

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.002

旱涝交替下驮英灌区年内水资源优化调控研究

苑希民^{1,2}, 王小姣^{1,2}, 田福昌^{1,2}, 何立新³, 王秀杰^{1,2}, 徐奎^{1,2}, 张家铭^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 3. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:针对旱涝频发下区域水资源分配不均问题,基于某时段可供水量是否满足用户层理想需水量,提出旱涝交替下年内水资源优化调控方法。以驮英灌区为研究对象,建立水资源优化调控模型,通过2030规划水平年驮英灌区供水侧供水能力及需水侧水资源需求预测,分析远期水资源供需平衡情况,研究年内尺度的水资源优化调控方案。结果表明,规划水平年总缺水1692万m³,年缺水率较调控前降低37.7%,生活用水得到充分保证,有效缓解了水资源短缺和分配不均局面。研究成果可为驮英灌区旱涝交替水资源优化调控提供决策方案,且该方法可供旱涝频发区域水资源优化调控参考。

关键词:水资源优化调控;旱涝交替;水资源供需平衡;驮英灌区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0008-08

Study of optimal regulation and control of water resources in Tuoying irrigation area under alternate drought and flood// YUAN Ximin^{1,2}, WANG Xiaojiao^{1,2}, TIAN Fuchang^{1,2}, HE Lixin³, WANG Xiujie^{1,2}, XU Kui^{1,2}, ZHANG Jiaming^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Architectural Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. College of Water Resources and Hydropower, Hebei Engineering University, Handan 056038, China)

Abstract: In view of the uneven distribution of regional water resources under frequent droughts and floods, based on whether the available water supply in a certain period has meet the ideal water demand of the user layer, which put forward the optimal regulation method of water resources in a year under alternating droughts and floods, and took Tuoying irrigation area as the research object, established the optimal regulation model of water resources, through the analysis of water supply capacity on the water supply side and the prediction of water resource demand on the water demand side of Tuoying irrigation area in 2030 planning level year, the long-term water resource supply and demand balance has been analyzed, and the optimal regulation scheme of water resources at the annual scale has been studied. The results have showed that the total water shortage in the planning level year was 16.92 million m³, the annual water shortage rate was 37.7% lower than that before regulation, the domestic water has been fully guaranteed, and the shortage and uneven distribution of water resources have been effectively alleviated. The research results can provide a decision-making scheme for the optimal regulation of alternating drought and flood water resources in Tuoying irrigation area, and this method can be used as a reference for optimal regulation of water resources in drought and flood prone areas.

Key words: optimal regulation of water resources; alternate drought and flood; balance between supply and demand of water resources; Tuoying irrigation area

全球气候变暖背景下极端灾害天气频发,造成年内干旱和洪涝灾害出现概率越来越大。气候异常带来的灾害严重制约了我国农业经济社会发展,直

接或间接威胁人民生命与财产安全。由于水资源短缺和时空分配不均等问题,我国水资源供需关系日益紧张,对经济制约更加严重。灌区水资源合理配

基金项目:广西左江治旱驮英水库及灌区工程综合管理信息系统项目(2018GKF-0574);天津大学自主创新基金(2020XZC-0002);国家自然科学基金委创新团队(51621092);科技部重点领域创新团队(2014RA4031)

作者简介:苑希民(1968—),男,教授,博士,主要从事防洪减灾与智慧水利研究。E-mail:yxm@tju.edu.cn

通信作者:田福昌(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事防洪减灾与智慧水利研究。E-mail:tianfuchang@tju.edu.cn

置是提高灌区水资源利用效率及保障粮食安全的重要途径,也是实现灌区水资源可持续利用的有效调控措施^[1-2]。旱涝交替下水资源优化调控研究,对防御水旱灾害、强化我国水资源战略研究具有重要意义。

区域水资源优化调控是指基于系统工程理论和最优化方法让有限的水资源发挥最大效益,提升水资源利用效率。水资源优化调控涉及复杂的多目标优化求解,通常采用数学规划^[3-4]、大系统分解协调^[5-6]以及粒子群算法^[7]、萤火虫算法^[8]等智能优化算法求解水资源配置模型。Ren 等^[9]将 CCP、模糊集和 AHP 集成到线性多目标规划中,提出了一种改进的多目标随机模糊规划 (IMOSFP),为多目标和不不确定性条件下农业水土资源优化配置提供合理的决策。苑希民等^[10]基于大系统分解协调原理和线性规划优化理论建立洪泽湖与骆马湖两湖水资源优化调度耦合模型,为两湖水系水资源调度提供了良好技术方法。董增川等^[11]提出考虑主客观因素模糊区间的综合赋权方法,为流域水资源多目标综合调度决策提供了新的思路。李东林等^[12]基于 Nerlove 方法预测主要农作物的种植面积,建立塔里木河流域农业水资源配置模型,为农作物与价格的供给响应关系提供良好的技术方法。选取合适目标函数和约束条件构建水资源配置模型对有效利用水资源具有良好效果。谢新民等^[13]基于地下水“取水总量和水位”双控构建水资源配置模型,为实现人水和谐的水资源配置格局提供良好的配置方案。黄志鸿等^[14]以生态溢缺水率和综合缺水率作为目标建立浊漳河流域水库群生态调度模型,较传统的以生态缺水率最小作为目标可得到更低的月平均缺水率和更高的生态满足度。可见已有许多学者从水资源优化调控不同角度出发进行了不同程度研究,但在全球变暖和人类活动影响下,极端旱涝事件频率和强度增大,年内旱涝发生概率增加,旱涝急转研究领域已经基本形成判别方法、成因分析、演变特征、灾害损害 4 个方向^[15],针对旱涝灾害的研究也多是研究干旱时空特征^[16],目前考虑旱涝交替下影响流域水资源和制约区域经济发展的研究仍较少。

因此,本文提出旱涝交替下年内水资源优化调控方法,并以驮英灌区为研究区域,建立水资源优化调控模型,通过 2030 规划水平年驮英灌区供水侧供水能力分析和需水侧水资源需求预测,分析远期水资源供需平衡,研究年内尺度的水资源优化调控方案。

1 研究区概况

驮英灌区位于广西壮族自治区珠江流域西江水

系左江支流,地理位置在东经 $107^{\circ}35' \sim 107^{\circ}56'$,北纬 $22^{\circ}01' \sim 22^{\circ}40'$ 之间,涉及广西崇左市下辖的江州、扶绥、宁明等 3 个县(区),分布在左江右岸,灌区总面积 $2\,151\text{ km}^2$,如图 1 所示。广西壮族自治区常会出现严重的旱涝灾害以及旱涝急转现象,如 2005 年 6 月,出现旱灾急转涝灾的现象;2009 年 7 月,出现持续干旱后迅速转为强降雨天气,引发涝灾;2013 年夏季出现旱涝并存并急转的现象。且据广西壮族自治区水利工程项目局《大中型水库水文资料》提供的驮英灌区内客兰水库、那江水库、派关水库 3 座大中型水库以及灌区东侧那板水库、灌区西侧安农水库 1983—2018 年共计 36 年历史逐月降水量数据统计,驮英灌区年降水量变化波动幅度很大,近 36 年年降水呈不显著的增长趋势,年内降雨分配不均,有明显季节性,主要的季节性洪涝年份有 1986 年(4—6 月)、2001 年(7—9 月)、2008 年(9—11 月),季节性干旱年份有 1996 年(2—7 月)、2000 年(7—9 月)、2003—2004 年(11 月至次年 1 月)。驮英灌区 1983—2018 年系列多年平均降水量仅 $1\,200\text{ mm}$,旱涝灾害频发,年内旱涝发生概率较大,呈现夏季多雨多涝冬季少雨多旱的规律,频繁的旱涝灾害对灌区农业生产生活及社会经济产生重大负面影响。

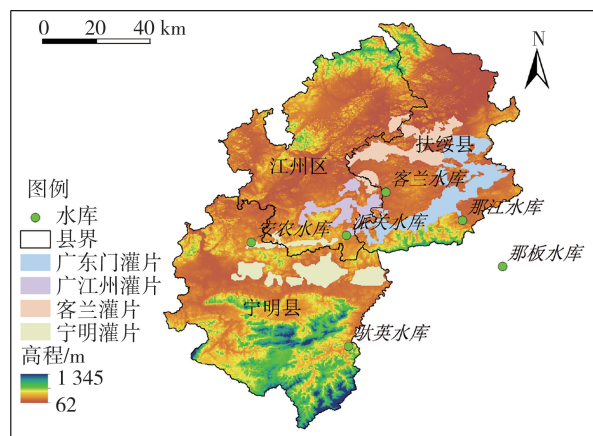


图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

2 研究方法

2.1 旱涝交替下年内水资源优化调控模型架构

针对随气候急剧变化影响下的水资源短缺和分配不均问题,基于大系统分解协调理论,考虑水资源分配均衡、减轻旱涝灾害影响,构建旱涝交替下年内水资源优化调控模型架构(图 2),建立驮英灌区水资源优化调控模型。

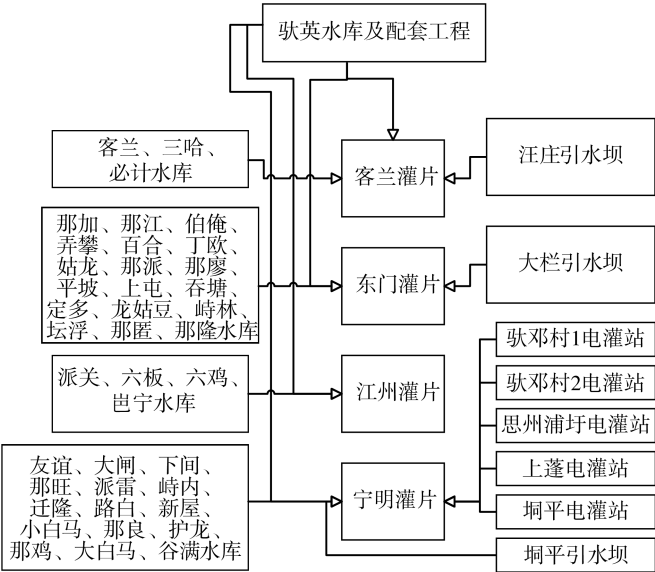
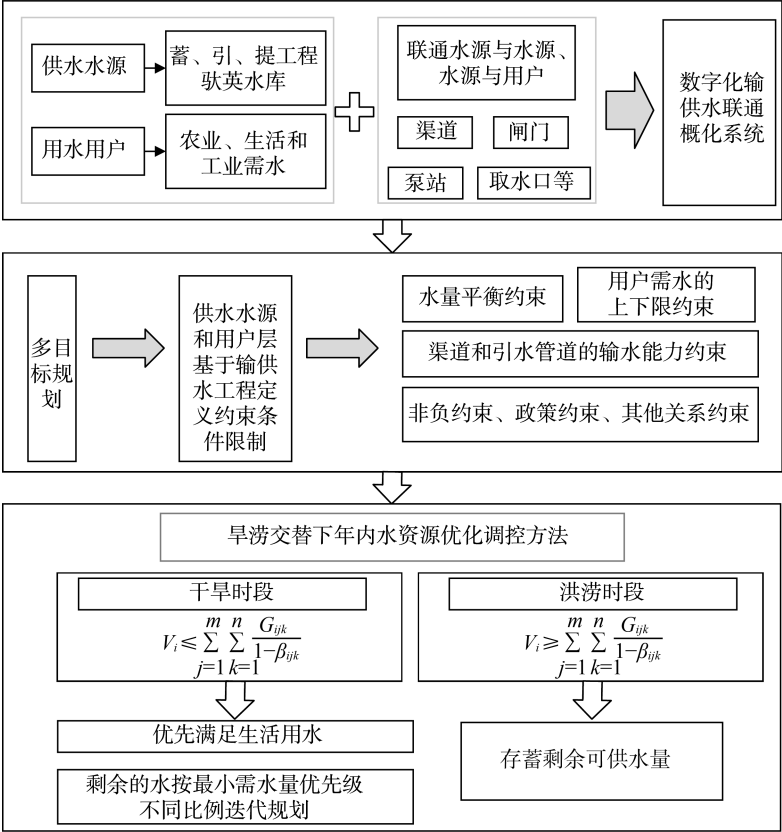
a. 系统概化。根据驮英灌区宁明灌片、江州灌片、东门灌片和客兰灌片 4 个灌片区域分区,基

于研究区域实际水源条件和水量供需平衡关系,将水资源系统概化为蓄水、引水、提水工程及渠道、闸门、泵站、取水口等供水系统和4个灌片区域生活、农业、工业用水户需求点组成的数字化输供水联通概化系统(图3)。

b. 目标和约束条件设置。以满足用水户最小净需水、按照来水分配最大限度满足需水需求为目标,采用水量平衡约束、用户需水的上下限约束、渠

道和引水管道的输水能力约束、非负约束、政策约束、其他关系约束等约束指标,建立水资源优化调控模型。

c. 旱涝情景划分。干旱情景优先满足生活用水,剩余水资源根据用户层最小净需水量要求按优先级不同比例迭代规划;洪涝情景满足用户层理想需水后,输供水工程等设施存蓄剩余可供水量。涝时存蓄水资源供旱时水量配置。旱涝交替主要考虑



不同时段水资源的调配,洪涝情境下产生丢弃水量,可利用蓄水工程、驮英水库及配套渠系工程存蓄水源,供干旱情景下调配。

d. 模型迭代求解。根据区域水资源数字化输供水联通概化系统,统筹协调生活用水、农业用水和工业用水,合理设置模型现状基准年到水平规划年的情景方案,设置方案的相关参数(用水户最小净需水、输供水综合损失系数、不同类型用水户用水定额等),采用用水定额、灌溉定额等水文计算方法,分析不同方案下研究区域的水资源供需情况。根据该模型对研究区域规划年水资源供需态势进行分析,考虑到水资源优化调控涉及的旱涝交替急转,多个连续计算时段可合为一个计算时段,研究驮英灌区4个灌片水资源优化调控方案,基于程序编制迭代求解模型,首先满足生活需水,一次分配满足其他用水户最小净水量需求,二次分配考虑根据用水户最小净需水按优先级不同比例分配水资源,确定最优方案。

2.2 旱涝交替下年内水资源优化调控方法

根据研究区域可供水量与该时段各用水户理想需水量总和之间的关系划分旱涝情景,进行迭代规划,优化协调供水水源和用水户层供需关系。

2.2.1 基本流程

干旱情景下该时段研究区域实际供水能力小于该时段该区域各用水户理想需水量之和,即:

$$V_i < \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{G_{ijk}}{1 - \beta_{ijk}} \quad (1)$$

式中: i 为时段序号,假定一个配置年度划分为 l 个时段,则 $i=1,2,\dots,l$; j 为地区序号,假定该系统包含 m 个地区,则 $j=1,2,\dots,m$; k 为用水户序号,假定第 j 地区包含 n 个用水户,则 $k=1,2,\dots,n$; V_i 为 i 时段研究区域的可供水量; G_{ijk} 为 i 时段 j 地区 k 用水户理想需水量; β_{ijk} 为 i 时段 j 地区 k 用水户输供水综合损失系数(率)。要优先满足生活用水,剩余的水根据该时段各用水户的最小净需水量要求按优先级不同比例分配给各用水户,如有剩余,根据各用水户缺水程度再次按比例分配,直到剩余水量为零。即:

$$\frac{B_{i\text{优}}}{1 - \beta_{i\text{优}}} = \sum_{j=1}^m \frac{B_{ij\text{优}}}{1 - \beta_{ij\text{优}}} \quad (2)$$

$$W_{ij\text{优}} = \frac{B_{ij\text{优}}}{1 - \beta_{ij\text{优}}} \quad (3)$$

$$W_{ij\text{其他}} = \left(V_i - \frac{B_{i\text{优}}}{1 - \beta_{i\text{优}}} \right) \frac{B_{ij\text{其他}}}{B_i - B_{i\text{优}}} \quad (4)$$

$$W'_{ij\text{优}} = G_{ij\text{优}} - B_{ij\text{优}} \quad (5)$$

$$W'_{ij\text{其他}} = (V_i - W_i - G_{ij\text{优}}) \frac{L'_{ij\text{其他}}}{L_{i\text{总}}} \quad (6)$$

$$W_{Vi} = V_i - W_i = 0 \quad (7)$$

式中: $B_{i\text{优}}$ 、 $\beta_{i\text{优}}$ 分别为 i 时段研究地区优先用水户的最小净需水总量与其输供水综合损失系数(率); $B_{ij\text{优}}$ 、 $\beta_{ij\text{优}}$ 分别为 i 时段 j 地区优先用水户的最小净需水总量与其输供水综合损失系数(率); $W_{ij\text{优}}$ 为 i 时段 j 地区一次分配时优先用水户分配水量; $B_{i\text{优}}$ 为 i 时段研究地区所有用水户的最小净需水总量; $W_{ij\text{其他}}$ 为 i 时段 j 地区一次分配时不包括优先用水户的其他用水户实际分配水量; $B_{ij\text{其他}}$ 为 i 时段 j 地区不包括优先用水户的其他用水户的最小净需水量; $G_{ij\text{优}}$ 为 i 时段 j 地区优先用水户理想需水量; $W'_{ij\text{优}}$ 、 $W'_{ij\text{其他}}$ 分别为二次分配时 i 时段 j 地区优先用水户、其他用水户分配的水量; $L'_{ij\text{其他}}$ 、 $L_{i\text{总}}$ 分别为其他用水户一次分配后的缺水量和缺水总量; W_i 为 i 时段水源毛供水总量; W_{Vi} 为 i 时段末该区域剩余可供水量。

洪涝情景下某时段区域实际供水能力大于等于该时段该区域所有用水户理想需水量之和,即:

$$V_i \geq \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{G_{ijk}}{1 - \beta_{ijk}} \quad (8)$$

$$W_{ijk} = G_{ijk} \quad (9)$$

$$W_{Vi} = V_i - W_i > 0 \quad (10)$$

式中 W_{ijk} 为 i 时段 j 地区 k 用水户一次分配时分配水量。

旱涝交替主要考虑不同时段水资源的调配,连续多个时段可合为一个时段,如年内按季尺度划分为4个时段,不同时段视为不同情景,按不同情景方案分别进行水资源优化调控研究,其中,干旱情境下缺水,洪涝情景下产生丢弃水量,充分利用蓄水工程、驮英水库及配套渠系工程存蓄水资源,洪涝情景下丢弃水量可存蓄起来供干旱情景下满足用水户水量需求,由于研究区域相同,季尺度与年尺度供水工程等设施及用户需求点、约束指标选取等模型参数皆相同,仅供水能力、用户需水量不同,则4个连续时段可合为一个时段,按年尺度研究水资源优化调控方案,合成的时段同样按研究区域实际供水能力小于或大于等于研究区域用水户理想需水量划分为干旱情景或洪涝情景,确定水资源调控最优方案后,再按年内4个时段长度比例分配不同时段供水水量,制定水资源优化调控方案。

2.2.2 决策变量

模型的输入条件包括需水量和可供水量两部分。

$$G_{\text{农业}} = \sum_{i=1}^l \sum_{x=1}^u S_{\text{农业}ix} q_{\text{农业}ix} \quad (11)$$

式中: $G_{\text{农业}}$ 为农业需水量; $S_{\text{农业}ix}$ 为种植面积; $q_{\text{农业}ix}$ 为不同作物不同时段的灌溉定额; x 为作物序号。

$$G_{\text{工业}h} = \sum_{i=1}^l \sum_{y=1}^v S_{\text{工业}iy} q_{\text{工业}iy} \quad (12)$$

式中: $G_{\text{工业}h}$ 为工业园区需水量, $h=1,2$, 分别为崇左工业园和东盟青年产业园; $S_{\text{工业}iy}$ 为工业类型用地占地面积, 考虑居住、办公、商业金融、体育、医疗卫生、教育科研、仓储物流、道路广场、绿地等; $q_{\text{工业}iy}$ 为不同工业类型用地的用水定额; y 为工业类型序号。

$$G_{\text{饮水}} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{z=1}^3 N_{\text{pop}ijz} q_{\text{饮水}ijz} \quad (13)$$

式中: $G_{\text{饮水}}$ 为人畜饮水需水量; $N_{\text{pop}ijz}$ 为不同地区用水人畜数, i, y, z 分别为城镇人口、农村人口和用水牲畜数; $q_{\text{饮水}ijz}$ 为不同类型用水定额。

蓄水工程可供水量 $W_{\text{蓄可供}}$ 分两种条件考虑:

$$W_{\text{蓄可供}} = \begin{cases} M & W_{\lambda} + W_0 \geq M \\ W_{\lambda} + W_0 & W_{\lambda} + W_0 < M \end{cases} \quad (14)$$

式中: W_{λ} 为水库净来水量(扣除蒸发、渗漏之后); W_0 为水库初始蓄水量(不包括死库容); M 为需水量。

$$W_{\text{引可供}} = \min(W_{\text{引}}, Q_{\text{引}}) \quad (15)$$

式中: $W_{\text{引可供}}$ 为引水工程可供水量; $W_{\text{引}}$ 为引水工程来水量; $Q_{\text{引}}$ 为引水工程供水能力。

$$W_{\text{提可供}} = \min(W_{\text{提}}, Q_{\text{提}}) \quad (16)$$

式中: $W_{\text{提可供}}$ 为提水工程可供水量; $W_{\text{提}}$ 为提水工程来水量; $Q_{\text{提}}$ 为提水工程供水能力。

2.2.3 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$W_i \leq V_{i\text{淤}} + \Delta V_{i\text{供水}} \quad (17)$$

式中: $V_{i\text{淤}}$ 为第 i 时段驮英水库的蓄水量; $\Delta V_{i\text{供水}}$ 为 i 时段现有供水工程的可供水量总和; W_i 为 i 时段水源毛供水总量, 等于各用水户的毛供水量之和。

b. 用户需水的上下限约束:

$$B_{ij} \leq W_{ij} \leq G_{ij} \quad (18)$$

式中: B_{ij} 为在 i 时段 j 用水户需水量下限; W_{ij} 为在 i 时段 j 用水户的水源毛供水总量; G_{ij} 为在 i 时段 j 用水户的理想需水量。

c. 渠道和引水管道的输水能力约束:

$$W_{ip} \leq Q_{ip} \quad (19)$$

式中: W_{ip} 为该河段第 i 时段, 需由(通过) p 水利工程设施供水到用水户端的毛总水量; Q_{ip} 为第 i 时段 p 水利工程设施的供水能力。

d. 非负约束:

$$G, M, W, Q, B_{ij}, W_{ij} \geq 0 \quad (20)$$

式中: G 为理想需水量; M 为需水量; W 为供水量; Q 为供水能力。

e. 政策约束。根据优先保障生活用水、灌溉用

水的原则, 首先满足江州、宁明和扶绥 3 个区县的居民生活用水, 其次应保证当地农业灌溉用水需求, 然后满足两个工业园区需水。在可供水量非常缺乏的时段, 可以完全停止农业供水, 除保证居民生活以及影响当地经济发展的重要工业的用水之外, 其他行业的需水满足程度可维持在 50% ~ 60%。

f. 其他关系约束:

$$B_{ij} = cG_{ij} \quad (21)$$

$$B_i = \sum_{j=1}^m B_{ij} \quad (22)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^m G_{ij} \quad (23)$$

式中: c 为用水户最低需水量所占理想需水量百分比, $0 \leq c \leq 1$; B_i 为 i 时段系统所有用水户需水量下限之和; G_i 为 i 时段系统所有用水户需水量上限之和。

2.2.4 水资源供需分析因素

模型求解涉及水资源的供需平衡分析。供水分析时, 考虑当地水源(蓄、引、提工程)来水情况和驮英水库的补水量, 以此确定灌区可供水量; 需水分析时, 涉及农业、生活和工业需水三大对象, 每个对象在各个分灌区对应不同的用水户, 农业需水、工业需水、生活需水均按定额法计算预测。农业需水部分要考虑到当地粮食作物(如水稻、玉米等)和经济作物(如甘蔗、蔬菜等)的不同用水需求, 同时要考虑种植结构变化对农业灌溉需水产生的影响。生活需水部分针对城镇居民、农村居民和牲畜等不同的群体, 采用相应的用水定额计算。工业需水部分考虑当地两个工业园区(崇左工业园和东盟青年产业园)的用水需求, 同时要考虑未来工业园业务变更和产值扩大可能会对工业需水产生的影响。

3 驮英灌区年内水资源优化调控研究

3.1 水资源供需分析

3.1.1 供水侧-现状(规划年)供水能力分析

驮英灌区由宁明灌片、江州灌片、东门灌片和客兰灌片 4 个灌片组成(表 1)。现状当地水源工程多年平均可供水量 13 551 万 m^3 ; 本次规划利用驮英水库灌区建设, 考虑当地水源工程进行联合调度, 通过 1983—2018 年系列的水量进行平衡调节计算, 按多年平均值计算得出规划年 2030 年当地水源工程可供水量为 23 454 万 m^3 。

3.1.2 需水侧-水资源现状分析及规划年需求预测

a. 生活需水部分针对城镇居民、农村居民和牲畜等不同的群体, 采用相应的用水定额进行计算。

表 1 驮英灌区各灌片水源工程可供水量

Table 1 Water available for each irrigation source project in Tuoying irrigation area

灌片名称	现状年供水量/万 m ³				规划年供水量/万 m ³			
	蓄水工程 (含百叮引水坝)	引水工程	提水工程	合计	蓄水工程 (含百叮引水坝)	引水工程	提水工程	合计
宁明灌片	757	954	128	1 839	2 008	1 396	29	3 433
东门灌片	3 488	477	0	3 965	4 538	1 022	0	5 560
客兰灌片	3 379	2 426	0	5 805	7 522	3 947	0	11 469
江州灌片	1 799	143	0	1 942	2 992	0	0	2 992
合 计	9 423	4 000	128	13 551	17 060	6 365	29	23 454

驮英灌区现状生活需水为 780 万 m³,2030 年驮英水库及灌区工程农村人畜饮水需水为 955 万 m³。

b. 农业需水部分要考虑到当地粮食作物和经济作物不同用水需求,同时要考虑种植结构变化对农业灌溉需水产生的影响。驮英灌区内现状水田面积为 1.56 万 hm²,旱地 4.07 万 hm²。经计算,在规划年 2030 年灌溉净需水量为 21 816 万 m³,农业用水毛需水量为 35 429 万 m³。

c. 工业需水部分考虑当地两个工业园区(崇左工业园和东盟青年产业园)的用水需求,同时要考虑未来工业园业务变更和产值扩大可能会对工业需水产生的影响,2030 年崇左工业区需驮英水库联合客兰水库年均毛供水量为 3 333 万 m³。

综上,驮英水库及灌区工程范围内河道外总需水基准年驮英灌区毛需水量为 23 293 万 m³,规划水平年 2030 年毛需水量为 41 690 万 m³。

3.2 水资源供需平衡分析

经长系列水资源供需平衡计算,2018 基准年驮英水库灌区供需平衡计算结果见表 2。年缺水率 41.8%,主要是农业缺水。缺水原因主要是驮英灌

区原设计引水工程调蓄能力有限,蓄水工程控制灌溉面积较小且分散,调蓄能力有限,且目前已有配套渠道也局部损坏,输水损失大,造成现状灌溉水有效利用系数只有 0.424 左右,水浪费比较严重,最终造成缺水严重。

基于基准年水资源供需平衡分析结果,按照来水分配,考虑 2030 年正常需水增长情况,驮英水库补水前规划水平年 2030 年水源工程供需平衡情况如表 3 所示。年缺水率为 41.8%,远不能满足社会经济发展对水资源的供给需求,需进一步采取应对措施以保障未来用水需求。

3.3 水资源优化调控结果分析

根据规划水平年驮英灌区水资源供需平衡分析结果,即使驮英水库来水量大于驮英灌区需驮英水库的补水量,也还存在年内分配与补水量过程不一致的问题,为满足 80% 设计保证率要求,驮英水库需一定调节库容来调节水库来水,经计算,满足设计保证率要求的驮英水库调节库容为 1.50 亿 m³。

经长系列计算,驮英水库参与联合调度后,经驮英水库及灌区工程引水渠系配套,与当地水库现有

表 2 基准年现有水源工程供需平衡结果

Table 2 Supply and demand balance results of existing water source projects in the base year

灌片名称	现有水源工程供水量/万 m ³				需水量/万 m ³				缺水量/ 万 m ³
	蓄水工程	引水工程	提水工程	合计	生活用水	农业用水	工业用水	合计	
宁明	757	954	128	1 839	197	5 790	0	5 987	4 148
东门	3 488	477	0	3 965	246	6 477	0	6 723	2 758
客兰	3 379	2 426	0	5 805	245	7 083	200	7 528	1 723
江州	1 799	143	0	1 942	92	2 963	0	3 055	1 113
合计	9 423	4 000	128	13 551	780	22 313	200	23 293	9 742

表 3 驮英水库补水前 2030 年现有水源工程供需平衡成果

Table 3 Balance of supply and demand results of existing water source projects in each district before Tuoying Reservoir water supplement in 2030

灌片名称	现有水源工程供水量/万 m ³				需水量/万 m ³				缺水量/万 m ³
	蓄水工程	引水工程	提水工程	合计	生活用水	农业用水	工业用水	合计	
宁明	1 970	1 396	71	3 437	242	9 194	0	9 436	5 999
东门	4 622	1 022	0	5 644	301	10 284	0	10 585	4 941
客兰	8 245	3 947	0	12 192	300	11 247	5 306	16 853	4 661
江州	3 009	0	0	3 009	112	4 704	0	4 816	1 807
合计	17 846	6 365	71	24 282	955	35 429	5 306	41 690	17 408

渠道连通,或使部分水库的水放到驮英水库引水渠中,驮英水库控制范围扩大,灌溉面积增加。考虑驮英水库引水与当地蓄水工程联合灌溉,可提高灌溉效益。驮英灌区正在运行的提水工程大部分规模较小,提水扬程高,运行成本大,且提水工程水源在枯水期基本无供水能力,而驮英水库通过自流覆盖到,可替代提水泵站灌溉面积0.41 万 hm²,故驮英灌区规划年当地水源工程供水量为23 454 万 m³,驮英水库向灌区补水16 544 万 m³。按照来水分配,为尽可能满足用水需求,通过水资源优化调控模型计算得到总配置水量为39 998 万 m³,其中生活用水配水955 万 m³,农业用水配水34 055 万 m³,工业用水配水4 988 万 m³,2030 年总缺水量为1 692 万 m³。水资源优化调控后各灌片缺水量见表4。

基于年尺度水资源优化调控方案,根据旱涝不同情景划分4个时段,均衡分配供水。模型优化调控后生活需水、农业需水、工业需水水资源缺水率分别为0%、3.9%、6.0%,生活需水、农业需水、工业需水供水保证率可达100%、96.1%、94%,年缺水率降低至4.1%(表5)。水资源优化调控保证了生活用水,其他用水均满足最小净需水量,在此基础上按照最小净需水量优先级不同比例进行迭代配置,各用水对象及所在灌片水量分配符合社会公平原则,水资源配置方案合理。

水资源优化调控科学规划了用水户用水量,通过约束均衡合理分配区域水资源,在满足用水户最小净需水要求基础上,调节了四大灌片各用水对象供需矛盾,将年缺水率大幅降低了37.7%,促进社

会经济良序发展。利用输供水工程联通概化系统,满足最小净需水量要求和约束条件下。充分利用其他水源缓解供水紧张程度,合理调用区域开发水资源,进行水资源配置后,驮英灌区整体缺水量减少,水资源短缺问题得到有效缓解,生活用水得到保证,但农业用水、工业用水仍存在较轻程度缺水情况。本文为旱涝交替下水资源优化调控提供了适用思路和技术方法,可指导驮英灌区四大灌片水资源配置,未来可基于此年内旱涝交替水资源优化调控模型开展中长期跨年际水资源优化调控研究。

4 结 论

a. 本文考虑供水水源、需水用户及联通工程多个要素,构建旱涝交替下驮英灌区年内水资源优化调控模型,基于年内旱涝交替,定义用水需水上下限及管道输水能力等约束条件,以统筹协调规划水资源供需关系,该方法适用水资源短缺、年内旱涝灾害频发的灌区。

b. 应用驮英灌区水资源优化调控模型,选择规划水平年2030年,在满足生活用水需求的基础上,农业用水和工业用水按最小净需水量优先级不同比例进行迭代规划,结果表明年缺水率为4.1%,较调控前降低了37.7%,所建模型能够为解决驮英灌区缺水问题提供理论依据,对维护灌区用水安全和经济发展具有显著效果。

c. 随着气候变化不断加剧,下一步需深入研究多年旱涝灾害变化规律,开展年际水资源优化调控研究,构建年际水资源优化调控模型,以适应解决复杂环境变化引起的水资源分配不均问题。

表 4 2030 年驮英灌区优化调控成果
Table 4 Tuoying irrigation area optimized regulation results in 2030

灌片名称	当地水源工程可 供水量/万 m ³	驮英补 水量/万 m ³	需水量/ 万 m ³	配置水量/万 m ³				缺水量/ 万 m ³
				生活用水	农业用水	工业用水	合计/万 m ³	
宁明	3 433	5 572	9 436	242	8 763	0	9 005	431
东门	5 560	4 525	10 585	301	9 784	0	10 085	500
客兰	11 469	4 842	16 853	300	11 023	4 988	16 311	542
江州	2 992	1 605	4 816	112	4 485	0	4 597	219
合计	23 454	16 544	41 690	955	34 055	4 988	39 998	1 692

表 5 2030 年驮英灌区年内旱涝情景交替优化调控成果
Table 5 Optimization and control results of drought and flood alternation in Tuoying irrigation area in 2030

灌片 名称	需水 类型	配置水量/万 m ³				灌片 名称	需水 类型	配置水量/万 m ³			
		12 至 2 月	3—5 月	6—8 月	9—11 月			12 至 2 月	3—5 月	6—8 月	9—11 月
宁明	生活用水	60	61	61	60	客兰	生活用水	74	76	76	75
	农业用水	2 161	2 209	2 209	2 185		农业用水	2 718	2 778	2 778	2 748
	工业用水	0	0	0	0		工业用水	1 230	1 257	1 257	1 244
东门	生活用水	74	76	76	75	江州	生活用水	28	28	28	28
	农业用水	2 412	2 466	2 466	2 439		农业用水	1 106	1 130	1 130	1 118
	工业用水	0	0	0	0		工业用水	0	0	0	0

参考文献:

- [1] 齐学斌,黄仲冬,乔冬梅,等.灌区水资源合理配置研究进展[J]. 水科学进展,2015,26(02):287-295. (QI Xuebin, HUANG Zhongdong, QIAO Dongmei, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district [J]. Advances in Water Science,2015,26(02):287-295. (in Chinese))
- [2] 张彦,李平,梁志杰,等.灌区水生态环境风险评估研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(5):159-168. (ZHANG Yan, LI Ping, LIANG Zhijie, et al. Research progress on risk assessment of water ecological environment in irrigation districts[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):159-168. (in Chinese))
- [3] 姜秋香,何晓龙,王子龙,等.基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):1-7. (JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, et al. A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):1-7. (in Chinese))
- [4] ELLEUCH M A, ANANE M, EUCHI J, et al. Hybrid fuzzy multi-criteria decision making to solve the irrigation water allocation problem in the Tunisian case [J]. Agricultural Systems,2019,176:102644.
- [5] PARSINEJAD M, YAZDI A B, ARAGHINEJAD S, et al. Optimal water allocation in irrigation networks based on real time climatic data [J]. Agricultural Water Management,2013,117:1-8.
- [6] 陈晓楠,段春青,邱林,等.基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报,2008(3):103-106. (CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, QIU Lin, et al. Application of large scale system model based on particle swarm optimization to optimal allocation of water resources in irrigation areas [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(3):103-106. (in Chinese))
- [7] 方国华,王雪,方应学,等.基于改进粒子群算法的区域水量水质联合配置研究[J]. 水资源保护,2022,38(3):58-64. (FANG Guohua, WANG Xue, FANG Yingxue, et al. Research on joint allocation of regional water quantity and quality based on improved particle swarm algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [8] 张凯,沈洁.基于萤火虫算法和熵权法的水资源优化配置[J]. 水资源保护,2016,32(3):50-53. (ZHANG Kai, SHEN Jie. Optimal allocation of water resources based on firefly algorithm and entropy method [J]. Water Resources Protection,2016,32(3):50-53. (in Chinese))
- [9] REN C, LI Z, ZHANG H. Integrated multi-objective stochastic fuzzy programming and AHP method for agricultural water and land optimization allocation under multiple uncertainties [J]. Journal of Cleaner Production,2019,210:12-24.
- [10] 苑希民,王华煜,李其梁,等.洪泽湖与骆马湖水资源连通分析与优化调度耦合模型研究[J]. 水利水电技术,2016,47(2):9-14. (YUAN Ximin, WANG Huayi, LI Qiliang, et al. Analysis on interconnection between water resources of Hongze Lake and Luoma Lake and study on coupled model for its optimal regulation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(2):9-14. (in Chinese))
- [11] 董增川,陈牧风,倪效宽,等.考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(3):233-240. (in Chinese))
- [12] 李东林,左其亭,张伟,等.基于 Nerlove 方法的塔里木河流域农业水资源配置模型[J]. 水资源保护,2021,37(2):75-80. (LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Wei, et al. Agricultural water resources allocation model in Tarim River Basin based on Nerlove approach [J]. Water Resources Protection,2021,37(2):75-80. (in Chinese))
- [13] 谢新民,李丽琴,周翔南,等.基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护,2019,35(5):6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):6-12. (in Chinese))
- [14] 黄志鸿,董增川,周涛,等.面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(03):202-208. (in Chinese))
- [15] 毕吴瑕,翁白莎,王旭,等.基于知识图谱的旱涝急转研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(6):40-48. (BI Wuxia, WENG Baisha, WANG Xu, et al. Research progress of drought-flood abrupt alternation based on knowledge graph [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):40-48. (in Chinese))
- [16] 郑丽虹,刘懿,任立良,等.黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J]. 水资源保护,2022,38(3):87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection,2022,38(3):87-95. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-11 编辑:彭桃英)