

李茉, 张旭, 许耀文, 等. 基于全过程输水损失的灌区渠系优化配水模型构建: 以长岗灌区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 684-696. LI M, ZHANG X, XU Y W, et al. Construction of optimal water distribution model of canal system in irrigation area based on water loss of whole process transportation: Taking Changgang Irrigation District as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 684-696. (in Chinese)

# 基于全过程输水损失的灌区渠系优化配水模型构建

——以长岗灌区为例

李茉<sup>1,2,3</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 许耀文<sup>1</sup>, 陈颖珊<sup>1</sup>, 张金平<sup>4</sup>, 刘武元<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 智慧农场技术与系统全国重点实验室, 哈尔滨 150030; 4. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为发挥灌区用水调度决策潜能, 以黑龙江省长岗灌区为研究区, 提出一种基于全过程输水损失的灌区渠系优化配水多目标模型, 该模型充分考虑灌区骨干渠系内不同渠段、渠道之间的水量平衡和各级渠道的输水能力, 兼顾渠系输水损失、配水及时性与公平性多目标的协同, 优化决策配水流量与输水历时。此外, 利用随机森林模型预测未来气候变化情境下灌区的供需水量, 基于此, 计算未来气候模式下的渠系输水损失并获得长岗灌区渠系优化配水方案。结果表明: 同一生育阶段内上级渠道不同渠段的输配水损失水量占上级渠道输配水损失总量的比例差异性显著, 任一生育阶段内上级渠道靠近渠首的第一个渠段的输配水损失水量占比最大(返青期、抽穗开花期和乳熟期均为 20.71%、分蘖期为 21.21%、拔节孕穗期为 25.43%); 通过渠系优化配水模型得到长岗灌区作物全生育期渠系输配水总量为 230.51 万 m<sup>3</sup>, 总配水历时为 494.32 h, 输水损失总量为 8.66 万 m<sup>3</sup>, 与灌区采用经验系数法计算的输配水损失水量相比, 输水损失减少 24.89%, 显著提高输配水效率。该模型有助于提供科学、合理的渠系配水方案, 为综合提升灌区水资源管理能力和精细化管理水平提供决策支持。

**关键词:** 输水损失; 渠系优化配水; 多目标协同; 随机森林模型; 气候模式

**中图分类号:** TV213;S274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0071

灌区工程是我国经济社会发展的重要公益基础设施, 在保障粮食安全和促进农村经济发展方面具有重要作用<sup>[1]</sup>。灌溉渠系优化配水和调度模型作为数字孪生灌区专题模型的核心内容, 亟须进一步研究, 以提升其效能<sup>[2]</sup>。根据 2022 年中国水资源公报, 全国供水总量和用水总量均为 5 998.2 亿 m<sup>3</sup>, 其中, 农业用水量为 3 781.3 亿 m<sup>3</sup>, 占比为 63%, 农田灌溉水有效利用系数为 0.572<sup>[3]</sup>。我国农业对水资源需求大且用水效率不高, 不合理的渠系输配水导致水资源浪费, 进一步加剧灌区供需水矛盾。因此, 制定合理的渠系配水方案对提升灌区用水安全和促进灌区可持续发展具有重要意义。

渠系优化配水是通过科学合理调节渠道的配水流量和配水时间, 以满足作物生育期内的需水要求, 是减少渠道渗漏损失、提高渠系水利用效率的重要节水管理措施<sup>[4-5]</sup>。目前, 灌区渠系优化配水模型的研究主要分为两种: 一种是以灌区效益指标最优为目标, 另一种是以灌区水利工程运行管理指标最优为目标<sup>[6]</sup>。作物产量和经济效益最大化是常用的灌区效益指标, 以该类指标最优为目标的渠系优化配水模型考虑要素全面, 但需要准确衡量大量参数, 推广应用受限<sup>[7-8]</sup>。输水损失和缺水量最小化是常用的灌区水利工程运行管理指标, 以该类指标最优为目标的渠系优化配水模型考虑的要素相对集中<sup>[9-11]</sup>。

收稿日期: 2024-01-20 修回日期: 2024-04-09 网络出版时间: 2024-05-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240506.0850.002>

基金项目: 农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放课题(AWR2021001); 黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2022E006); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2020091); 黑龙江省重点研发计划项目(GA23B012)

作者简介: 李茉(1988—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士, 主要从事气候变化环境下农业水土资源高效利用与管理、农业水-能-粮关联系统协同调控、智慧灌溉决策等方面研究。E-mail: limo0828@neau.edu.cn

目前的渠系优化配水仍存在配水不及时和配水不公平的现象,因此,有必要在渠系优化配水建模中考虑多个目标之间的协同<sup>[12]</sup>,以实现灌区渠系输配水的节水性、及时性和公平性最优。

灌溉用水管理需依据每条渠道下农田的灌溉需水量将水资源按时按量地运输到农田,输配的水量直接关系到灌溉服务质量,输配水过多会导致灌区水资源浪费和地下水位上升等一系列问题,反之则导致干旱缺水和作物减产<sup>[13]</sup>,然而,大量的水资源在渠系输配水过程中因输水损失而被浪费。因此,精准地计算输水损失水量尤为重要。目前的渠系优化配水模型仅关注单一级别渠道的输水损失,或者虽然考虑了整个渠系的输水损失却忽略了上级渠道的分流对输水损失流量产生的影响<sup>[14-15]</sup>,导致难以全面准确地表征渠系输水损失的复杂性和全过程特征,进而难以获得客观实际的渠系优化配水方案。

依据未来农业气象条件和灌区供需水量变化合理地确定灌区渠系配水流量与配水时间对于规划未来气候变化下的渠系优化配水方案具有重要作用<sup>[13]</sup>。机器学习算法能够在集成学习方法的基础上发现响应变量和预测变量之间的层次和非线性关系<sup>[16-17]</sup>,是供需水量预测的有效方法。其中,随机森林(random forest, RF)模型由于具有学习过程快速、运算速度快、预测精度高和稳定性好等优点<sup>[18]</sup>,在径流模拟<sup>[19-20]</sup>和洪水预报<sup>[21]</sup>等方面被广泛使用。采用 RF 模型,充分考虑未来气象条件,预测灌区供需水量,对于合理制定灌区配水方案具有重要意义。

综上,本文构建基于全过程输水损失的灌区渠系优化配水多目标模型,该模型基于灌区骨干渠系内不同渠段、渠道之间输水损失的多层级交互关系,通过优化决策配水流量与配水时间达到节水、及时和公平多个目标的协同,从而提高渠系优化配水模型的精确度和实用性。在此基础上,利用 RF 模型,结合世界气候研究计划(world climate research programme, WCRP)的耦合模式比较计划第六阶段(phase 6 of coupled model intercomparison project, CMIP6)中的全球气候模式(global climate models, GCMs) BCC-CSM2-MR 在中等辐射强迫的共享经济社会路径(shared socioeconomic pathways 245, SSP245)下产生的气候变化情景,对灌区供需水量进行预测,获得长岗灌区(Changgang Irrigation District, CID)未来气候变化模式下的渠系配水方案。

## 1 灌区渠系优化配水模型

### 1.1 模型构建

将灌区不同生育阶段的渠系输配水流量和配水时间作为决策变量,以权衡最小化渠系输配水损失水量(节水性最优)、最小化渠系总配水时间(及时性最优)和最小化基尼系数(公平性最优)多个目标之间的矛盾,构建考虑全过程输水损失的灌区渠系优化配水多目标模型。

#### 1.1.1 目标函数

(1)节水性最优。节水性是指在灌溉渠系输配水过程中通过优化水资源利用和管理,减少水资源浪费并提高灌溉效率的能力。通过提高灌区渠系配水系统的节水性,可以在维持农业生产的同时减少对有限水资源的需求,实现可持续发展。减少渠系输水损失可以降低水资源的浪费并提高灌溉效率,从而在相同的用水量下实现更大的灌溉面积,或者在相同的灌溉面积下减少用水量,有利于水资源的合理利用,从而达到节水的目的。此外,在干旱或者水资源紧缺地区的灌区中,减少渠系输水损失对缓解区域水资源压力、确保农业和生态环境的可持续发展更为重要。本文将考斯加科夫经验公式计算的渠系输配水损失水量作为目标函数,确保水资源利用效率的有效提升,其以极小化最优实现节水性目标,具体公式为

$$\min f_1(x) = L_u + L_d = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R q_{u,ir} t_{u,ir} + \sum_{j=1}^J q_{d,j} t_{d,j} \quad (1)$$

式中:  $f_1(x)$  为渠系输配水总损失水量,  $\text{m}^3$ ;  $L_u$  为上级渠道输配水总损失水量,  $\text{m}^3$ ;  $L_d$  为下级渠道输配水总损失水量,  $\text{m}^3$ ;  $i$  为上级渠道渠段序号,  $I$  为上级渠道渠段个数,  $i = 1, 2, \dots, I$ ;  $r$  为输配水时段,  $R$  为输配水总时段,  $r = 1, 2, \dots, R$ ;  $q_{u,ir}$  为上级渠道渠段  $U_i$  在时段  $r$  的输配水损失流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $t_{u,ir}$  为上级渠道渠段  $U_i$  在时段  $r$  的输配水时间,  $\text{s}$ ;  $j$  为下级渠道序号,  $J$  为下级渠道个数,  $j = 1, 2, \dots, J$ ;  $q_{d,j}$  为下级渠道  $D_j$  输配水损失流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $t_{d,j}$  为下级渠道  $D_j$  输配水时间,  $\text{s}$ 。

$$q_{u,ir} = 0.01\beta_{u,i}\gamma_{u,i}A_{u,i}(Q_{u,ir})^{1-m_{u,i}}l_{u,i} \quad (2)$$

$$q_{d,j} = 0.01\beta_{d,j}\gamma_{d,j}A_{d,j}(Q_{d,j})^{1-m_{d,j}}l_{d,j} \quad (3)$$

式中:  $\beta_{u,i}$ 、 $\beta_{d,j}$  分别为上级渠道渠段  $U_i$ 、下级渠道  $D_j$  采取防渗措施后渠床渗漏水量的折减系数;  $\gamma_{u,i}$ 、 $\gamma_{d,j}$  分别为上级渠道渠段  $U_i$ 、下级渠道  $D_j$  的地下水顶托修正系数;  $A_{u,i}$ 、 $A_{d,j}$  分别为上级渠道渠段  $U_i$ 、下级渠道  $D_j$  的渠床土壤透水系数;  $Q_{u,ir}$ 、 $Q_{d,j}$  分别为上级渠

道渠段  $U_i$  末端时段  $r$ 、下级渠道  $D_j$  末端的输配水流量,  $m^3/s$ ;  $m_{u,i}$  和  $m_{d,j}$  分别为上级渠道渠段  $U_i$ 、下级渠道  $D_j$  的渠床土壤透水指数;  $l_{u,i}$ 、 $l_{d,j}$  分别为上级渠道渠段  $U_i$ 、下级渠道  $D_j$  的长度, km。

(2) 及时性最优。及时性是指在灌溉渠系输配水过程中确保水资源在农田灌溉需要时得到及时分配和供应的能力。这涉及有效的水资源管理和灌溉系统的高效运行, 以确保水资源的合理分配和利用。在农业生产中, 及时性对于保障作物生长、提高农业产量和保护生态环境都具有重要意义。本文将渠系总配水时间作为目标函数, 其以极小化最优实现及时性目标, 具体公式为

$$\min f_2(x) = \max(t_{s,d,j} + t_{d,j}) \quad (4)$$

式中:  $f_2(x)$  为渠系输配水总时间, s;  $t_{s,d,j}$  为下级渠道  $D_j$  的开始配水时间, s;  $t_{d,j}$  为下级渠道  $D_j$  的配水历时, s。

(3) 公平性最优。公平性是指在灌溉渠系输配水过程中确保水资源合理分配并满足各方利益的配置原则。在农业灌溉中, 要确保农户公平地获取灌溉用水权益。本文引入基尼系数(值域范围为 [0, 1], 国际惯例把基尼系数 0.2 以下视为绝对均衡, [0.2, 0.3] 视为均衡, [0.3, 0.4] 视为相对合理, [0.4, 0.5] 视为差距较大, 0.5 以上视为分配悬殊, 其值越小表明水资源利用越公平<sup>[22-23]</sup>) 作为目标函数, 确保各级渠道之间在水资源利用方面的公平性, 其以极小化最优实现公平性目标, 具体公式为

$$\min f_3(x) = \frac{1}{2J} \sum_{j=1}^J \frac{Q_{d,j} t_{d,j}}{A_{d,j}} \sum_{c=1}^J \sum_{p=1}^J \left| \frac{Q_{d,c} t_{d,c}}{A_{d,c}} - \frac{Q_{d,p} t_{d,p}}{A_{d,p}} \right| \quad (5)$$

式中:  $f_3(x)$  为公平性目标的值;  $A_{d,j}$  为下级渠道  $D_j$  的控制灌溉面积,  $hm^2$ ;  $c$ 、 $p$  与  $j$  意义相同,  $c$  和  $p$  为 1, 2, ...,  $J$ ;  $\frac{Q_{d,j} t_{d,j}}{A_{d,j}}$  为下级渠道  $D_j$  单位面积的灌溉水量,  $m^3/hm^2$ 。

### 1.1.2 约束条件

(1) 渠道输水能力约束。为保证渠道安全稳定运行, 各级渠道输水流量在任一时段都不得超过设计流量, 该约束条件可表示为

$$Q_{u,ir} + q_{u,ir} \leq Q_{D,u,i} \quad \forall i, r \quad (6)$$

$$Q_{d,j} + q_{d,j} \leq Q_{D,d,j} \quad \forall j \quad (7)$$

式中:  $Q_{D,u,i}$  为上级渠道渠段  $U_i$  的设计流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{D,d,j}$  为下级渠道  $D_j$  的设计流量,  $m^3/s$ 。

(2) 灌溉水量约束。受供需水条件限制, 上级渠道渠首引水量不得超过其供水量, 下级渠道末端灌溉水量等于其需水量, 该约束条件可表示为

$$\sum_{r=1}^R (Q_{u,1r} + q_{u,1r}) t_{u,1r} \leq W_s \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{d,j} t_{d,j} = W_d \quad (9)$$

式中:  $W_s$  为供水量,  $m^3$ ;  $W_d$  为需水量,  $m^3$ 。

(3) 灌溉时间约束。对于任意一条下级渠道  $D_j$ , 其配水开始时间和配水结束时间应在最大允许的渠系输配水周期内, 该约束条件可表示为

$$0 \leq t_{s,d,j} \leq t_{s,d,j} + t_{d,j} \leq 3600T \quad \forall j \quad (10)$$

式中:  $T$  为最大允许的渠系输配水周期, h。

(4) 渠段水量平衡约束。上级渠道渠段  $U_i$  末端时段  $r$  的输配水流量应等于该渠段末端所连的下级渠道  $D_j$  时段  $r$  渠首流量与上级渠道渠段  $U_{i+1}$  时段  $r$  渠首流量之和, 为建立上级渠道渠段  $U_i$  末端时段  $r$  的输配水流量  $Q_{u,ir}$  和该渠段末端所连的下级渠道  $D_j$  末端的输配水流量  $Q_{d,j}$  的联系, 引入了 0~1 变量  $X_{jr}$ , 该约束条件可表示为

$$Q_{u,ir} = \begin{cases} Q_{u,(i+1)r} + q_{u,(i+1)r} + Q_{d,j} X_{jr} + q_{d,j} X_{jr}, & j = i < I \\ Q_{d,j} X_{jr} + q_{d,j} X_{jr}, & j = i = I \end{cases} \quad (11)$$

$$X_{jr} = \begin{cases} 1, t_{s,d,j} \leq 3600r \leq t_{s,d,j} + t_{d,j} & \forall j, r \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $X_{jr}$  为 0~1 变量,  $X_{jr} = 1$  表示下级渠道  $D_j$  在时段  $r$  配水,  $X_{jr} = 0$  表示下级渠道  $D_j$  在时段  $r$  不配水。

(5) 非负约束。决策变量不能为负值, 该约束条件可表示为

$$Q_{u,ir}, Q_{d,j}, q_{u,ir}, q_{d,j}, t_{s,d,j}, t_{d,j} \geq 0 \quad \forall i, j, r \quad (13)$$

## 1.2 随机森林模型

随机森林(RF)模型作为一种源自分类树和决策树的非参数集成学习算法, 能够较好地学习水文气候等变量之间的潜在关系, 对于处理多维数据特征和复杂的数据结构十分有效, 在水文模拟方面得到越来越多的应用<sup>[24-26]</sup>。本文利用 RF 模型预测灌区需水量和供水量。由于预测数据是连续的, 因此采用回归模型, 具体公式为

$$\{h(x, \theta_t), t = 1, 2, \dots, T'\} \quad (14)$$

式中:  $\theta_t$  为生成的独立且同分布的决策树;  $x$  为自变量;  $T'$  为生成的决策树个数;  $h(x, \theta_t)$  为该决策树的预

测值。由于自变量的随机性,每次生成的决策树都不同。利用这种方法,RF 模型可以构建大量决策树,其中每棵树都有一个预测值。RF 模型的最终预测

值是所有这些值的平均值,如式(15)所示,RF 模型计算原理见图 1。使用方差( $R^2$ )、均方根误差( $E_{RMS}$ )和相对均方根误差( $E_{RRMS}$ )来评估模型的性能<sup>[27]</sup>。

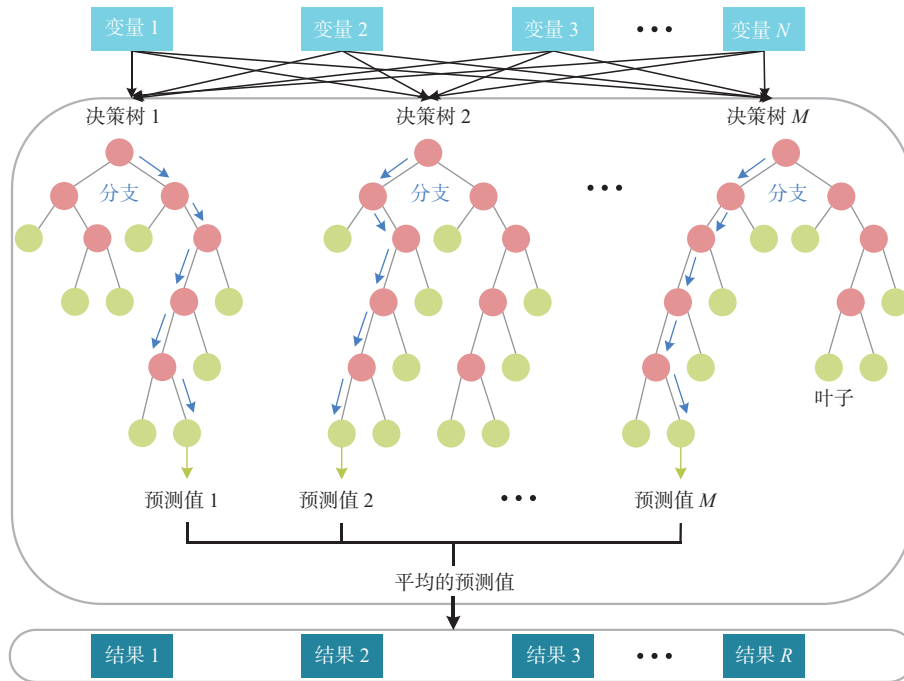


图 1 随机森林模型计算原理

Fig. 1 The random forest model computational principles

$$\overline{h(x)} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \{h(x, \theta_t)\} \quad (15)$$

从 GCMs 中获取未来情景数据,利用统计降尺度模型 NWAI-WG<sup>[28]</sup>,对中等辐射强迫的共享经济社会路径(SSP245)下 BCC-CSM2-MR 2025—2030 年的日气象数据进行降尺度处理后,采用经过训练和评估的 RF 模型模拟未来 2025—2030 年的灌区需水量和供水量。选择 2025 年的灌区需水量和供水量作为优化模型的输入参数。

### 1.3 模型求解方法

构建的优化模型的性质为多目标非线性规划问题,采用非线性隶属度函数对构建模型的目标函数进行表示,引入“max-min”算子和满意度 $\alpha$ ,可将多目标规划模型转化为单目标规划模型,其转化形式为

$$\max \alpha \quad (16)$$

$$\mu[f_k(x)] \geq \alpha \quad k = 1, 2, \dots, K_1 \quad (17)$$

$$\mu[f_k(x)] \geq \alpha \quad k = K_1 + 1, K_1 + 2, \dots, K \quad (18)$$

$$g_j(x) \leq b_j \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (19)$$

$$x \geq 0 \quad (20)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (21)$$

式中: $\mu[f_k(x)]$ 表示非线性隶属度函数; $f_k(x)$ 为第  $k$  个目标函数; $K$ 为目标函数的标量个数; $g_j(x)$ 为第  $j$  个约束; $J$ 为约束标量的总个数; $x$ 为决策变量; $f_k(x)$ 和  $g_j(x)$ 中至少有一个是非线性函数。

对于最大化目标函数,其非线性隶属度函数可表示为

$$\mu[f_k(x)] = \begin{cases} 0 & f_k(x) < [f_k(x)]_{\min} \\ \left\{ \frac{[f_k(x)] - [f_k(x)]_{\min}}{[f_k(x)]_{\max} - [f_k(x)]_{\min}} \right\}^{\psi_1} & [f_k(x)]_{\min} \leq f_k(x) \leq [f_k(x)]_{\max} \\ 1 & f_k(x) > [f_k(x)]_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

对于最小化目标函数,其非线性隶属度函数可表示为

$$\mu[f_k(x)] = \begin{cases} 1 & f_k(x) < [f_k(x)]_{\min} \\ \left\{ \frac{[f_k(x)]_{\max} - [f_k(x)]}{[f_k(x)]_{\max} - [f_k(x)]_{\min}} \right\}^{\psi_2} & [f_k(x)]_{\min} \leq f_k(x) \leq [f_k(x)]_{\max} \\ 0 & f_k(x) > [f_k(x)]_{\max} \end{cases} \quad (23)$$

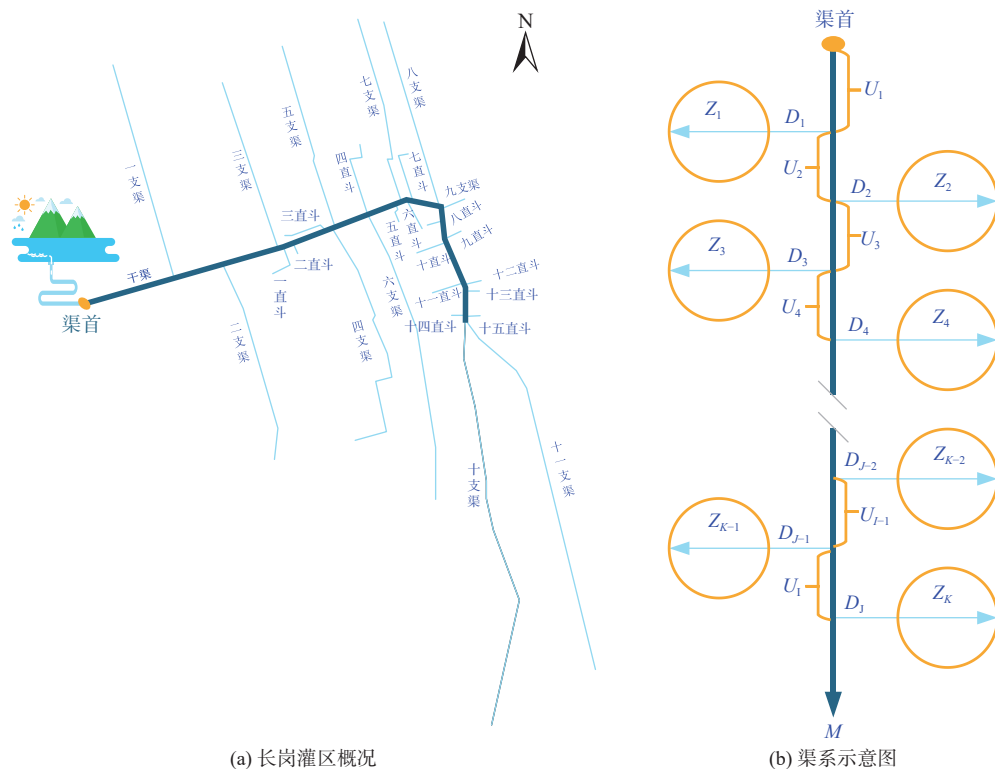
式中: $[f_k(x)]_{\min}$ 和  $[f_k(x)]_{\max}$ 分别为  $f_k(x)$ 的最小值和最大值; $\psi_1, \psi_2$ 为非线性隶属函数的形状系数, $\psi > 0$ 。

## 2 案例分析

### 2.1 灌区概况

选取位于中国东北地区黑龙江省的长岗灌区(CID)为研究对象构建模型。CID 地理坐标为 126°24'E~126°29'E, 46°21'N~46°25'N, 属寒温带半湿

润季风型气候,年平均气温 2.9℃,极端最高气温 37.6℃,极端最低气温-39℃,年均日照时数 2 738 h。CID 现有干渠 1 条,总长 4.59 km,下设支渠 11 条,总长 23.38 km,直斗渠 15 条,总长 4.49 km(图 2),渠床土质属于中壤土,土壤透水性中等。CID 是以呼兰河和地下水为水源的提水灌区,仅对水稻进行灌溉。



M 为上级渠道编号;  $U_i$  为上级渠道渠段编号,  $i = 1, 2, \dots, I$ ;  $D_j$  为下级渠道编号,  $j = 1, 2, \dots, J$ ;  $Z_k$  为灌溉子区编号,  $k = 1, 2, \dots, K$ 。

图 2 长岗灌区渠系

Fig. 2 Canal system for Changgang Irrigation District

### 2.2 模型参数

CID 需水量和供水量数据来自《黑龙江省兰西县长岗灌区水稻节水精准灌溉高标准示范项目可行性研究报告》及实地调研的生产资料。CID 干渠、支渠及直斗渠参数通过报告及实地测量综合确定。采取防渗措施后渠床渗漏水量的折减系数、地下水顶托修正系数、渠床土壤透水指数的取值均参照文献 [29]。模型计算所需基础数据见表 1 和表 2。

## 3 结果与分析

### 3.1 随机森林模型预测性能评估

基于 RF 模型的数据驱动方法来获得未来气候变化情境下精确的灌区需水量和供水量。RF 模型在 R 软件中使用默认设置的“RandomForest”包执行, mtry(每个节点上随机选择的预测变量的数

量)=2, ntree(森林中要生长的树的数量)=500。使用历史气候指标降水、除降水外的其他历史气候指标(日平均气温、日平均风速、饱和蒸汽压、实际蒸汽压和净辐射量等)计算的参考作物蒸散发量以及灌区历史需水量(或历史供水量)来训练 RF 模型。对于 RF 模型的校准和验证,每个数据集随机选择 80% 的数据集用于模型训练,其余 20% 的数据集用于模型性能评估。进行“留一”预测以批判性地评估替代模型的可靠性。研究结果见图 3, RF 模型解释了灌区 78.74% 的需水量方差( $R^2$ )、均方根误差( $E_{RMS}$ )为 12.79  $m^3$ 、相对均方根误差( $E_{RRMS}$ )为 2.83%, 解释了灌区 84.52% 的供水量方差( $R^2$ )、均方根误差( $E_{RMS}$ )为 91.15  $m^3$ 、相对均方根误差( $E_{RRMS}$ )为 2.58%, 表明 RF 模型在水文模拟方面具有良好的性能,该预测值有助于获得客观实际的渠系输配水方案。

表1 长岗灌区干渠、支渠及直斗渠参数

Tab. 1 Parameters of main canal, branch canals and bucket canals in Changgang Irrigation District

渠道	渠道编号	渠道长度/km	设计流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	控制灌溉面积/ $\text{hm}^2$	渠段	渠段编号	渠段长度/km
长岗干渠	$M$	4.585	2.20	999.58	-	-	-
一支渠	$D_1$	2.224	0.21	7.38	渠段1	$U_1$	0.815
二支渠	$D_2$	1.991	0.22	109.07	渠段2	$U_2$	0.482
三支渠	$D_3$	1.574	0.14	76.20	渠段3	$U_3$	0.536
一直斗渠	$D_4$	0.468	0.03	13.09	渠段4	$U_4$	0.042
二直斗渠	$D_5$	0	0.03	1.67	渠段5	$U_5$	0.107
三直斗渠	$D_6$	0.395	0.03	7.19	渠段6	$U_6$	0.342
四支渠	$D_7$	2.422	0.43	84.24	渠段7	$U_7$	0.079
五支渠	$D_8$	1.611	0.21	99.10	渠段8	$U_8$	0.025
四直斗渠	$D_9$	0.469	0.03	12.69	渠段9	$U_9$	0.337
六支渠	$D_{10}$	2.699	0.24	123.25	渠段10	$U_{10}$	0
五直斗渠	$D_{11}$	0.222	0.03	4.20	渠段11	$U_{11}$	0.291
七支渠	$D_{12}$	1.779	0.17	59.37	渠段12	$U_{12}$	0.055
六直斗渠	$D_{13}$	0.316	0.03	5.61	渠段13	$U_{13}$	0.065
七直斗渠	$D_{14}$	0.670	0.03	5.76	渠段14	$U_{14}$	0.053
八支渠	$D_{15}$	1.782	0.16	36.41	渠段15	$U_{15}$	0.266
九支渠	$D_{16}$	0.232	0.03	15.90	渠段16	$U_{16}$	0.046
八直斗渠	$D_{17}$	0.164	0.03	4.31	渠段17	$U_{17}$	0.113
九直斗渠	$D_{18}$	0.295	0.03	6.59	渠段18	$U_{18}$	0.153
十直斗渠	$D_{19}$	0.325	0.03	6.28	渠段19	$U_{19}$	0.043
十一直斗渠	$D_{20}$	0.269	0.03	7.04	渠段20	$U_{20}$	0.414
十二直斗渠	$D_{21}$	0.233	0.03	4.60	渠段21	$U_{21}$	0.009
十三直斗渠	$D_{22}$	0.113	0.03	2.28	渠段22	$U_{22}$	0.062
十四直斗渠	$D_{23}$	0.117	0.03	4.00	渠段23	$U_{23}$	0.215
十五直斗渠	$D_{24}$	0.430	0.03	6.84	渠段24	$U_{24}$	0.007
十支渠	$D_{25}$	3.542	0.72	205.28	渠段25	$U_{25}$	0.028
十一支渠	$D_{26}$	3.523	0.61	91.23	渠段26	$U_{26}$	0

### 3.2 渠系优化配水结果

#### 3.2.1 渠系输配水损失水量

上级渠道分为 26 个渠段, 下设 26 条下级渠道, 依据优化后的配水方案进行配水时, 不同生育阶段渠系输配水损失水量见图 4。在返青期、抽穗开花期和乳熟期上级渠道输配水损失水量和下级渠道输配水损失水量均分别为  $1\,490.7\text{ m}^3$  和  $8\,659.2\text{ m}^3$ , 分别占该阶段总损失水量的 15% 和 85%; 在分蘖期上级渠道输配水损失水量和下级渠道输配水损失水量分别为  $5\,521.5\text{ m}^3$  和  $35\,008.2\text{ m}^3$ , 分别占该阶

段总损失水量的 14% 和 86%; 在拔节孕穗期上级渠道输配水损失水量和下级渠道输配水损失水量分别为  $2\,185.8\text{ m}^3$  和  $13\,424.2\text{ m}^3$ , 分别占该阶段总损失水量的 14% 和 86%。在任一生育阶段内, 可以观察到下级渠道输配水损失水量是上级渠道输配水损失水量的数倍(返青期、抽穗开花期和乳熟期均为 5.81 倍、分蘖期为 6.34 倍、拔节孕穗期为 6.14 倍), 这是因为上级渠道的总长度为 4.585 km, 而下级渠道的总长度为 27.865 km, 下级渠道的总长度远高于上级渠道的总长度; 此外, 灌区上级渠道

的混凝土护面等防渗设施相对完整,而下级渠道的性明显增强,从而显著增加了输配水损失水量。混凝土护面等防渗设施则遭受了损坏,导致其透水

表 2 模型相关基础数据

Tab. 2 Model related basic data

定义	值	备注
输配水总时段 $R/h$	6/12/24	返青期、抽穗开花期和乳熟期的单位均为 6 h; 拔节孕穗期的单位为 12 h; 分蘖期的单位为 24 h
上级渠道渠段 $U_i$ 时段 $r$ 的输配水时间 $t_{u,ir}/s$	$6 \times 3\ 600/12 \times 3\ 600/24 \times 3\ 600$	返青期、抽穗开花期和乳熟期的输配水时间均为 $6 \times 3\ 600$ s; 拔节孕穗期的输配水时间为 $12 \times 3\ 600$ s; 分蘖期的输配水时间为 $24 \times 3\ 600$ s
上级渠道渠段 $U_i$ 采取防渗措施后渠床渗漏水量的折减系数 $\beta_{u,i}$	0.15	
上级渠道渠段 $U_i$ 的地下水顶托修正系数 $\gamma_{u,i}$	0.63	
上级渠道渠段 $U_i$ 的渠床土壤透水系系数 $A_{u,i}$	1.9	
上级渠道渠段 $U_i$ 的渠床土壤透水指数 $m_{u,i}$	0.4	
下级渠道 $D_j$ 采取防渗措施后渠床渗漏水量的折减系数 $\beta_{d,j}$	0.5	
下级渠道 $D_j$ 的地下水顶托修正系数 $\gamma_{d,j}$	0.82	
下级渠道 $D_j$ 的渠床土壤透水系系数 $A_{d,j}$	1.9	
下级渠道 $D_j$ 的渠床土壤透水指数 $m_{d,j}$	0.4	
最大允许的渠系输配水周期 $T/h$	72/144/288	返青期、抽穗开花期和乳熟期的周期均为 72 h; 拔节孕穗期的周期为 144 h; 分蘖期的周期为 288 h

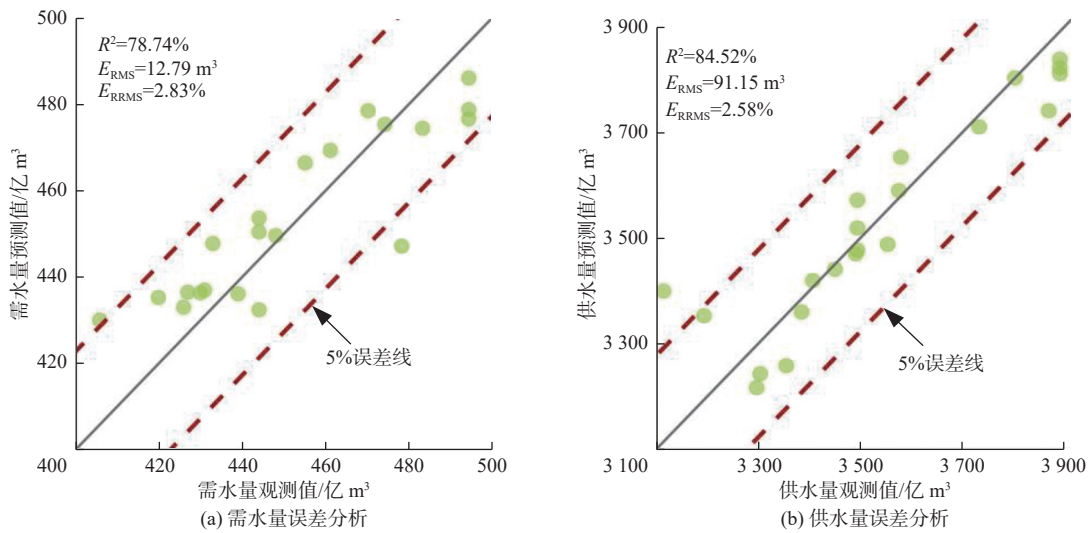


图 3 需水量及供水量误差分析

Fig. 3 Error analysis of water demand and water supply

在作物全生育期渠系输配水损失总量为 8.66 万  $m^3$ , 若以经验系数法来计算输水损失, 则输水损失为 11.53 万  $m^3$  (经验系数取 0.95)。从数据上看, 这 2 种计算方法得出的输水损失量差异较大, 达到了 2.87 万  $m^3$ 。此外从图 4 中还可以观察到, 任一生育阶段内上级渠道相同渠段的输配水损失水量占

上级渠道输配水损失总量的比例几乎相同。然而, 同一生育阶段内上级渠道不同渠段之间的输配水损失水量占上级渠道输配水损失水量的比例存在显著差异。在任一生育阶段内, 上级渠道中渠段 1 的输配水损失水量占上级渠道输配水损失水量的比例最大(返青期、抽穗开花期和乳熟期均为

20.71%、分蘖期为 21.21%、拔节孕穗期为 25.43%), 仅考虑渠段 1、渠段 2、渠段 3 和渠段 6 这 4 个渠段的输配水损失水量所占比例(返青期、抽穗开花期和乳熟期均为 53.71%、分蘖期为 54.37%、拔节孕穗期为 59.04%)就超过了 50%; 下级渠道中的六支渠、十支渠和十一支渠的输配水损失水量之和占下级渠道输配水损失水量的比例较大(返青期、抽穗开

花期和乳熟期均为 60.92%、分蘖期为 60.77%、拔节孕穗期为 53.47%)。因此,在规划建设高标准的防渗设施时,可以优先考虑上级渠道的渠段 1、渠段 2、渠段 3 和渠段 6,以及下级渠道的六支渠、十支渠和十一支渠的建设。上述结果表明,考虑了全过程输水损失的灌区渠系优化配水模型可提供更客观实际的配水方案。

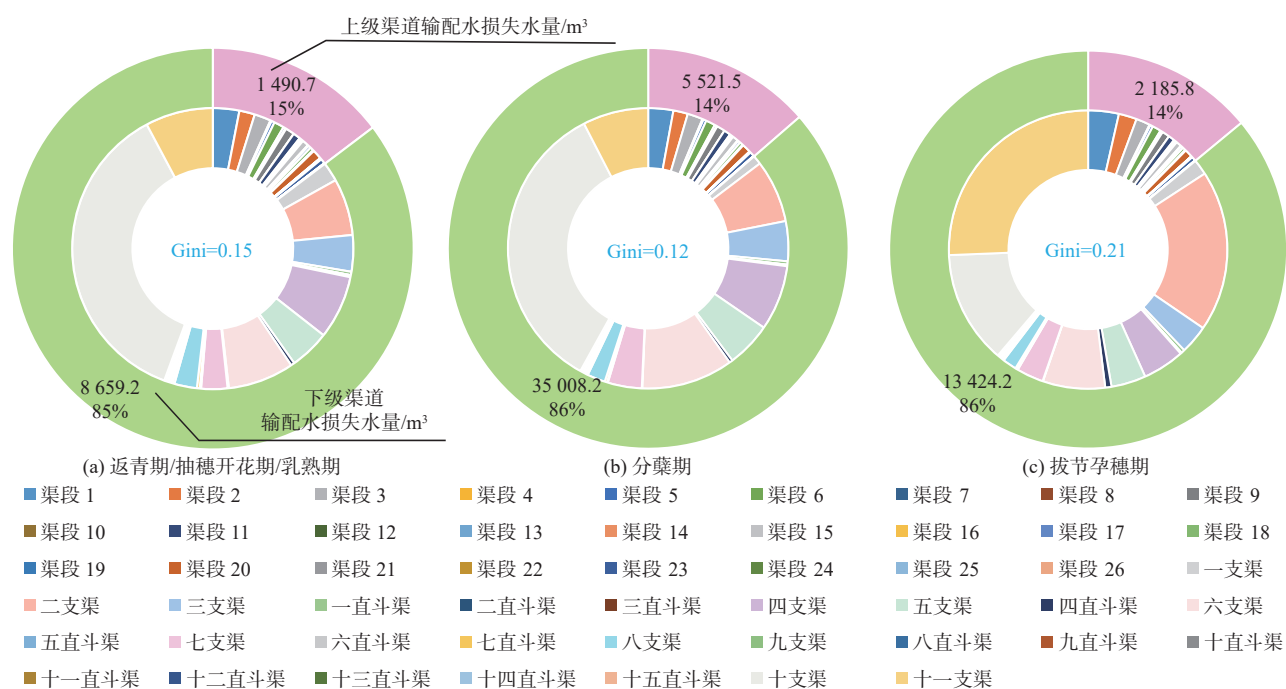


图4 不同生育阶段渠系输配水损失水量

Fig. 4 Water loss of canal system in different growth stages

从灌溉渠系输配水过程中确保水资源合理分配并满足各方利益的角度来看,返青期、抽穗开花期和乳熟期的基尼系数均为 0.15,分蘖期的基尼系数为 0.12,配水处于绝对均衡状态,拔节孕穗期的基尼系数为 0.21,配水处于均衡状态,确保了各级渠道之间在水资源利用方面的公平性,实现了公平性目标。

### 3.2.2 渠系输配水时间与流量

灌区上级渠道不同生育阶段的配水历时为 26 条下级渠道不同生育阶段配水结束时间的最大值。如图 5 所示,在分蘖期,一支渠从 135.02 h 开始配水、十支渠从 17.87 h 开始配水,而在其余各生育阶段,下级渠道均从 0 h 开始配水。整个灌区在全生育期总配水历时为 494.32 h,与全生育期最大允许的渠系输配水周期相比,配水历时缩短了 153.68 h,确保了水资源在农田灌溉需要时得到及时分配和供应,实现了及时性目标。通过优化得到 CID 的渠系配

水方案为:在返青期、抽穗开花期和乳熟期,上级渠道的配水量均为 27.11 万  $m^3$ ,配水历时均为 48.74 h,最大配水流量均为 2.20  $m^3/s$ (0~6 h),最小配水流量均为 0.69  $m^3/s$ (42~48 h);在分蘖期,上级渠道的配水量为 108.45 万  $m^3$ ,配水历时为 216 h,最大配水流量为 2.20  $m^3/s$ (0~24 h),最小配水流量为 0.02  $m^3/s$ (192~216 h);在拔节孕穗期,上级渠道的配水量为 40.73 万  $m^3$ ,配水历时为 132.10 h,最大配水流量为 2.20  $m^3/s$ (0~12 h),最小配水流量为 0.22  $m^3/s$ (120~132 h)。

图 6 为不同生育阶段下级渠道输配水流量,所有渠道配水流量和损失流量均满足设计流量要求,大部分渠道的配水流量在设计流量的 60%~100%,确保了渠道的安全稳定运行。此外,大流量运行充分发挥了渠道工程能力,同时保障了渠道高效率运行。图 6 显示,一支渠、四支渠和十一支渠的设计流量虽然比较大,可以实现短时间快速配水,但是



实际配水流量占设计流量的比例却较小,这是该模型在综合考虑全灌区节水性、及时性和公平性等多个优化目标之间的矛盾后,得出的结果。

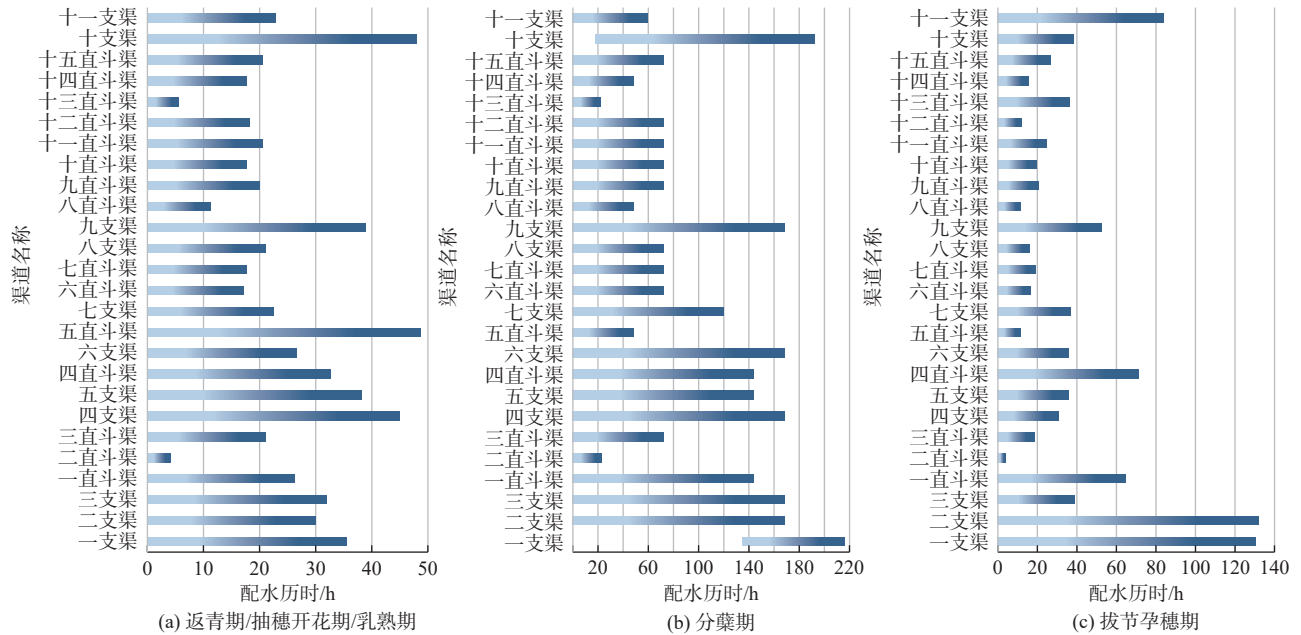
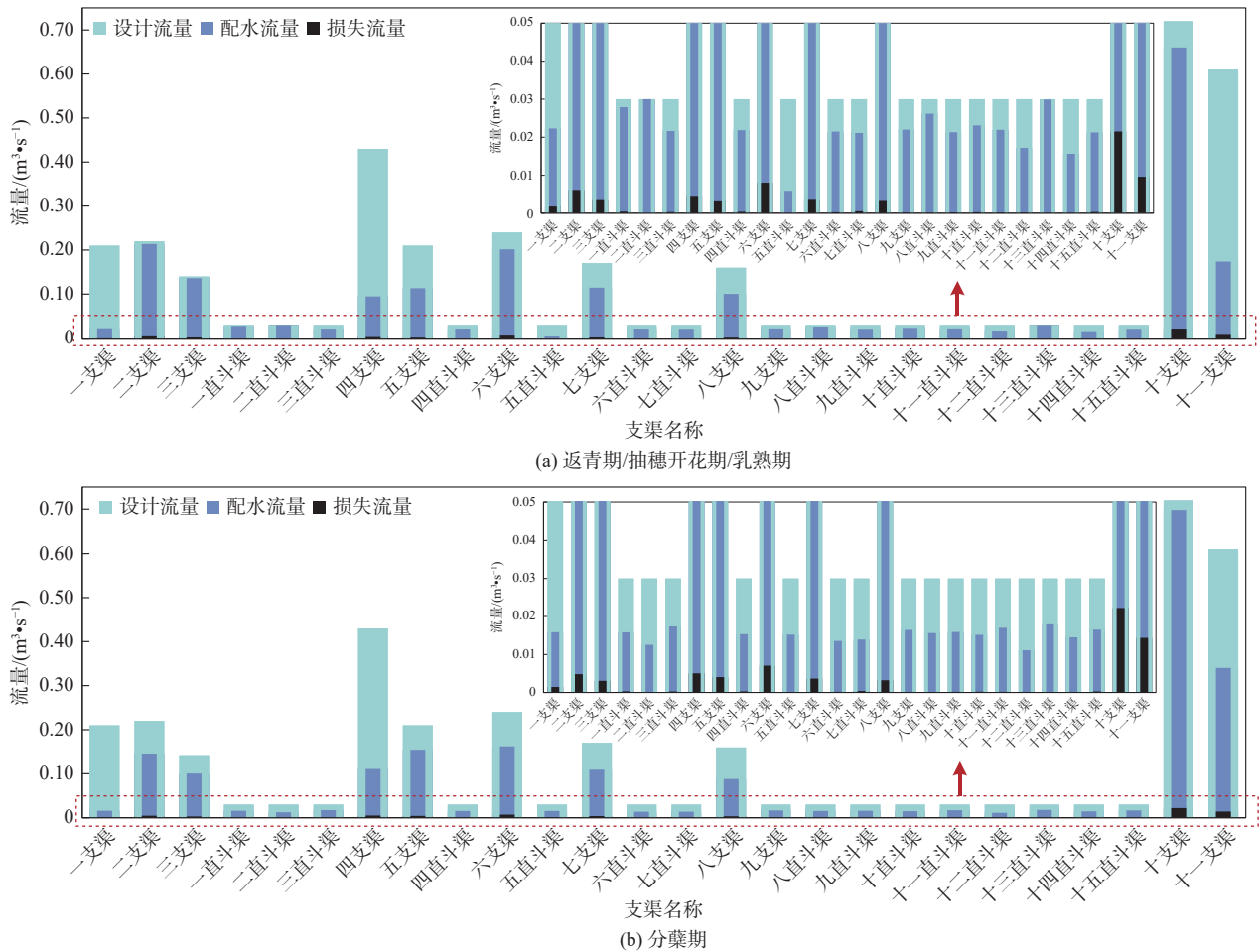


图 5 不同生育阶段下级渠道输配水历时

Fig. 5 Duration of water transfer and distribution in lower channels in different growth stages



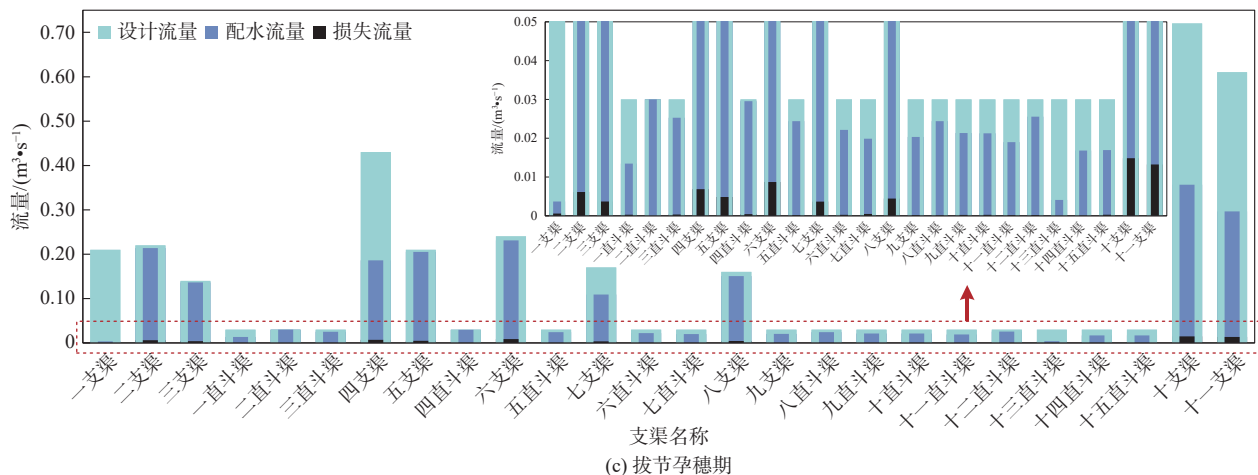


图6 不同生育阶段下级渠道输配水流量

Fig. 6 Water transfer and distribution flows in lower channels in different growth stages

## 4 结论

本文构建了基于全过程输水损失的灌区渠系优化配水多目标模型,该模型充分考虑了灌区骨干渠系内不同渠段、渠道之间的水量平衡,以最小化渠系输配水损失水量、最小化渠系总配水时间和最大化水量分配公平性为目标函数,同时利用RF模型预测了未来气候变化情境下灌区供需水量,并将其作为模型输入,精准地计算了渠系输水损失,获得了CID 2025年的渠系配水方案。结论如下:

在任一生育阶段内,上级渠道中渠段1、渠段2、渠段3和渠段6的输配水损失水量之和占上级渠道输配水损失水量的比例(返青期、抽穗开花期和乳熟期均为53.71%、分蘖期为54.37%、拔节孕穗期为59.04%)和下级渠道中的六支渠、十支渠和十一支渠的输配水损失水量之和占下级渠道输配水损失水量的比例(返青期、抽穗开花期和乳熟期均为60.92%、分蘖期为60.77%、拔节孕穗期为53.47%)均超过了50%。因此,在规划建设高标准的防渗设施时,建议灌区主管部门可以优先考虑上级渠道的渠段1、渠段2、渠段3和渠段6,以及下级渠道的六支渠、十支渠和十一支渠的建设,以优化灌区水资源配置,减少输水损失。

考虑了全过程输水损失,通过优化得到CID作物全生育期渠系输配水损失总量为8.66万 $\text{m}^3$ ,与灌区采用经验系数法计算的输配水损失水量相比,输水损失减少了24.89%,显著提高了输配水效率,并提供了科学合理的渠系配水方案。

CID的渠系优化配水方案为:在返青期、抽穗开花期和乳熟期,上级渠道的配水量均为27.11万 $\text{m}^3$ ,

配水历时均为48.74 h,最大配水流量均为2.20  $\text{m}^3/\text{s}$  (0~6 h),最小配水流量均为0.69  $\text{m}^3/\text{s}$  (42~48 h);在分蘖期,上级渠道的配水量为108.45万 $\text{m}^3$ ,配水历时为216 h,最大配水流量为2.20  $\text{m}^3/\text{s}$  (0~24 h),最小配水流量为0.02  $\text{m}^3/\text{s}$  (192~216 h);在拔节孕穗期,上级渠道的配水量为40.73万 $\text{m}^3$ ,配水历时为132.10 h,最大配水流量为2.20  $\text{m}^3/\text{s}$  (0~12 h),最小配水流量为0.22  $\text{m}^3/\text{s}$  (120~132 h)。

本文构建的模型用以解决灌区渠系优化配水问题,可应用于其他缺水型灌区,为灌区农业水资源的高效合理利用提供决策支持。在未来的研究中,有必要综合考虑干渠-支渠-斗渠-农渠的全渠系配水,并深入探讨多级渠道对水资源分配的多重影响。

### 参考文献:

- [1] 李茉,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. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.18.008.
- [2] 罗朝林,孟庆魁,陈武奋,等. 数字孪生灌区精细化水量调控关键技术研究与应用[J]. 人民珠江, 2024, 45(4): 33-39.
- [3] 2022年中国水资源公报[J]. 水资源开发与管理, 2023,9(7):2. [http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202306/t20230629\\_1672395.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202306/t20230629_1672395.html).
- [4] 安静,庞树江,王小胜,等. 基于供水风险的灌溉水资源多目标优化配置模型[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(9): 100-111. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.010.
- [5] FAN Y, CHEN H, GAO Z, et al. A model coupling

- water resource allocation and canal optimization for water distribution[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(3): 1341-1365. DOI: [10.1007/s11269-023-03437-9](https://doi.org/10.1007/s11269-023-03437-9).
- [6] 时荣超, 郭文忠. 农业灌溉水资源优化配置研究进展[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(4): 1-13.
- [7] 潘琦, 郭萍, 张帆, 等. 考虑渠道渗漏的黄羊灌区农业水资源多目标优化配置研究[J]. *水资源与水利工程学报*, 2020, 31(4): 166-173. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.24](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.24).
- [8] 何春燕, 何新林, 蒲胜海, 等. 基于作物水分生产函数的渠系优化配水模型[J]. *人民长江*, 2008(11): 36-38. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2008.11.042](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2008.11.042).
- [9] 韩宇, 邵梦璇, 李彤姝, 等. 河套灌区渠系优化配水模型应用研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(10): 999-1006. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8530.21.0049](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.21.0049).
- [10] 马建琴, 赵子伟. 基于需水过程的灌区实时渠系优化配水模型及应用[J]. *人民黄河*, 2021, 44(5): 153-156. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.05.030).
- [11] AZARGASHB LORD S, HASHEMY SHAHDANY S M, ROOZBAHANI A. Minimization of operational and seepage losses in agricultural water distribution systems using the ant colony optimization[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(3): 827-846. DOI: [10.1007/s11269-020-02744-9](https://doi.org/10.1007/s11269-020-02744-9).
- [12] 刘照, 程帅, 李华朋, 等. 基于双层粒子群算法的下级渠道流量不等时渠系优化配水[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 88-93. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2017.03.14](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2017.03.14).
- [13] 廖相成, 胡铁松. 基于输水损失动态变化特性的渠系优化配水模型研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(7): 850-861. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200828](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200828).
- [14] FAN Y, CHEN H, GAO Z, et al. Canal water distribution optimization model based on water supply conditions[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 205: 107565. DOI: [10.1016/j.compag.2022.107565](https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107565).
- [15] 沈来银, 胡铁松, 周姗, 等. 基于SHAW模型的河套灌区秋浇渠系优化配水模型研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(4): 458-467. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20190630](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20190630).
- [16] FENG P, WANG B, LIU D L, et al. Machine learning-based integration of large-scale climate drivers can improve the forecast of seasonal rainfall probability in Australia[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(8): 084051. DOI: [10.1088/1748-9326/ab9e98](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e98).
- [17] 鞠琴, 吴金雨, 王兴平, 等. 机器学习算法在气候模式降水和气温集成中的应用[J/OL]. *水资源保护*, 2023: 1-14. (2023-10-13)<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20231011.1409.002.html>.
- [18] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 I: 干旱传播含义、特征、类型与研究方法[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 625-653. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0064](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0064).
- [19] 王艺璇, 刘夏, 沈彦军. 随机森林模型在径流变化归因分析中的适用性研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(5): 864-874. DOI: [10.12357/cjea.20210652](https://doi.org/10.12357/cjea.20210652).
- [20] MIAO J, ZHANG X, ZHANG G, et al. Applications and interpretations of different machine learning models in runoff and sediment discharge simulations[J]. *Catena*, 2024, 238: 107848. DOI: [10.1016/j.catena.2024.107848](https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107848).
- [21] TANG Y, SUN Y, HAN Z, et al. Flood forecasting based on machine learning pattern recognition and dynamic migration of parameters[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 47: 101406. DOI: [10.1016/j.ejrh.2023.101406](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101406).
- [22] LI M, XU Y, FU Q, et al. Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124888. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.124888](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124888).
- [23] HU Z, WEI C, YAO L, et al. A multi-objective optimization model with conditional value-at-risk constraints for water allocation equality[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 330-342. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.012).
- [24] 邸苏闯, 李卓蔓, 刘玉, 等. 基于气象雷达反演和云图外推法的临近期降雨预报方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(5): 13-21. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.05.002](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.05.002).
- [25] CARDENAS-MERCADO L, ESCOBAR-VARGAS J, PÉREZ-MONTIEL J I, et al. Integration of physically-based numerical tools and socio-hydrological variables in urban flood modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129974. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2023.129974](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129974).

- 2023.129974.
- [26] 夏志恺,董晓华,马耀明,等. 淮河息县流域不同土地利用类型的水沙贡献率研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(12): 128-138. DOI: [10.12396/znsd.230852](https://doi.org/10.12396/znsd.230852).
- [27] WUNSCH A, LIESCH T, BRODA S. Groundwater level forecasting with artificial neural networks: A comparison of long short-term memory (LSTM), convolutional neural networks (CNNs), and non-linear autoregressive networks with exogenous input (NARX)[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(3): 1671-1687. DOI: [10.5194/hess-25-1671-2021](https://doi.org/10.5194/hess-25-1671-2021).
- [28] LUO N, MENG Q, FENG P, et al. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2637. DOI: [10.1038/s41467-023-38355-2](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38355-2).
- [29] 郭元裕. 农田水利学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

## Construction of optimal water distribution model of canal system in irrigation area based on water loss of whole process transportation: Taking Changgang Irrigation District as an example

LI Mo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, XU Yaowen<sup>1</sup>, CHEN Yingshan<sup>1</sup>, ZHANG Jinping<sup>4</sup>, LIU Wuyuan<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory of Efficient Use of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. National Key Laboratory of Smart Farm Technology and System, Harbin 150030, China; 4. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Irrigation districts usually have characteristics of a high water demand and low water use efficiency, and irrational canal system transmission and distribution schemes lead to water waste, further aggravating the contradiction between water supply and demand in irrigation districts. The optimal water distribution model of canal system should provide scientific and effective methods and tools for formulating optimal water distribution schemes of canal system to cope with future climate change, so as to support the efficient allocation of water resources in irrigation districts.

Based on this, the Changgang Irrigation District of Heilongjiang Province is taken as the research area, and a multi-objective model for optimizing water distribution of irrigation canal system is proposed based on the whole process of water transmission loss. The model fully considers the water balance, irrigation time, irrigation water volume and canal water conveyance capacity between different canal sections in the main canal system of the irrigation district, and takes into account the three objectives of water saving, timeliness and fairness in the process of water transmission and distribution in the canal system of the irrigation district. At the same time, the Random Forest model was used to predict the water supply and demand of the irrigation district under future climate change scenarios, which was used as a model input to accurately calculate the loss of canal transmission, and to obtain an objective and practical optimal water distribution scheme for the canal system in Changgang Irrigation District.

The results showed that the proportion of water loss from transmission and distribution to the total water loss from transmission and distribution of the upper channel in different canal sections of the upper channel within the same fertility stage was significantly differentiated, and the first canal section of the upper channel close to the head of the canal within any fertility stage accounted for the largest proportion of water loss from transmission and distribution. Through the canal system optimization water distribution model, the total amount of canal system water transmission and distribution in Changgang Irrigation District during the whole crop fertility stage was 2,305,100 m<sup>3</sup>, the total water distribution time was 494.32 h, and the total amount of water loss in transmission and distribution was 86,600 m<sup>3</sup>, which was 24.89% less than the amount of water lost in transmission and distribution calculated by the empirical coefficient method in the irrigation district, and it significantly improved the efficiency of water transmission and distribution. When planning and constructing high-standard seepage control facilities, it is

suggested that the competent authority of the irrigation district may give priority to the construction of canal section 1, canal section 2, canal section 3 and canal section 6 of the upper channel and the six, ten and eleven branches of the lower channel to optimize the allocation of water resources in the irrigation district and to reduce the loss of water transmission.

It is shown that the model helps to provide scientific and reasonable canal system water distribution scheme, realizes the synergistic enhancement of water conservation, timeliness and fairness in the process of canal system water transmission and distribution in the irrigation district, and can be applied to other water-scarce irrigation districts, so as to provide decision-making support for comprehensively enhancing the capacity of water resources management and the level of refined management in irrigation districts.

**Key words:** water transport loss; optimization of water distribution in canal system; multi-objective synergy; random forest model; climate model



摄影|曲帅超