

# 灌区多水源联合利用的模拟-优化耦合模型研究

赵金鹏, 高占义\*, 陈皓锐  
(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

**摘要:** 【目的】构建灌区多水源联合利用的模拟-优化耦合模型, 实现灌区多水源的合理配置。【方法】以不同水源的引水比例为决策变量, 以用水成本最小、用水效率最高以及在约束范围内地下水位抬升幅度最大为目标, 基于半分布式水量平衡模型与 Pareto 遗传算法构建灌区多水源联合利用的模拟-优化耦合模型, 并对东北三江平原水稻灌区典型区域进行典型年与长时间序列的多水源优化配置。【结果】本研究构建的模拟-优化耦合模型得出的典型年内配水方案可以很好地处理目标函数间的复杂关系, 得出倾向于不同目标的多水源配置方案; 长时间序列多水源优化配置可实现灌区年际间的水资源调控, 在控制用水成本与提高用水效率的同时, 对地下水位进行长期调控, 实现地下水采补动态平衡; 通过调整目标函数, 模型可以根据地下水位恢复时间的快慢制定出多水源配置方案; 与现有配水方案相比, 常规灌溉与控制灌溉条件下优化方案的用水效率基本保持不变, 但用水成本分别降低 4.3% 与 23.8%, 净地下水补给量分别增加  $0.52 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  和  $1.73 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。【结论】在综合考虑用水效率、用水成本的前提下, 本研究建立的灌区多水源联合利用的模拟-优化耦合模型可得出有利于灌区地下水可持续发展的多水源配水方案, 为灌区多水源配水技术提供理论支持。

**关键词:** 多水源配水; 多目标优化; 遗传算法; 模拟-优化模型; 长时间序列

中图分类号: F323.21

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023074

OSID:



赵金鹏, 高占义, 陈皓锐. 灌区多水源联合利用的模拟-优化耦合模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 106-111.

ZHAO Jinpeng, GAO Zhanyi, CHEN Haorui. Simulation-optimization Model for Multi-water Resource Distribution in Irrigation Districts[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 106-111.

## 0 引言

【研究意义】水资源是制约中国农业可持续发展的关键因素。为了提高水资源利用效率, 灌区多水源联合利用引起了广泛关注。多水源联合利用不仅能提高供水保证率, 还可以有效避免灌区地下水的采补失衡, 保护灌区生态环境<sup>[1-2]</sup>。【研究进展】灌区多水源优化配置是一个多目标优化问题, 需要考虑用水成本、用水效率和环境效益<sup>[3-5]</sup>。为了提高灌区经济效益, 澳大利亚昆士兰州水务局建立了地表水和地下水动态系统模型, 并确定了最佳的抽水与人工补给策略<sup>[6]</sup>。Ahmad 等<sup>[7]</sup>利用多目标线性规划法优化了灌区水资源分配制度。为了更好地评估灌溉策略对地下水的影响, Momm 等<sup>[8]</sup>将 AnnAGNPS 模型与 MODFLOW 模型进行了耦合, 建立了能够反映地表水和地下水相互作用的模拟模型。对灌区多水源多目标配置方案进行优化时, 线性、非线性规划法存在较大的局限性<sup>[9]</sup>。因此, 计算机模拟模型与智能优化算法之间的耦合逐渐被应

用于灌区多水源多目标配置方案的优化研究中<sup>[10-12]</sup>。在时间尺度上, 灌区水资源配置策略分为典型年法与长时间序列法; 典型年法计算简单, 但配水结果与实际情况可能存在较大偏差<sup>[13]</sup>。长时间序列法是根据时间序列中所有年份的降水情况对多水源配置方案进行优化<sup>[14]</sup>。该方法基于在枯水年调用地下含水层对丰水年降水量的存储, 可以有效提高用水效率、控制用水成本, 并有利于地下水资源的可持续利用<sup>[15]</sup>。【切入点】以往灌区多水源配置模拟-优化模型大多是在典型年内对配水方案进行优化, 针对长时间序列配水方案的研究较少, 无法充分发挥灌区多水源联合调度的优势。此外, 现有的灌区水资源模拟-优化耦合模型大多采用已有的地下水数值模拟模型<sup>[16]</sup>, 缺乏能够反映灌区地表水与地下水运移过程的模拟研究。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究基于灌区半分布式水量平衡模型和遗传算法, 构建灌区多水源配置模拟-优化耦合模型, 优化多水源长时间序列的配水方案, 以提高用水效率、控制用水成本并恢复地下水位, 研究结果可为灌区多水源配水技术提供理论支持。

收稿日期: 2023-03-01 修回日期: 2023-06-16 网络出版日期: 2023-11-09  
基金项目: “科技兴蒙”行动重点专项项目(2022EEDSKJXM004, 2021EEDSCXSFQZD010); 中国水利水电科学研究院技术创新团队项目(ID0145B022021)

作者简介: 赵金鹏(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事灌区现代化管理研究。E-mail: zhaojinpengs\_email@163.com

通信作者: 高占义(1962-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉、用水管理及农村供水技术研究。E-mail: 2418708600@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

## 1 模型选择与构建

### 1.1 模型选择

本研究选择课题组前期开发的半分布式水量平

衡模型作为耦合模型中的模拟模型<sup>[17]</sup>。该模型可基于水量平衡原理对灌区地表、地下含水层和沟道中的水量交换过程进行模拟。该模型只考虑了各模拟单元的土地利用与水文地质参数，没有考虑模拟单元的空间位置，因此被称为半分布式水量平衡模拟模型（以下称为模拟模型）。该模型具有模拟精度高、可反映灌区水运移过程细节的优势，相比分布式模型的计算量更小。

### 1.2 模型构建

本研究使用 Pareto 遗传算法作为优化模型对不同水源的引水比例进行优化。该模型对决策变量进行二进制编码，并基于 Pareto 算法完成遗传算法中的选择操作。利用 Pareto 算法在综合考虑某一目标的优化程度与其他目标的劣化程度后，可以筛选出倾向于某一目标的非劣较优解<sup>[18]</sup>。该优化模型可对灌区多水源进行典型年与长时间序列的优化配置，其中长时间序列优化配置根据地下水位恢复抬升时间制定了全时间序列抬升方案（以下简称全时系方案）和快速抬升方案 2 套多水源配置方案。全时系抬升方案在 60 a 后将地下水位抬升到地下水埋深约束下限，而快速抬升方案则在时间序列的前 10 a 将地下水位抬升到约束下限，并在随后的 50 a 中将地下水位维持在相对稳定区间内，实现差补动态平衡。

#### 1.2.1 决策变量

典型年优化中，以各级沟道的排水再利用比例与地表水引水比例（*DRS*）作为决策变量。长时间序列优化中，先按照降水保证率将各年分为丰水年、平水年、枯水年 3 组。典型年优化结果中的每个年型均有倾向于不同目标的 2 个方案，在丰水年选择典型年优化结果中 *DRS* 较大的方案，在枯水年选择典型年优化结果中 *DRS* 较小的方案，平水年随机选择一种方案作为长时间序列优化初始方案。在制定全时系抬升方案时，决策变量为 3 种典型年的 *DRS* 和各级渠道的排水再利用比例。在制定快速抬升方案时，将决策变量按时间序列前 10 a 与后 50 a 分为 2 组，每组决策变量都由 3 种典型年的 *DRS* 与排水再利用系数组成。初始方案的选择原则与全时系抬升方案一致。

#### 1.2.2 目标函数

研究区多水源优化配置模型在典型年中包括 2 个目标函数，分别为用水成本最小和用水效率最高。计算式如下：

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{j=1}^3 W_j C_j \\ F_2 = \max \frac{ET}{[W + P \times A \times 1000 - \min(W_p, W_u) - W_r]} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： $W_j$  为第  $j$  种水源的灌溉水量（ $m^3$ ）； $C_j$  为第  $j$  种水源的单位用水成本（元/ $m^3$ ）； $ET$  为灌区范围内

的蒸散量（ $m^3$ ）； $W$  为总灌溉水量（ $m^3$ ）； $P$  为年降水量（ $mm$ ）； $A$  为灌区面积（ $km^2$ ）； $W_p$  为地表水对地下含水层补充的水量（ $m^3$ ）； $W_u$  为地下水抽取量（ $m^3$ ）； $W_r$  为地表回归水量（ $m^3$ ）。3 种水源的单方引水成本分别为：地表水 0.134 元/ $m^3$ ，地表回归水 0.064 元/ $m^3$ ，地下水 0.236 元/ $m^3$ 。

长时间序列优化中加入了地下水位抬升目标，计算式为：

$$\begin{cases} FL_1 = \min \sum_{y=1}^Y F_{1y} \\ FL_2 = \max \frac{\sum_{y=1}^Y ET_y}{[\sum_{y=1}^Y (W_y + P_y \times A - W_{ry}) - \min(\sum_{y=1}^Y W_{py}, \sum_{y=1}^Y W_{uy})]} \\ FL_3 = \max (H_0 - H_{60}) \\ FL_3 = \begin{cases} \max (H_0 - H_{10}) \\ \min \sqrt{(H_{10} - H_{60})^2} \end{cases} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $Y$  为时间序列中包含的年数； $F_{1y}$  为第  $y$  年的用水成本（元）； $W_y$  为第  $y$  年的灌溉用水量（ $m^3$ ）； $P_y$  为第  $y$  年的降水量（ $mm$ ）； $W_{ry}$  为第  $y$  年的地表回归水量（ $m^3$ ）； $W_{py}$  为第  $y$  年的地下水补给量（ $m^3$ ）； $W_{uy}$  为第  $y$  年的地下水利用量（ $m^3$ ）； $H_0$ 、 $H_{10}$ 、 $H_{60}$  分别为初始第 60 年的地下水埋深（ $m$ ）； $H_0$  为初始地下水埋深（ $m$ ）； $H_{10}$  为第 10 年的地下水埋深（ $m$ ）。

#### 1.2.3 约束条件

约束条件包括地下水埋深、渠系供水能力以及地表回归水量。地下水埋深在约束范围内可以保证生态环境不被破坏。研究区地表水可供水量主要受各级渠道供水能力的限制，其中总干渠的最大流量为 88.95  $m^3/s$ 、各条干渠的最大流量在 1.14~15.72  $m^3/s$ 。地表回归水量上限由干沟承接的排水量与拦蓄比例决定。约束条件如下式：

$$\begin{cases} H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \\ W_{st}^i \leq 24 \times 3600 \times Q_i \\ W_{ri} \leq K_i \times \sigma_i \times W_i \end{cases}, \quad (3)$$

式中： $H_{\min}$  为地下水埋深约束下限（ $m$ ），取值为 9.8  $m$ ； $H_{\max}$  为地下水埋深约束上限（ $m$ ），取值为 20  $m$ ； $W_{st}^i$  是第  $t$  天第  $i$  条干渠地表水引水量（ $m^3$ ）； $Q_i$  为第  $i$  条干渠最大引水流量（ $m^3/s$ ）； $W_{ri}$  为第  $i$  级沟道回归水量（ $m^3$ ）； $K_i$  为第  $i$  级沟道的排水再利用比例； $\sigma_i$  为第  $i$  级沟道的拦蓄比例； $W_i$  为第  $i$  级沟道承接的农田排水量（ $m^3$ ）。

### 1.3 耦合模型优化原理

将半分布式水量平衡模拟模型嵌入到基于 Pareto 遗传算法的优化模型中，构建灌区多水源配置模拟-优化耦合模型。优化过程中，对优化模型得出的每一步方案进行模拟，去除超出约束范围的方案，并按照 Pareto 原理选择较优的方案进行交叉和突变生成新的方案，最终得到最优解。遗传算法的参数取值分别为：种群数量 100，进化代数 200，交叉概率 0.8，突变概

率 0.1。优化算法基于 Python 编程语言实现。图 1 为耦合模型的计算流程。

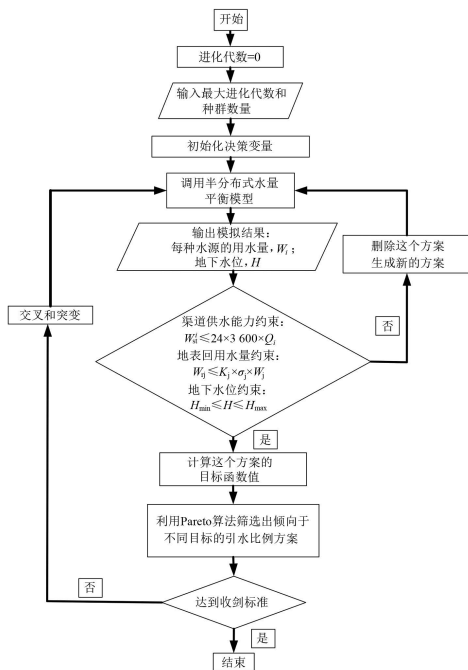


图 1 耦合模型流程

Fig.1 Coupled model flowchart

## 2 应用实例

### 2.1 应用区概况

选取中国黑龙江省三江平原的典型水稻种植区作为模型的应用区域(图 2)。该地区属于温带大陆性季风气候,年降水量在 326.2~886.4 mm 之间。该地区有 28 条干沟/渠、365 条支沟/渠,拥有完善的地表水引水工程、机井工程和排水截留系统,适合多水源灌溉。该地区主要灌溉水源为地下水,导致地下水埋深普遍增加<sup>[19]</sup>。

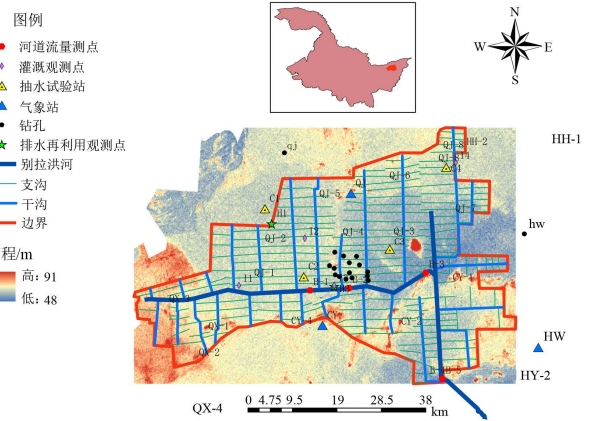


图 2 研究区位置

Fig.2 Application area location map

### 2.2 模拟模型边界与初始条件

模拟模型的上边界为地表,模型上边界的进出水量包括灌溉水量、降水量和蒸散量;下边界为地下 100 m,为零流量边界;模型采用达西定律计算地下水的侧向流量。以 2019 年实测地下水埋深 13.31 m 作为初始地下水埋深。

### 2.3 典型年优化结果

利用模拟-优化耦合模型对典型年多水源引水比例进行优化,所有方案的排水再利用比例优化结果均为 80%,其余优化结果如表 1 所示。在相同灌溉模式下, S1 方案下的 DRS 较大,且用水成本与用水效率均为最低; S2 方案下的 DRS 较小,其用水效率最高,但用水成本高于 S1 方案。在常规灌溉下, S3 方案的用水效率和用水成本均介于 S1 和 S2 方案之间;在控制灌溉下, S3 方案的用水效率与 S2 方案相近,但用水成本最高。

表 1 典型年多水源配水方案

Table 1 Multi-source water distribution scheme in typical years

方案	DRS			用水成本/(10 <sup>7</sup> 元)			用水效率		
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年
S1-1	0.6	0.6	0.7	9.27	11.76	12.74	0.7	0.72	0.71
S2-1	0.2	0.3	0.3	11.43	13.82	15.9	0.82	0.83	0.82
S3-1	0.3	0.3	0.3	10.89	13.82	15.9	0.8	0.83	0.82
S1-2	0.8	0.8	0.8	5.46	6.93	7.97	0.72	0.74	0.75
S2-2	0.5	0.5	0.5	6.54	8.3	9.54	0.78	0.82	0.85
S3-2	0.4	0.4	0.4	6.9	8.76	10.07	0.77	0.81	0.85

注 方案编号中第 1 个数字代表优化方法与倾向目标, 1 代表模型优化结果中倾向降低用水成本的方案, 2 代表模型优化结果中倾向提高用水效率的方案, 3 代表采用比选方案。第 2 个数字代表灌溉模式, 1 代表常规灌溉, 2 代表控制灌溉。

图 3 为各方案下的地下水利用量和地下水补给量。在常规灌溉下, 方案 S1-1 的地下水补给量最大, 地下水利用量最小; 方案 S2-1 的地下水补给量最小, 地下水利用量最大; 方案 S3-1 的地下水补给量与利用量介于方案 S1-1 和 S2-1 之间。在控制灌溉模式下, 方案 S1-2 的地下水补给量最大, 地下水利用量最小; 方案 S2-2 的地下水补给量和地下水利用量均介于方

案 S1-2 和 S3-2 之间; 方案 S3-2 的地下水补给量最小, 地下水利用量最大。

图 4 为不同方案对地下水埋深的影响。在常规灌溉下, 方案 S1-1 导致地下水埋深在 3 个典型年中普遍减小; 方案 S2-1 导致地下水埋深略有增加; 方案 S3-1 降低了丰水年地下水埋深, 但增加了平水年和枯水年地下水埋深。

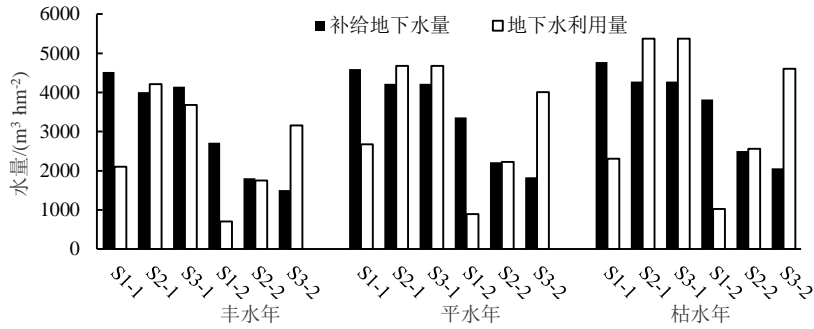


图3 不同配水方案的地下水利用量与地下水补给量

Fig.3 Groundwater utilization and groundwater recharge in different water distribution schemes

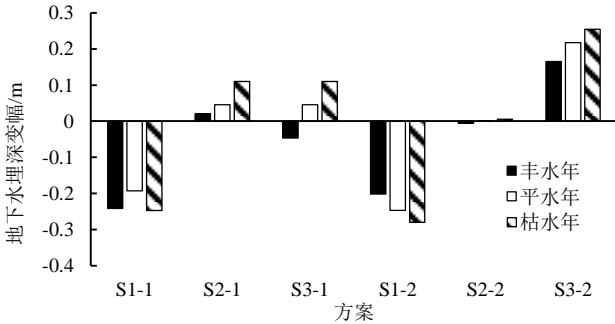


图4 不同方案地下水变幅

Fig.4 Variation of groundwater in different schemes

2.4 长时间序列优化结果

表 2 为长时间序列多水源方案的优化结果。在相同方案下，丰水年 *DRS* 较大，枯水年 *DRS* 较小。在常规灌溉下，SL1-1 方案下的地下水补给量、地下水利用量、用水成本和用水效率均介于 SL2-1 和 SL3-1 方案之间；SL2-1 方案下的地下水补给量最大，地下

水利用量、用水效率和用水成本最小；SL3-1 方案下的地下水利用量最大，地下水补给量最小，用水成本和用水效率最高。在控制灌溉下，SL1-2 方案的用水效率最高，SL3-2 方案的用水效率最低。在用水成本、地下水补给量和地下水利用量方面，SL2-2 方案的表现最优。SL1-2 和 SL2-2 在地下水补给量、地下水利用量和用水成本方面的表现相近。SL3-2 方案的地下水补给量与用水效率最小，地下水利用量和用水成本最大。

图 5 为不同方案下的地下水埋深变化。SL1 方案在前 10 a 可以快速减小地下水埋深并将其控制在地下水埋深约束下限以上。SL2 方案为全时系地下水抬升方案，可在 60 a 内将地下水埋深减小至约束下限以上。SL3 方案的地下水利用量超过了补给量，造成了地下水位下降。

表 2 长时间序列优化结果

Table 2 Long time series optimization results

方案	DRS						地下水补给量/ (10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> hm <sup>-2</sup> )	地下水利用量/ (10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> hm <sup>-2</sup> )	用水成本/亿元	用水效率
	前 10 a			后 50 a						
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年				
SL1-1	0.8	0.7	0.6	0.6	0.4	0.1	2.62	2.36	7.57	0.81
SL2-1	0.7	0.3	0.2	0.7	0.3	0.2	2.63	2.31	7.52	0.80
SL3-1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	2.43	2.66	7.88	0.82
SL1-2	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.3	1.35	1.18	4.64	0.82
SL2-2	0.9	0.6	0.3	0.9	0.6	0.3	1.40	1.11	4.57	0.81
SL3-2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.04	2.54	6.04	0.80

注 方案编号中第 1 个数字为方案情景设置，1 代表快速抬升地下水位方案，2 代表全时系抬升地下水位方案，3 代表比选方案。第 2 个数字代表灌溉模式，1 代表常规灌溉，2 代表控制灌溉。

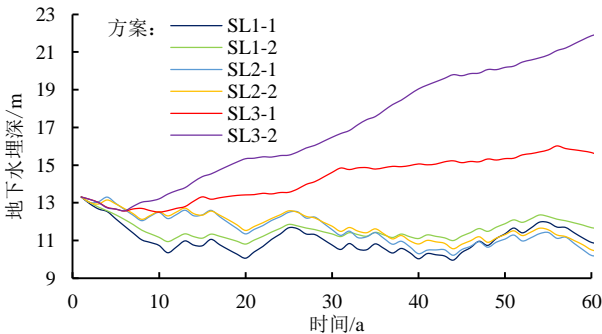


图 5 长时间序列配水方案地下水动态

Fig.5 Hange of groundwater embedded depth under long time series water distribution scheme

3 讨论

多水源优化对灌区可持续发展具有较高的应用价值。现有的灌区多水源优化研究主要为典型年优化，缺乏对灌区多水源年际间的调控研究。本研究采用模拟-优化耦合模型，首先对灌区多水源进行了典型年优化配置，制定了倾向于不同优化目标的配置方案。随后，基于典型年多水源配置方案，对长时间序列配置方案进行了优化，根据不同地下水恢复时间制定了不同的多水源长时间序列配置方案。

在典型年优化中,因地表水成本较低, S1 方案采用了较大的 *DRS*, 导致地下水利用量较少且地下水补给量较大, 可使地下水埋深上升。S2 方案采用了较小的 *DRS*, 这是因为在计算用水效率时, 回归水利用量越大, 用水效率越高。地下回归水量的计算方法是从地下水利用量与补给量之间选择较小值, 而地下水利用量与补给量呈负相关, 补给量随着利用量的增加而减小, 当补给量与利用量相近时, 用水效率最高<sup>[19-20]</sup>。因此, 模拟-优化耦合模型得出的倾向提高用水效率的方案为了尽可能地缩小地下水补给量与利用量之间的差距, 选择了较小的 *DRS*, 造成在该方案下地下水水位变幅较小。

在长时间序列优化中, 方案 SL1 可以快速提升地下水水位, 在前 10 a 将地下水埋深减小至略大于约束下限的位置, 并在后 50 a 将地下水水位保持在这个位置。方案 SL2 将地下水埋深在 60 a 中持续减小至略大于约束下限的位置。可见, 模拟-优化耦合模型可以通过改变 *DRS* 来控制地下水埋深的减小速度。通过对比不同地下水恢复时间方案下的地下水补给量可知, SL2 方案比 SL1 方案对地下水补给的时间更长, 使得 SL2 方案地下水补给量更多, 用水效率更低, 用水成本更高。

通过对灌区多水源配置的研究, 得出了倾向于不同目标的典型年多水源配置方案以及根据不同的地下水恢复时间制定的长时间序列多水源配置方案。模拟-优化耦合模型可以通过改变 *DRS* 来加速或减缓地下水埋深的增减。采用模拟-优化耦合模型对灌区水资源进行合理配置, 可以在控制用水成本、确保用水效率的同时, 维持灌区地下水资源的可持续利用, 这与其他多目标配水模型的研究结论类似<sup>[21-22]</sup>。在下一步工作中, 需要进一步提高模拟精度、增加目标函数, 进一步考虑灌区生产效率与资源及环境可持续利用之间的权衡。

## 4 结论

1) 本研究构建的模拟-优化耦合模型得出的典型年内配水方案可以很好地处理目标函数间的复杂关系, 得出倾向于不同目标的多水源配置方案。

2) 长时间序列多水源优化配置可实现灌区年际间的水资源调控, 在控制用水成本与提高用水效率的同时, 对地下水水位进行长期调控, 实现地下水采补动态平衡。

3) 通过调整目标函数, 模型可根据地下水水位恢复时间的快慢制定出多水源配置方案。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] SALEM G S A, KAZAMA S, SHAHID S, et al. Impacts of climate change on groundwater level and irrigation cost in a groundwater dependent irrigated region[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 33-42.
- [2] SHARDA V, GOWDA P H, MAREK G, et al. Simulating the impacts of irrigation levels on soybean production in texas high Plains to manage diminishing groundwater levels[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2019, 55(1): 56-69.
- [3] 齐学斌, 樊向阳, 李平, 等. 井渠结合灌溉类型区多水源联网优化调度模式研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(2): 17-20.  
QI Xuebin, FAN Xiangyang, LI Ping, et al. Research of synthetic technique of combining pipeline net and optimal technique in well-canal combined irrigation patterns region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(2): 17-20.
- [4] 杨洋, 朱焱, 伍靖伟, 等. 河套灌区井渠结合地下水数值模拟及均衡分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(8): 732-737.  
YANG Yang, ZHU Yan, WU Jingwei, et al. Numerical modeling and water balance analysis of groundwater under conjunctive use of groundwater and surface water in Hetao Irrigation District[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(8): 732-737.
- [5] ZEINALI Masoomah, AZARI Arash, HEIDARI Mohammad Mehdi. Multiobjective optimization for water resource management in low-flow areas based on a coupled surface water-groundwater model[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146: 5.
- [6] HAFI A. Conjunctive use of groundwater and surface water in the burdekin delta area[J]. *Economic Record*, 2003, 79: S52-S62.
- [7] AHMAD I, ZHANG F. Optimal agricultural water allocation for the sustainable development of surface and groundwater resources[J]. *Water Resources Management*, 2022, 36(11): 4 219-4 236.
- [8] MOMM H G, BINGNER R L, MOORE K, et al. Integrated surface and groundwater modeling to enhance water resource sustainability in agricultural watersheds[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107 692.
- [9] 赵建明. 灌区多要素农业水资源优化配置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.  
ZHAO Jianming. Research on multi-factor optimization of agriculture water resources allocation: A case study of irrigation areas in Minqin[D]. Beijing: China Agriculture University, 2018.
- [10] 胡艳玲, 黄仲冬, 齐学斌, 等. 基于线性规划和 MODFLOW 耦合技术的人民胜利渠灌区水资源优化配置研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(12): 85-92.  
HU Yanling, HUANG Zhongdong, QI Xuebin, et al. Study on optimal allocation of water resources in irrigation district based on linear programming and MODFLOW coupling technology[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(12): 85-92.
- [11] 粟晓玲. 农业水资源优化配置研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(7): 1-7, 34.  
SU Xiaoling. Advance of optimal allocation of water resources in agriculture: A review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(7): 1-7, 34.
- [12] 樊煜, 高占义, 陈皓锐, 等. 基于 NSGA-II 算法的灌区配水渠道轮灌分组优化调控研究[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(2): 130-135.  
FAN Yu, GAO Zhanyi, CHEN Haorui, et al. Optimizing water distribution in irrigation canals using the NSGA-II algorithm[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 130-135.
- [13] 蔡甲冰, 刘钰, 蔡林根, 等. 灌区灌溉设计频率分析计算方法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2001, 20(4): 30-31, 46.  
CAI Jiabing, LIU Yu, CAI Lingen, et al. A method of determining suitable probability for irrigation project design[J]. *Irrigation and*

- Drainage, 2001, 20(4): 30-31, 46.
- [14] CHUAI Xiaowei, YUAN Ye, ZHAO Rongqing, et al. High-resolution monitoring of inland water bodies across China in long time series and water resource changes[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23: 3 673-3 695.
- [15] SINGH A. Managing the environmental problems of irrigated agriculture through the appraisal of groundwater recharge[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 388-393.
- [16] 康燕楠, 降亚楠, 苏振辉. 基于 NSGA-III和 FloPy 的灌区水资源多目标模拟优化模型[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(3): 17-23.  
KANG Yannan, JIANG Yanan, SU Zhenhui. Multi-objective water resources simulation and optimization model for irrigation district based on NSGA-III and FloPy[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(3): 17-23.
- [17] LIU Jing, HU Yaqiong, CHEN Haorui. Conjunctive use of surface water and groundwater in irrigation districts in China[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(S2): 135-141.
- [18] 王诺, 吴迪, 黄祺, 等. 选择 Pareto 非劣解最优方案的量化方法: 性价比法[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(3): 725-733.  
WANG Nuo, WU Di, HUANG Qi, et al. A quantitative method to select the best option from Pareto non dominated solutions: Cost performance method[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(3): 725-733.
- [19] 刘波, 樊成芳, 束龙仓, 等. 气候变化与人类活动对三江平原典型区地下水埋深影响预估[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 63-69.  
LIU Bo, FAN Chengfang, SHU Longcang, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on groundwater in Sanjiang plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 63-69.
- [20] 刘静. 灌区节水的尺度效应及用水模式研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.  
LIU Jing. Study on scale effect of water saving and water management mode[D]. Nanjing: Hohai University, 2017.
- [21] 李荣, 曹凯华, 付强, 等. 不确定条件下考虑水循环过程的灌区多水源高效配置[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 62-73.  
LI Mo, CAO Kaihua, FU Qiang, et al. Efficient allocation of multiple water sources in irrigation areas considering water cycle process under uncertainty[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(18): 62-73.
- [22] 付强, 刘银凤, 刘东, 等. 基于区间多阶段随机规划模型的灌区多水源优化配置[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 132-139.  
FU Qiang, LIU Yinfeng, LIU Dong, et al. Optimal allocation of multi-water resources in irrigation area based on interval-parameter multi-stage stochastic programming model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 132-139.

## Simulation-optimization Model for Multi-water Resource Distribution in Irrigation Districts

ZHAO Jinpeng, GAO Zhanyi\*, CHEN Haorui

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** 【Objective】 Based on the semi-distributed water balance simulation model and the Pareto genetic algorithm, a coupled simulation-optimization model for multi-water resources distribution was constructed to improve water management in irrigated areas. 【Method】 The water diversion ratio of different water resources were taken as the decision variables, the coupled model was used to optimize the allocation of multi-water resources in typical years and long time series in the irrigated rice area in Sanjiang Plain, Northeast China. The objectives of the optimization were to minimize water cost, maximize water use efficiency and keep groundwater table within a constrained range. 【Result】 ① Water distribution obtained by the model for typical years can deal with complex relationship between different objective functions, and the multi-water resources distribution schemes for different objectives are obtained; ② Multi-water resource optimal distribution in long time series can regulate water resources in irrigated areas between years, control water cost, improve water use efficiency, and control groundwater level to achieve dynamic balance between groundwater usage and recharge. ③ By adjusting the objective functions, the model worked out the multi-water resources distribution schemes to rise groundwater table. Compared with the existing water distribution scheme, the water use efficiency of the optimal scheme under conventional irrigation and controlled irrigation are basically unchanged, but the water cost are reduced by 4.3% and 23.8%, respectively, and groundwater recharge are increased by  $0.52 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  and  $1.73 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , respectively. 【Conclusion】 With the comprehensive consideration of water use efficiency and cost, the simulation-optimization model can obtain multi-water resources distribution schemes, which are conducive to the sustainable use of groundwater in irrigated districts, and provide technical support for irrigation districts' multi-water resources distribution.

**Key words:** multi-water resources distribution; multi-objective optimization; genetic algorithm; simulation-optimization model; long time series

责任编辑: 韩洋