

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0028

高黎明,陈华伟,李福林. 基于水量水质双控的缺水地区水资源优化配置[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):70-78. GAO L M, CHEN H W, LI F L. Optimal allocation of water resources in water-scarce areas based on dual control of water quantity and quality[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 70-78. (in Chinese)

# 基于水量水质双控的缺水地区水资源优化配置

高黎明<sup>1,2</sup>, 陈华伟<sup>2,3</sup>, 李福林<sup>2,3</sup>

(1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250014;  
3. 山东省水资源与水环境重点实验室, 济南 250014)

**摘要:**开展水量水质双控约束下水资源优化配置研究是落实新时期“节水优先”方针、保障区域水安全和促进水资源可持续利用的基础支撑。针对我国北方地区资源型缺水、工程型缺水并存的问题,以山东省昌乐县为例,结合 WEAP 模型与传统水资源配置理论方法,根据区域用水需求与总量控制及水功能区限制纳污管控要求,统筹协调生活、生产、生态用水,建立基于水量水质双控的区域水资源优化配置模型,采用 AHP 法、熵权法、AHP-熵权耦合法计算不同情景方案的配置效益并优选配置方案。结果表明:规划水平年农业、城市供水保证率分别为 50%、95% 时,基于用水总量控制的跨流域调水、强化行业节水和水污染治理以及加大再生水回用相结合的配置方案(B<sub>1</sub> 方案)综合效益最大,各行业用水需求均能得到满足,GDP 较现状水平年增加 709.01 亿元,再生水利用率提高至 25%。

**关键词:**水量水质双控;优化配置;WEAP 模型;综合效益;缺水地区

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Optimal allocation of water resources in water-scarce areas based on dual control of water quantity and quality

GAO Liming<sup>1,2</sup>, CHEN Huawei<sup>2,3</sup>, LI Fulin<sup>2,3</sup>

(1. School of Water Conservancy Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China; 3. Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan 250014, China)

**Abstract:** The research on the optimal allocation of water resources under the control of water quality and quantity is the basic support for implementing the policy of "water saving priority" in the new era, ensuring regional water security and promoting the sustainable utilization of water resources. Aiming the coexisting of water shortages in both resources and engineering in North China, Changle County was taken as a case study. The quantity/quality-dual-control-based models for optimal regional allocation of water resources were established by combining a WEAP model with conventional theory and methods for allocation of water resources, according to regional water demand, total quantity control, and pollution control requirements in water functional zones, to coordinate domestic, production, and ecological water usage. Implying AHP, entropy weight method and AHP-entropy weight coupling method, the allocation benefits of plans under different contexts were examined, and the best allocation plan was selected. Results showed that in the future planning years, the guaranteed rate of water supply was 50% and 95%, respectively, for irrigation and urban. The scenario B<sub>1</sub> combining the water resource development based on controlling total water consumption, strengthening water-saving practices in industries, water pollution control, and reusing more reclaimed water, achieved the greatest comprehensive benefits. Compared to the current year, the water demand of all sectors could meet the annual

收稿日期:2019-04-25 修回日期:2019-08-23 网络出版时间:2019-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190829.1351.004.html>

基金项目: 国家国际科技合作专项(2012DFG22140); 山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201703)

作者简介: 高黎明(1994—), 女, 山东枣庄人, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: 1140984269@qq.com

通信作者: 陈华伟(1979—), 女, 山东临朐人, 工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: chenhuawei8036@163.com

GDP increased by 70.901 billion yuan and the utilization rate of the reclaimed wastewater accounted for 25%.

**Key words:** dual-control of water quantity and quality; optimal deployment; WEAP; comprehensive benefits; water-shortage area

我国水资源时空分布极不均匀,水资源短缺和水环境恶化问题严重影响了经济社会的可持续发展<sup>[1]</sup>,以水量为主的水资源配置难以协调区域发展和水环境可承载能力之间的平衡关系<sup>[2-3]</sup>。为有效缓解区域水资源消耗强度大、污染物排放总量大、水功能区达标率低等问题,基于水量水质双控的水资源优化配置已成为现阶段强化水资源调控利用的必要手段<sup>[4-5]</sup>。

基于水量水质双控的水资源优化配置主要是从资源、生态、环境、经济社会等方面对区域水资源和水环境进行量化管理<sup>[6]</sup>,研究方法主要包括:基于MATLAB建立的涵盖污染物指标因子的水量水质数学模型法<sup>[7]</sup>、利用改进的“三次平衡”进行污染物总量控制分配法<sup>[8]</sup>以及多目标分析模型优化法<sup>[9]</sup>等。近年来,斯德哥尔摩环境研究所(SEI)开发的WEAP模型在水资源优化配置领域得以广泛应用, Yang等<sup>[10]</sup>以叶尔羌河流域为研究对象,基于WEAP模型模拟四种不同配置方案,利用综合效益满意度求解最优方案; Gao等<sup>[11]</sup>通过构建WEAP模型评估鄂尔多斯煤炭产业发展规划对区域水资源系统的影响,通过提高灌溉水利用效率、加大污水处理回用等措施实现多水源优化配置;王鹏全等<sup>[12]</sup>利用WEAP软件建立了石羊河流域水量和水质预测模型,模拟不同预案组合下水资源的管理决策,进行需求端管理的策略择优分析。相关研究表明,WEAP模型在水资源管理与战略规划方面具有较大的应用潜力,既可以作为预测工具,模拟未来规划情景下常规水资源的需求、供应以及废污水处理回用等,又可以作为政策分析工具,考虑水资源的多种竞争用途,评估一系列水资源管理决策方案。

本研究以我国北方典型缺水地区山东省昌乐县为计算实例,基于WEAP模型提出了一种基于水量水质双控制的区域水资源优化配置方法,将水质控制目标纳入供需水管理决策,计算不同情景方案的综合效益并优选配置方案,实现水资源配置目标与调控路径的统一,为区域产业结构调整与用水结构调控策略的制定提供技术依据。

## 1 基于水量水质双控的区域水资源优化配置模型

### 1.1 模型基础 WEAP

WEAP (water evaluation and planning sys-

tem),称为水资源评估和规划系统,是一款由供水需求、水质需求和生态系统保护需求驱动的水资源开发的综合模型<sup>[13]</sup>。

WEAP模型出发点是供需分析,需求侧主要基于分层结构对经济社会用水需求进行核算,从而使数据结构兼具高度分类和高度聚合的灵活性特征,一个数据结构由多个用水部门和分区组成,体现了不同区域、工业行业及不同灌溉技术背景下终端用水户的水资源需求特点。供给侧主要考虑地下水、水库、其他水源(区域外调水)、河道汇流的可供水量和配置方案,回归水(例如排放到污水处理厂、水库、河流或回补地下水的废污水)排入河流、地下水或其他供水水源工程都能够增加水源的可供水量<sup>[11,14]</sup>。其应用一般包括以下几个方面:(1)设置时间步长、区域边界和水资源系统结构;(2)需水、水源、供给和处理分析;(3)方案设计(涉及未来规划的政策、成本和技术);(4)水资源分配与供给方案评估。

### 1.2 区域水资源优化配置模型

#### 1.2.1 目标函数

综合效益目标函数如式(1)。

$$\begin{cases} P = w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3 \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P$ 表示综合效益目标; $w_1, w_2, w_3$ 分别表示社会、经济和环境效益的权重值; $p_1, p_2, p_3$ 分别为社会效益目标函数(缺水量)、经济效益目标函数(GDP)以及环境效益目标函数(COD、氨氮排放量)的标准化处理后的值。

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又有所影响,因而采用区域缺水量最小来间接反映<sup>[15]</sup>

$$f_1 = \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left( D_j^\pm - \sum_{i=1}^I x_{ij}^k \right) \right\} \quad (2)$$

式中: $f_1$ 为缺水量,考虑到每个用水分区的用水户均包括生产、生活、生态用水,故整体缺水量 $f_1$ 值越小,水资源优化配置的社会效益越好; $k$ 为所研究区域的分区数; $x_{ij}^k$ 表示 $k$ 子区 $j$ 用户从 $i$ 水源所取的水量( $\text{m}^3$ ); $D_j$ 表示 $j$ 用户的计划需水量,用区间数来表示,其一般形式为 $D_j^\pm = [D_j^-, D_j^+]$ ,其中 $D_j^-$ 表示不确定因素的下限, $D_j^+$ 表示不确定因素的上限; $I, J, K$ 分别表示水源总数、用户总数、分区总数。

以区域供水带来的纯利润最大作为经济效益目标。

$$f_2 = \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \omega_j^k \alpha_{ij}^k (b_{ij}^k - c_{ij}^k) \right\} x_{ij}^k \quad (3)$$

式中:  $f_2$  为供水效益, 用区域 GDP 表示;  $b_{ij}^k$  指收益系数, 表示  $k$  子区  $j$  用户从  $i$  水源单位取水量所产生的效益, 元/ $m^3$ ;  $c_{ij}^k$  指费用系数, 表示  $k$  子区  $j$  用户从  $i$  水源单位取水量所需的费用, 元/ $m^3$ ;  $\omega_j^k$  表示  $k$  子区  $j$  用户的用水公平系数;  $\alpha_{ij}^k$  表示  $k$  子区  $i$  水源的供水次序系数。

环境效益用污染物入河排放总量大小衡量, 污染物排放总量不超过水功能区纳污指标为效益最大化。

$$f_3 = \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I 0.01c_j^k \cdot x_{ij}^k \cdot p_j^k \cdot s \cdot t(1-r) \right\} \quad (4)$$

式中:  $f_3$  为污染物入河排放总量, 其值越小, 表明入河的污染物越少;  $c_j^k$  为  $k$  子区  $j$  用户部门排河重要污染因子的质量浓度, mg/L, 一般可用 COD、氨氮等水质指标来表示;  $p_j^k$  为  $k$  子区  $j$  用户产污系数;  $s$ 、 $t$ 、 $r$  分别为污水收集率、处理率、回用率, %。

### 1.2.2 约束条件

#### 1.2.2.1 可供水量约束

水源  $i$  分配给  $j$  地区的水量之和不能超过其可供水量。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ij}^k \leq W_i \quad (5)$$

式中:  $W_i$  为水源  $i$  的可供水量,  $m^3$ 。

#### 1.2.2.2 部门用水量约束

各水源分配给各地区各用户的水量不能低于该部门的最低用水量, 且不能超过其最大需水量。

$$0 \leq \sum_{i=1}^I x_{ij}^k \leq D_{\max j} \quad (6)$$

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

#### 1.2.2.3 水环境容量约束

排污约束: 污染物排放要符合水功能区管理水质目标, 排放质量浓度不得超过水功能区限制纳污控制管理规定的限值。

达标排放  $C_r \leq C_0$ 。其中:  $C_r$  是污染物  $r$  排放质量浓度, mg/L,  $C_0$  是污染物达标排放质量规定的质量浓度, mg/L。

污染物总量控制

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I 0.01c_j^k \cdot x_{ij}^k \cdot p_j^k \cdot s \cdot t(1-r) \leq W_0 \quad (7)$$

式中:  $W_0$  为  $k$  子区水功能区允许 COD 排放总量上限, t。

#### 1.2.2.4 其他约束

输水能力约束、水库的水位库容约束、变量非负约束等。

### 1.2.3 输出结果标准化

本次研究采用规范化法处理模型输出数据, 计算公式为

$$\text{正向指标 } X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (8)$$

$$\text{负向指标 } X'_{ij} = \frac{\max\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (9)$$

式中:  $\max\{X_{ij}\}$ 、 $\min\{X_{ij}\}$  分别为指标下不同事物中最满意者或最不满意者(越小越满意或越大越满意)。

### 1.2.4 模型优化求解方法

第一步: 根据研究区实际水量关系平衡以及引水、耗水等情况, 将区域水资源系统概化为 WEAP 模型中不同类型的点、线、面, 构建水资源 WEAP 模型。

第二步: 合理设置模型现状基准年到水平规划年的情景方案, 根据资料设置方案的相关参数(包括人口变化、工业增长、污染物治理强度等)表达式, 采用 WEAP 中的水文年法, 预测不同方案下规划年研究区的水资源供需情况和污染物排放量情况。

第三步: 根据 WEAP 模型对研究区规划年水资源供需态势和污染物排放的预测结果, 建立综合效益评价目标函数, 由社会效益、经济效益和环境效益 3 个子函数组成, 考虑到水资源配置方案优选的主观因素和客观因素, 分别利用 AHP 法、熵权法及 AHP-熵权耦合法分析各效益分摊系数, 将指标原始数据采用规范化法处理后计算出各方案的综合效益评价价值, 确定最优方案。

水资源优化配置模型求解流程见图 1。

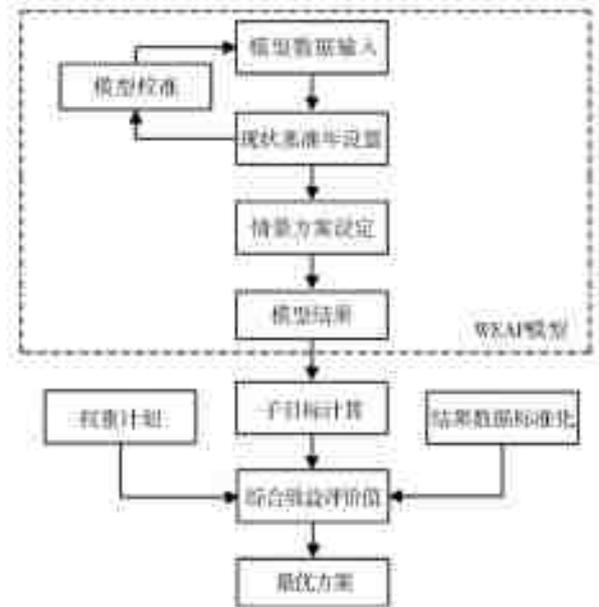


图 1 水资源优化配置模型求解流程

Fig. 1 Solving process of optimal allocation model of water resources

## 2 计算实例

### 2.1 研究区概况及模型概化

昌乐县位于山东半岛中部, 地处泰沂山脉东北麓

与山前平原之间地带,其水资源禀赋先天不足,多年平均降雨量 604.22 mm,水资源总量为17 962万  $\text{m}^3$ ,人均水资源占有量不足全国的 1/7,属严重的资源型缺水地区。目前,农业仍是用水大户且用水占比(52.2%)偏高,用水结构不尽合理;当地地表水资源开发利用(14.86%)偏低,地下水供水量已达控制指标上限(5 130万  $\text{m}^3$ ),再生水等非常规水占总供水量的 6%,利用明显不足;主要污染物 COD、氨氮排放量超出昌乐县水功能区纳污能力指标,水资源的量与质已成为制约其长足发展的

瓶颈。

根据昌乐县区域内水资源调配的实际,基于水源条件及供用水关系,结合行政分区,将水资源系统概化成由河流、水库、地下水单元、引水工程等供水系统及生活、生态、第三产业、第二产业、农业等需求点构成的数字用水需求系统。概化的网络节点包括 9 个地下水单元,3 个水库,45 个需求点,4 个污水处理厂,1 个其他水源(水厂);主线包括 5 条主河流及 1 条客水水源(南水北调)调水渠道,通过输水线路连接各个节点,构成水资源系统概化图,见图 2。



图2 昌乐县 WEAP 模型概化

Fig. 2 WEAP model generalization for Changle County

## 2.2 模型参数分析及验证校正

高崖水库是昌乐县的大(2)型水库及重要饮用水源地,现状昌乐全县的生活、生产、生态用水对其依赖程度较高,是各用水部门的公用水源,出库流量数值的精准度直接影响到分区实际可供水量。在模型中,出库流量按照一定的规则分配至区域、行业及用水户,实现水的空间分配,以验证并确定水源分配结果。以 2010—2015 年高崖水库出库流量调查数

据为输入,在模型输出值与调查实测值进行比较,通过 WEAP 模型参数率定后模拟的高崖水库出流量值与监测站流量实测值对比情况见图 3。

由图 3 可以看出,水库出流量的模拟值与实测值拟合度较高,平均相对误差为 3.75%,小于 4.5%;区域模拟现状年供水量与实际供水量的相对误差为 2.24%,该模型能够模拟分析昌乐县供需平衡状况且具有较高的精度。

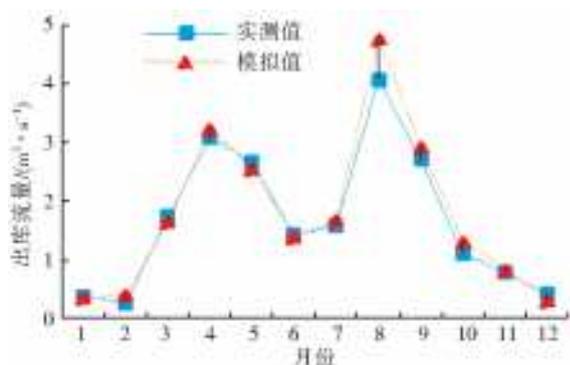


图 3 多年平均高崖水库出库流量曲线

Fig. 3 Yearly average discharge curve of Gaoya Reservoir

### 2.2.1 用水公平系数

在水量有限的情况下,统筹协调生活、生产、生态用水,明确经济社会发展各行业的水资源用途,优先保证生活用水,确保生态基本需水,保障粮食生产合理需水,优化配置生产经营用水。根据水源条件拟定各部门用水的先后次序,参照式(10)计算各部门用水公平系数 $\omega_j$ 。

### 2.2.2 供水次序系数

供水次序系数反映*i*水源相对于其他水源供水的优先程度,现将各水源的供水优先程度转化成 $[0,1]$ 区间上的系数,即供水次序系数 $[\alpha_i]$ 。结合各部门用水需求并考虑各水源的调节能力,坚持优水优用的原则,充分发挥水资源的多种功能,使水资源按用途得到合理开发、高效利用和有效保护,采用式(10)确定昌乐县各水源的供水次序 $\alpha_i$ 。

$$\alpha_i = \frac{1 + n_{\max} - n_i}{\sum_{j=1}^j (1 + n_{\max} - n_j)} \quad (10)$$

式中: $n_i$ 为第*i*水源地向*j*用水户的供水次序序号; $n_{\max}$ 为*i*水源地向用水户供水的供水次序序号最大值,对昌乐县而言, $n_{\max}=5$ 。

### 2.2.3 效益分摊系数

本文分别采用 AHP、熵权法及 AHP-熵权耦合法 $^{[18]}$ 计算社会、经济和环境效益的权重值。其中,层次分析法是从定性分析到定量分析综合集成的多目标决策方法,根据专家经验对各指标重要程度进行排序,构造判断矩阵计算权向量并进行一致性检验,适用于复杂的模糊综合评价系统;熵权法是一种客观性较强的赋权方法,主要是根据数据信息之间的关系来确定权重,但此法确定的权重可能与区域发展的实际情况不一致。因此将主、客观权重方法进行组合,既考虑专家经验判断的主观能动性,又客观反映评价指标的重要性,提高评价的科学性。同时,验证 3 种权重计算方法对于配置方案优选的结

果是否一致。

AHP 法确定的权重值: $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3) = (0.539, 0.297, 0.164)$

熵权法确定的权重值: $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (0.337, 0.338, 0.325)$

AHP-熵权耦合法是将 $\theta_i$ 与 $\omega_i$ 结合起来,权重值为

$$\omega_i^* = \frac{\theta_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^3 (\theta_i \cdot \omega_i)} \quad (11)$$

计算得 $\omega_i^* = (\omega_1^*, \omega_2^*, \omega_3^*) = (0.542, 0.300, 0.158)$ 。

## 2.3 水资源优化配置方案结果分析

### 2.3.1 模型情景方案

根据昌乐县的发展规划,设定人口增长率、各产业增长速率及 WEAP 模型相关参数,模拟 2030 年水资源开发利用情况。根据 WEAP 模型预案的继承特性 $^{[19-20]}$ ,建立多种配置情景方案。

(1)开源蓄引,提高供水能力。当地有较好的水系,建设一定规模小型的蓄、提、引工程,可新增供水量 400 万  $m^3/a$ 。此外,可通过跨区域调水工程开源提高供水能力,规划“引冶入昌供水工程”调引西部客水,将冶源水库水经荆山水库附近调至县城,预计年供水量为 1 825 万  $m^3$ ;通过东部引黄入昌工程,将黄河水调引至城南水厂,调水指标约为 1 825 万  $m^3$ 。

(2)提高用水效率,加强全行业节水。居民用水在适度节水的基础上再节水 7%,如降低管网漏损、普及节水器具等;第二产业用水在适度节水的基础上再节水 9%,万元工业增加值用水量降低至 8.36  $m^3$ ;农田灌溉水有效利用系数由现状的 0.65 提高到 0.8 以上,发展大田喷灌、滴灌、低压管道、短畦灌溉等节水工程,提高灌区农田灌溉保证率。

(3)强化再生水利用,控制污染物排放。污水回用率达到 20%~25%,加大再生水利用量,减少排放量;城北、城西、城东 3 座污水处理厂,主要污染物 COD、氨氮入河质量浓度分别控制在 40、1.5~2.0 mg/L。

将上述水量水质双控方案进行组合,得到 4 种模拟计算方案  $B_1$  至  $B_4$ ,详见表 1。

### 2.3.2 模拟结果分析

本研究主要模拟分析规划水平年 2030 年农业供水保证率为 50%、城市供水保证率为 95%时的配置结果。

社会效益。现状年昌乐县水资源缺水量 3 182 万  $m^3$ ,缺水率为 19.96%。经模拟计算,2030 年 4 种方案缺水率分别为 31.06%、23.30%、9.10%、0%。

表 1 昌乐县水资源系统配置方案集

Tab. 1 Water resources system configuration plan for Changle County

方案集	纳污能力约束	供水			需水		污染物治理	
		基本供水	新增蓄引水工程	引黄工程(按设计能力供水)	适度节水	强化节水	适度处理回用(再生水回用率达 20%)	高度处理回用(再生水回用率达 25%)
方案 A(现状年)	✓	✓			✓		✓	
方案 B <sub>1</sub>	✓	✓			✓		✓	
方案 B <sub>2</sub>	✓	✓			✓	✓		
方案 B <sub>3</sub>	✓	✓	✓			✓		✓
方案 B <sub>4</sub>	✓	✓	✓	✓		✓		✓

开源方案使供水量增加,方案 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 的供水量比方案 B<sub>2</sub> 增加 2 431、4 256 万 m<sup>3</sup>。现状年与规划水平

年,缺水量由小到大的用水部门依次是:生活、生态、生产,其中农业缺水量较大,详见图 4。

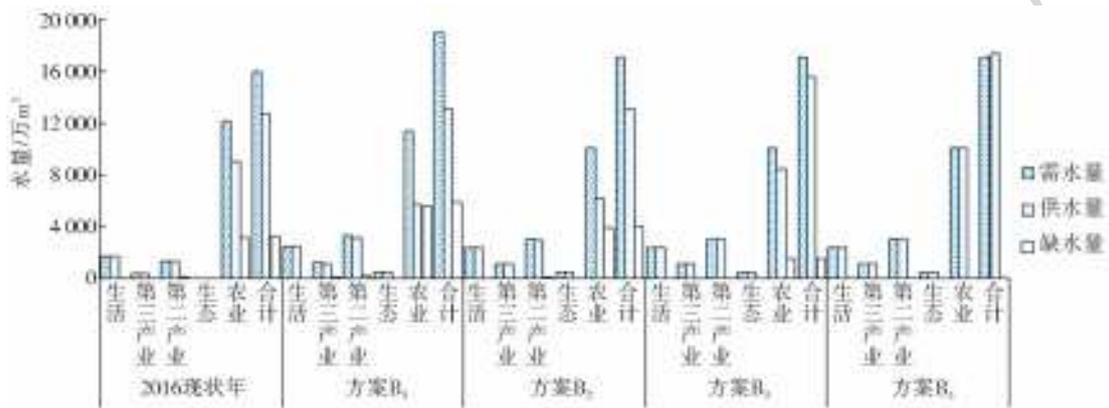


图 4 各方案多年平均供需缺水结果

Fig. 4 Multi-year average supply and demand water shortage results for each program

经济效益。2030 年与 2016 年相比较,三个产业增加值的增幅由小到大依次为:农业、第二产业、第三产业,其中第三产业增速较快,B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 四种方案 GDP 分别较现状年增加 649.72、671.93、693.42、709.01 亿元。与方案 B<sub>1</sub> 相比,强化节水的方案 B<sub>2</sub> 第二产业缺水量减少 114 万 m<sup>3</sup>、经济效益增加 22.21 亿元;与方案 B<sub>2</sub> 相比,方案 B<sub>3</sub> 开源增加供水量 2 356 万 m<sup>3</sup>,第二、三产业均不缺水,农业缺水量减少 2 356 万 m<sup>3</sup>,经济效益增加 21.49 亿元;方案 B<sub>4</sub> 通过调引客水增加区域供水量、加大污水处理回用量,各行业均不缺水,经济效益较现状增幅最大,详见图 5。

理厂处理达标后入河,2016 年再生水利用量为 453 万 m<sup>3</sup>,利用率为 14.5%,主要污染物 COD、氨氮排放超标。到 2030 年,通过新建再生水厂并进行污水处理厂提标改造,方案 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 再生水利用量分别达到 807、827、1 033、1 033 万 m<sup>3</sup>。由于方案 B<sub>2</sub> 采取强化节水,工业、生活供水量减小,产污量随之减小,污染物 COD、氨氮的排放量较 B<sub>1</sub> 削减 49.70、1.86 t;与方案 B<sub>2</sub> 相比,方案 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 再生水利用量增加 207 万 m<sup>3</sup>,污水回用率达 25%,污染物 COD、氨氮排放量分别削减 26.47、0.99 t。结果见图 6—8。

### 2.3.3 模型输出数据标准化处理

根据式(8)、(9)对模型输出结果进行规范化处理,结果见表 2。

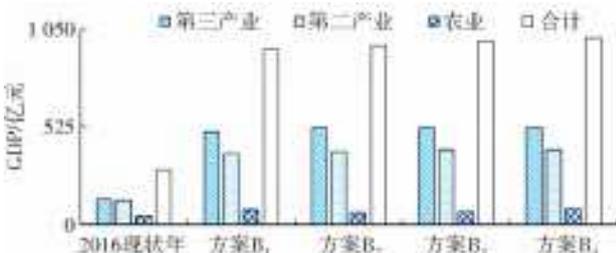


图 5 各方案多年平均经济效益结果

Fig. 5 Multi-year average economic benefit results for each program

环境效益。环境效益主要体现在污染物排放量上,主要是生活、第二、三产业废水产污排至污水处

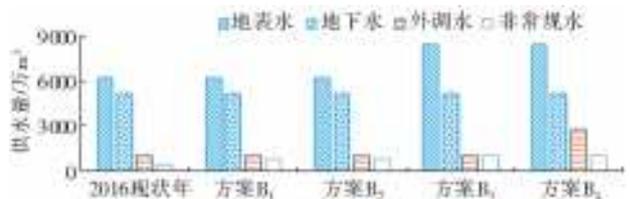


图 6 各方案多年平均供水结构

Fig. 6 Multi-year average water supply structure for each program

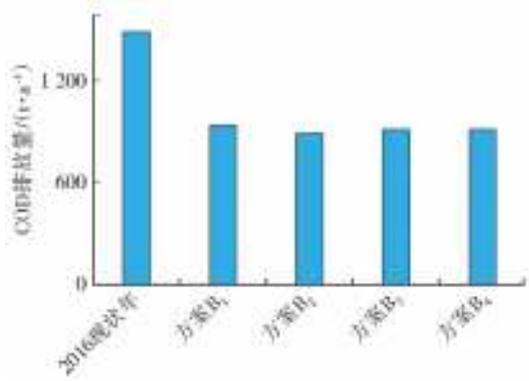


图 7 多年平均 COD 排放量  
Fig. 7 Multi-year average COD emissions

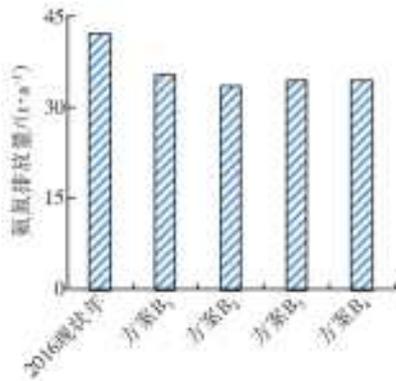


图 8 多年平均氨氮排放量  
Fig. 8 Multi-year average ammonia nitrogen emissions

表 2 WEAP 模型各方案指标数据规范化结果

Tab. 2 Standardization results of index data for each scheme of WEAP model

方案集	缺水量	GDP	COD	氨氮
方案 B <sub>1</sub>	0	0	1	1
方案 B <sub>2</sub>	0.325 20	0.374 6	0	0
方案 B <sub>3</sub>	0.706 92	0.737 1	0.932 8	0.932 8
方案 B <sub>4</sub>	1	1	0.932 8	0.932 8

### 2.4 综合效益分析与方案优选

将 WEAP 模型各方案指标数据规范化结果(表 2)与权重值  $\theta_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\omega_i^*$  代入公式(1),分别计算出方案 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 的综合效益指数,详见表 3。从表 3 中不同方案的结果比较可以看出,AHP 法、熵权法、AHP-熵权耦合法 3 种方法确定的权重值,其方案优选结果一致。2030 规划水平年,方案 B<sub>4</sub> 的综合效益均大于其他 3 种方案,即研究区在开源增量、强化节水和污染物高度治理并回用的方案下综合效益最优。方案 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 综合效益的差距主要源于 B<sub>4</sub> 方案增大黄河水供水量,加之扩大西瓜、蔬菜等高效作物种植比例调整农业种植结构,使得产业经济效益较高,经比较,方案 B<sub>3</sub> 综合效益最优。

表 3 昌乐县水资源系统配置方案效益评估结果  
Tab. 3 Comprehensive benefit evaluation value of each method

方法	方案	社会效益综合值	经济效益综合值	环境效益综合值	综合效益评价	方案优选结果
AHP 法 $\theta_i$	方案 B <sub>1</sub>	0	0	0	0	B <sub>4</sub> > B <sub>3</sub> > B <sub>2</sub> > B <sub>1</sub>
	方案 B <sub>2</sub>	0.175 1	0.111 3	0.164 0	0.450 3	
	方案 B <sub>3</sub>	0.396 9	0.218 9	0.087 4	0.703 2	
	方案 B <sub>4</sub>	0.539 0	0.297 0	0.087 4	0.923 4	
熵权法 $\omega_i$	方案 B <sub>1</sub>	0	0	0	0	B <sub>4</sub> > B <sub>3</sub> > B <sub>2</sub> > B <sub>1</sub>
	方案 B <sub>2</sub>	0.109 5	0.126 7	0.324 6	0.560 8	
	方案 B <sub>3</sub>	0.248 3	0.249 3	0.173 0	0.670 5	
	方案 B <sub>4</sub>	0.337 2	0.338 2	0.173 0	0.848 4	
AHP-熵权耦合法 $\omega_i^*$	方案 B <sub>1</sub>	0	0	0	0	B <sub>4</sub> > B <sub>3</sub> > B <sub>2</sub> > B <sub>1</sub>
	方案 B <sub>2</sub>	0.176 0	0.112 3	0.158 5	0.446 7	
	方案 B <sub>3</sub>	0.398 9	0.220 9	0.084 4	0.704 3	
	方案 B <sub>4</sub>	0.541 8	0.299 7	0.084 4	0.926 0	

### 3 结 论

(1)本次研究将国外先进的 WEAP 模型与传统的水资源配置理论相结合,以区域取水量和污染物排放量为主要对象,建立了一种基于水量水质双控的区域水资源优化模型,计算综合效益并优选配置方案,打破了以往水资源调控仅围绕自然循环中水量平衡的传统配置理念,将水质控制耦合于水循环中进行社会、经济、环境的多维临界调控,实现了水

资源可持续利用。

(2)模型应用于昌乐县水资源优化配置结果表明,在规划水平年 2030 年,随着社会经济的发展,当地水资源条件难以满足区域用水需求,基于用水总量控制的开源手段是解决区域供需矛盾的有效措施。规划年污染物的排放量增加,采取强化节水措施,并加大对污染物排放的控制和再生水的循环利用,保证社会效益、经济效益、环境效益高于平均水平,实现综合效益最大。

(3)模型定参过程中,供水次序的设定充分考虑了当地水资源利用情况以及区域未来发展规划,当地地下水超采严重导致规划年地下水限采时,应改变各类水源的供水先后次序以满足各部门用水需求;效益分摊系数计算采用 AHP 法、熵权法、AHP-熵权耦合均能实现方案优选。目前,WEAP 模型无法精准模拟地表水产汇流过程、精确刻画地下水流场动态变化,今后通过耦合水文过程模拟软件如 SWAT、PRMS 及地下水流数值模拟软件如 MODFLOW、FEFLOW 等,可进一步研究污染物排放对地下水溶质运移过程的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 王浩,游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 265-271. (WANG H, YOU J J. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265-271. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20150484.
- [2] 夏军,翟金良,占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915. (XIA J, ZHAI J L, ZHAN C S. Some reflections on the research and development of water resources in China [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 905-915. (in Chinese)) DOI: 10. 1631/jzus. A1010009.
- [3] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河典型河段水量水质一体化调配模型[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 196-205. (PENG S M, ZHENG X K, WANG Y, et al. Study on integrated allocation and dispatch model of water quality and quantity for the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 196-205. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2016. 02. 004.
- [4] 王建华,何凡. 承载力视域下的水资源消耗总量和强度双控行动认知解析[J]. 中国水利, 2016(23): 34-35. (WANG J H, HE F. Interpretation of double control actions of total water consumption and development intensity with a viewpoint of bearing capacity[J]. China Water Resources, 2016(23): 34-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2016. 23. 023.
- [5] 吴浩云,秦忠. 精细管理促双控量质并重保供水[J]. 中国水利, 2016(13): 14-15. (WU H Y, QING Z. Fine management promotes dual control and maintains water supply [J]. China Water Resources, 2016(13): 14-15. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2016. 13. 009.
- [6] 张守平,魏传江,王浩,等. 流域/区域水量水质联合配置研究 I: 理论方法[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 757-766. (ZHANG S P, WEI C J, WANG H, et al. Basin/region water quality and quantity allocation I Theory and method. [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 757-766. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2014. 07. 001.
- [7] 马海峰,孙淑华,周志轩. 基于水量水质双控制的艾依河补水机制研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 16-19. (MA H F, SUN S H, ZHOU Z X. Research on replenishment mechanisms for the Aiyi River based on the control of water quantity and quality[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(3): 16-19. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2014. 03. 005.
- [8] 张守平,魏传江,王浩,等. 流域/区域水量水质联合配置研究 II: 实例应用[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 938-949. (ZHANG S P, WEI C J, WANG H, et al. Basin/region water quality and quantity allocation II. Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 938-949. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2014. 08. 007.
- [9] 刘丙军,陈晓宏,江涛. 基于水量水质双控制的流域水资源分配模型[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 513-517. (LIU B J, CHEN X H, JIANG T. Water resources allocation model based on the dual-control of water quantity and quality[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 513-517. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn. 1001-6791. 2009. 04. 010.
- [10] YANG M Z, XUE L Q, ZHANG G, et al. Optimized allocation of water resources in Yarkand River basin based on WEAP model[J]. Journal of Hohai University, 2013, 41(6): 493-499. DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2013. 06. 005.
- [11] GAO J, CHRISTENSEN P, WEI L. Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 198(Pt 1): 363-371. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2017. 04. 068.
- [12] 王鹏全,方三朝,张永明,等. 基于 WEAP 模型的石羊河水资源安全分析[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 92-94. (WANG P Q, FANG S Q, ZHANG Y M, et al. Water security analysis of Shiyang River based on WEAP model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(9): 92-94. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2014. 09. 024.
- [13] LI X, ZHAO Y, SHI C, et al. Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China [J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 106: 97-109. DOI: 10. 1016/j. ococean. 2015. 01. 016.
- [14] ADGOLIGN T B, RAO G V R S, ABBULU Y. WEAP

- modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia [J]. Sustainable Water Resources Management, 2016, 2(1): 55-70. DOI:10.1007/s40899-015-0041-4.
- [15] 王宏伟,张鑫,邱俊楠,等. 基于多目标遗传算法的南宁市水资源优化配置研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2):150-153. (WANG H W, ZHANG X, QIU J N, et al. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm in Xining City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 150-153. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2012.02.016.
- [16] 高雅玉,张新民,谭龙. 优化的 NSGA-II 方法在马莲河流域水资源综合管理中的应用研究[J]. 水文, 2014, 34(5): 61-66, 44. (GAO Y Y, ZHANG X M, TAN L. Application of integrated water resources management using optimized NSGA-II method in Malianhe River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 61-66, 44. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2014.05.012.
- [17] 邓坤,张璇,谭炳卿,等. 多目标规划法在南四湖流域水资源优化配置中的应用[J]. 水科学与工程学报, 2010(5):14-18. (DENG K, ZHANG X, TAN B Q, et al. On application of optimum basin water resources allocation method in Nansihu Basin[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2010(5): 14-18. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-9900.2010.05.006.
- [18] 刘大海,宫伟,邢文秀,等. 基于 AHP-熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 462-467. (LIU D H, GONG W, XING W X, et al. Comprehensive method for determining the weights of vulnerability assessment indexes on islands and the coastal zone based on the AHP weight method and entropy weight method[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 462-467. (in Chinese)) DOI:10.13634/j.cnki.mes20150324.
- [19] 周海鹰. 基于 WEAP 模型的叶尔羌河流域需水量模拟[J]. 水资源开发与管理, 2017(12): 12-16. (ZHOU H Y. Water demand simulation of Yarkant River basin based on WEAP model[J]. Water Resources Development and Management, 2017(12): 12-16. (in Chinese)) DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2017.12.004.
- [20] 王帅兵,李常斌,杨林山,等. 基于 WEAP 模型的董志塬水资源合理利用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 238-245. (WANG S B, LI C B, YANG L S, et al. Reasonable utilization of water resources based on WEAP simulation in the Dongzhi Loess tableland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 238-245. (in Chinese)) DOI:10.7606/j.issn.1000-7601.2015.04.36.