13	48.41
	东武仕水库	34203.90	34203.90	34203.90	33710.36	0.00	493.54	100.00	98.56
	牯牛河	3944.70	3944.70	3944.70	3944.70	0.00	0.00	100.00	100.00
	卫河	65676.00	65676.00	1407.82	18706.13	64268.18	46969.87	2.14	28.48
	引黄	22000.00	22000.00	22000.00	21981.45	0.00	18.55	100.00	99.92
	南水北调	35202.00	35202.00	13267.80	35080.03	21934.20	121.97	37.69	99.65
	合计	337468.60	359186.10	139903.33	192826.73	197565.27	166359.37	41.46	53.68
平水年	中水	14782.00	36499.50	13450.57	14967.87	1331.43	21531.63	90.99	41.01
	地下水	78467.00	78467.00	20204.83	22094.55	58262.17	56372.45	25.75	28.16
	岳城水库	34038.00	34038.00	34038.00	34037.98	0.00	0.02	100.00	100.00
	东武仕水库	26555.40	26555.40	26555.40	26555.40	0.00	0.00	100.00	100.00
	牯牛河	2757.40	2757.40	2757.40	2757.40	0.00	0.00	100.00	100.00
	卫河	39915.00	39915.00	6166.60	17376.38	33748.40	22538.62	15.45	43.53
	引黄	22000.00	22000.00	22000.00	22000.00	0.00	0.00	100.00	100.00
	南水北调	35202.00	35202.00	35173.73	35201.98	28.27	0.02	99.92	100.00
	合计	253716.80	275434.30	160346.53	174991.55	93370.27	100442.75	63.20	63.53
枯水年	中水	14782.00	36499.50	14617.83	23293.69	164.17	13205.81	98.89	63.82
	地下水	78467.00	78467.00	55270.46	39518.14	23196.54	38948.86	70.44	50.36
	岳城水库	14299.00	14299.00	14299.00	14299.00	0.00	0.00	100.00	100.00
	东武仕水库	19864.10	19864.10	19864.10	19864.10	0.00	0.00	100.00	100.00
	牯牛河	2011.50	2011.50	2011.50	2011.50	0.00	0.00	100.00	100.00
	卫河	27688.00	27688.00	5710.65	27688.00	21977.35	0.00	20.62	100.00
	引黄	22000.00	22000.00	22000.00	22000.00	0.00	0.00	100.00	100.00
	南水北调	35202.00	35202.00	35202.00	35202.00	0.00	0.00	100.00	100.00
	合计	214313.60	236031.10	168975.54	183876.43	45338.06	52154.67	78.84	77.90

利用率而言，除丰水年外，2015 年与 2020 年没有明显差别，同一水平年条件下，利用率相差不超过 1%。丰、平、枯水年条件下利用率依次增大，2015 丰水年可供水量利用率仅为 41.46%，枯水年达到了 78.84%，2020 年亦由 53.68% 增大至 77.90%。

由表 4 可知，进行优化配置后，各水源水量利用率有明显差别。利用率最大的为引黄水、牯牛河、东武仕水库三种水源，多数水平年均达到了 100%；南水北调水源于 2015 丰水年利用率为 37.69%，于其他水平年均接近或达到了 100%，利用率颇高；丰水年岳城水库水源利用率仅为 45% 左右，不足一半，但在平水年、枯水年利用率大幅提高，增加至 100%。

**Table 5. Regional water resources optimal configuration**  
**表 5. 区域水资源优化配置结果**

配置方案	用水户	需水量(万 m <sup>3</sup> )		供水量(万 m <sup>3</sup> )		缺水量(万 m <sup>3</sup> )		缺水率(%)	
		2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
丰水年	生活	82759.8	87895.4	82759.8	87895.4	0.0	0.0	0.00	0.00
	环境	2702.8	2861.3	2702.8	2861.3	0.0	0.0	0.00	0.00
	工业	34588.5	44230.2	31129.8	44220.2	3458.7	10.0	10.00	0.02
	农业	58018.0	58789.7	23310.7	57850.4	34707.3	939.2	59.82	1.60
	合计	178069.1	193776.0	139903.3	192826.7	38165.8	949.2	21.43	0.49
平水年	生活	82759.8	87895.4	82759.8	87895.4	0.0	0.0	0.00	0.00
	环境	2702.8	2861.3	2702.8	2861.3	0.0	0.0	0.00	0.00
	工业	34588.5	44230.2	31230.7	39807.2	3357.8	4423.0	9.71	10.00
	农业	108648.0	110093.0	43653.0	44428.3	64995.0	65664.7	59.82	59.64
	合计	228699.1	245079.3	160346.5	174991.6	68352.6	70087.7	29.89	28.60
枯水年	生活	82759.8	87895.4	82759.8	87895.4	0.0	0.0	0.00	0.00
	环境	2702.8	2861.3	2702.8	2861.3	0.0	0.0	0.00	0.00
	工业	34588.5	44230.2	31129.8	39807.2	3458.7	4423.0	10.00	10.00
	农业	130376.0	132110.0	52382.9	53313.2	77993.1	78796.9	59.82	59.64
	合计	250427.5	267096.3	168975.5	183876.4	81452.0	83219.9	32.53	31.16

由于卫河水质较差,为 V 类水,为避免输水沿途渗漏污染地下水,限制卫河水的使用,仅供沿途县市使用,如馆陶县、大名及魏县,故 2015 年卫河水利用率极低;根据国家可持续发展战略思想及邯郸市“十二五”规划,拟定至 2020 年卫河水质有所好转,为 IV 类水,可供各县市调水之用,卫河水利用率大幅提高,至 2020 年枯水年利用率为 100%。

中水可供工业、农业及环境用水,使用中水可有效地节约地表、地下水资源,具有较高的经济效益。模型中结合中水水质,优先使用中水。2015 年丰水年中水利用率为 52.25%,平水年与枯水年均达到了 90% 以上;2020 年中水利用率有所下降,在 40%~65% 之间。

根据当地地下水资源现状及限采政策,模型中降低地下水供水次序。地下水水源利用率相对最低,丰水年、平水年的地下水利用率不超过 30%,有效地降低了地下水资源开采程度;枯水年当地地表水资源来水量减少,故地下水资源供水量增大,但也仅为 50%。

由表 5 可知,2015 年丰水年、平水年、枯水年缺水率分别为 21.43%、29.89%、32.53%。随着水污染治理工程不断实施,卫河水质将有所改善,供水量明显增大,2020 年丰水年、平水年、枯水年缺水率分别为 0.49%、28.60%、31.16%,略小于 2015 年。

其中,生活用水与环境得到了充分供给,缺水率为 0%。2020 年丰水年条件下工业缺水率 0.02%,其他水平年工业缺水率维持在 10% 左右。2020 年丰水年条件下农业供水充分,缺水率仅为 1.60%,其他水平年农业用水缺水率相似,约为 59%。

## 6. 结论

(1) 在邯郸东部水网地区建立了基于生态水网的水资源优化配置模型以解决水资源、社会经济、生态环境复杂大系统的水资源配置问题,为该地区水量分配提供了一种科学严谨的计算方法,对北方平原水网地区水资源

配置问题研究具有深远意义, 也为其他区域建立优化配置模型提供了参考依据。

(2) 本模型提出了分质供水, 水量与水质结合, 针对用水户水质要求, 提供不同水质水源, 避免优质水“低用”, 避免劣质水污染输水沿途地下水。

(3) 本模型提高了中水供水次序, 降低了地下水供水次序, 从而提高了中水利用率, 减少了地下水开采量, 提高水资源利用效率, 发挥中水利用效益, 有效地保护了地下水。

(4) 未来需对邯郸东部水网地区多目标概化图及水源逐月来水情况进行进一步细化, 使模型更加符合该地区的实际情况, 以提高计算结果的精度。

## 参考文献 (References)

- [1] 王济干, 张婕, 董增川. 水资源配置的和谐性分析[J]. 河海大学学报, 2003, 31(6): 702-705.  
WANG Jigan, ZHANG Jie and DONG Zengchuan. Harmonious analysis of water allocation. Journal of Hohai University, 2003, 31(6): 702-705. (in Chinese)
- [2] 唐德善. 水资源综合规划[M]. 江西: 江西高校出版社, 2001: 12-23.  
TANG Deshan. Integrated water resources planning. Jiangxi: Jiangxi College Press, 2001: 12-23. (in Chinese)
- [3] 全国水资源综合规划技术细则[S]. 水利部水利水电规划设计总院, 2002.  
Technical Details of National IWRM Planning. Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2002. (in Chinese)
- [4] 许新宜. 浅谈水资源的承载能力与合理配置[J]. 中国水利, 2012, (10): 42-44.  
XU Xinyi. Discussion on carrying capacity and rational allocation of water resources. China Water Conservancy, 2012, (10): 42-44. (in Chinese)
- [5] 卢冰. 桂林市水资源优化配置研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 35-64.  
LU Bing. Optimal allocation of water resources in Guilin. Wuhan: Wuhan University, 2005: 35-64. (in Chinese)
- [6] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 36-39.  
CHEN Guoliang, WANG Xufa and ZHUANG Zhenquan. Genetic algorithm and its application. Beijing: Defense Industry Press, 2001: 36-39. (in Chinese)
- [7] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 5-11.  
WANG Ling. Job Shop Scheduling and its Genetic Algorithms. Beijing: Press of Tsinghua University, 2003: 5-11. (in Chinese)
- [8] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 10-16.  
WANG Ling. Intelligent Optimization algorithm and its application. Beijing: Press of Tsinghua University, 2001: 10-16. (in Chinese)
- [9] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 12-38.  
ZHENG Jinhua. Multi-objective evolutionary algorithm and its application. Beijing: Science Press, 2007: 12-38. (in Chinese)
- [10] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 6-9.  
CUI Xunxue. Multi-objective evolutionary algorithm and its application. Beijing: Defense Industry Press, 2006: 6-9. (in Chinese)
- [11] 高尚, 杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京: 中国水利出版社, 2006: 5-12.  
GAO Shang, YANG Jingyu. Swarm intelligence algorithm and its application. Beijing: Press of China Water Conservancy, 2006: 5-12. (in Chinese)
- [12] 赵坤. 基于可持续发展的衡水市水资源优化配置研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
ZHAO Kun. Optimal allocation of water resources of Hengshui City based on the sustainable development. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)