

用分布式水循环模型与机器学习预测内蒙古河套灌区节水潜力

赵晶¹, 段晶晶¹, 王涛¹, 毕彦杰^{2*}, 高峰¹

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 郑州 450046; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要:为探究内蒙古河套灌区真实节水潜力, 该研究构建河套灌区分布式水循环模型与基于机器学习的盐分模型, 设置节水方案集, 定量分析各方案下的灌区引、耗水量、地下水埋深、积盐量变化等。结果表明: 1) 水面蒸发的纳什系数均不低于 0.654, 相对误差绝对值不高于 4.82%, 相关关系为 0.88, 排水过程纳什系数均不低于 0.600, 相对误差绝对值不高于 5.11%, 相关关系为 0.82, 地下水埋深的纳什系数均不低于 0.628, 相对误差绝对值不高于分别为 5.12%, 相关关系为 0.86, 满足灌区水循环满足精度要求。该研究选择采用土壤盐分模型, 得到土壤积盐量与实测值的纳什系数均不低于 0.76, 满足精度要求。2) 渠道衬砌节水方案 S1、田间节水调控方案 S2、种植结构调整方案 S3 的耗水节水量分别为 2.93 亿、3.02 亿和 2.54 亿 m³。S1+S2+S3 组合方案灌区耗水节水量最多, 为 9.11 亿 m³, S2+S3 方案组合次之。3) 渠系水利用系数提高, 将引起地下水水位下降, 不利于排盐, S1 方案下地下水埋深大于 3 m 的面积比例较基准方案增加了 7.59%, 不利于灌区排盐。田间工程措施使得相应的农田入渗量减少, 地下水水位下降, 有利于灌区脱盐, S2 方案下地下水入渗补给量较基准方案减少 2.57 亿 m³, 灌区地下水水位下降较为明显, S2 方案有利于灌区脱盐。S3 方案下地下水入渗补给量略微减少, 地下水水位变化不大, 有利于灌区脱盐。不同方案组合, S1+S2、S1+S2+S3 方案下对地下水埋深影响较大, 尤其是 S1+S2+S3 方案在灌区西北部、山前、乌拉特前旗、乌梁素海东部的形成连片埋深高值区, 影响区域生育期农田作物与林草地植被生长。S1+S2 方案下不利于灌区脱盐, 自然植被生育期平均埋深超过 2.5 m 的比例较基准方案增加了 5.46%。在综合考虑生态环境的约束下, 推荐耗水节水量最大的方案 S2+S3, 即灌区适宜的耗水节水潜力为 5.69 亿 m³。该方案下虽然也会引起地下水水位略有下降、进乌梁素海排入水量略微减少, 但最有有利于灌区排盐。研究可为引黄灌区节水方案制定与灌溉管理提供技术支撑。

关键词:地下水; 盐; 机器学习; 分布式水循环模型; 耗水节水量; 河套灌区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202209192

中图分类号: S274

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-16-0089-10

赵晶, 段晶晶, 王涛, 等. 用分布式水循环模型与机器学习预测内蒙古河套灌区节水潜力[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 89-98. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202209192 <http://www.tcsae.org>

ZHAO Jing, DUAN Jingjing, WANG Tao, et al. Prediction of water-saving potential in Inner Mongolia Loop using distributed water cycle model and machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 89-98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202209192 <http://www.tcsae.org>

0 引言

至 2022 年底, 中国大中型灌区有 7 000 多处, 有效灌溉面积 3.47 亿 hm², 是中国粮食和重要农产品主产区, 是国家粮食安全的重要保障^[1]。2021 年, 黄河流域总用水量 389.3 亿 m³, 其中农田灌溉用水量占比 66.0%, 高于全国平均水平的 61.6%。近年来黄河上中游的梯田、淤地坝、退耕还林还草等措施使得黄河径流量显著减少^[2], 干旱缺水已成为黄河流域农业可持续发展的刚性约束, 节水已迫在眉睫。黄河流域节水的重点在于农业, 农业节水的重点在于引黄灌区, 河套灌区是黄河流域最大的灌区, 是国家重要粮食生产基地和西部重要生态保护屏障。高强度水资源开发利用与人类活动深刻影响着河套灌区下垫面条件, 科学而深刻地认识灌区水循环过

程是理清灌区节水潜力的前提^[3]。

目前, 学术界对节水潜力尚未形成一个统一、公认的定义和概念。雷波等^[4]认为灌区节水潜力可分为“工程节水量”和“真实节水量”两种。崔远来等^[5]提出了净节水量的概念, 认为传统方法计算出来的节水潜力减去节水措施前后回归水量的差值后才是净节水量。裴源生等^[6]提出耗水节水的概念, 认为真实的节水潜力应同时包含取用水节水和耗水节水, 耗水节水量体现了区域真正的节水潜力。RAEISI 等^[7]认为农业节水不应减少灌溉回水量对地下水补给或生态环境流量补给。KARIMOV 等^[8]认为农业真实节水的重点在于减少蒸散量。

关于农业节水潜力的确定方法众多学者从多角度进行了研究。傅国斌等^[9]将某一基准年的实际灌溉用水量和非充分灌溉条件下灌溉需水量的差值作为理论节水潜力。彭致功等^[10]构建了区域作物水分生产函数, 通过确定主要作物蒸腾蒸发量定额计算了耗水节水潜力。TORNQVIST 等^[11]利用分布式水文模型研究了中亚咸河流域灌溉技术改进的节水效应。顾文权等^[12]采用可变渗透能力(variable infiltration capacity, VIC)水文模型分析种植结构调整后汉江流域的真实节水潜力。吴迪等^[13]构建土壤水评价(soil and water assessment tool, SWAT)

收稿日期: 2022-09-23 修订日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009042); 河南省自然科学基金项目(222300420231)

作者简介: 赵晶, 博士, 讲师, 研究方向为节水、水循环模拟与水资源配置与规划。Email: zhaojing19870515@163.com

*通信作者: 毕彦杰, 博士, 讲师, 研究方向为流域水循环模拟与实验、气候变化。Email: 835938470@qq.com

模型,分析湖北漳河灌区杨树岗流域的节水潜力。以往节水潜力研究多针对取用水节水,部分文献针对耗水节水,但未考虑节水后对区域地下水埋深与生态环境系统的影响。此外以往灌区节水潜力研究对土壤中盐分变化考虑不足。已有的土壤水盐运移模型大多依赖于复杂的物理过程机理^[14],模型求解过程中边界条件复杂、计算参数众多且难以率定等问题限制了模型的应用,而且水盐运移的非线性和突变性会降低这些机理模型的准确性和可靠性,且灌区水盐运移的复杂机理也尚未完全理清^[15]。基于数据驱动的统计模型更具优势,伴随机器学习理论及技术的发展,此类模型逐渐在模拟土壤水盐运移方面得到认可^[16]。

内蒙古河套灌区降水少蒸发大,长期引黄灌溉形成了适应区域引排水条件的独特生态格局。引黄水已经成为维系河套灌区经济-社会-生态系统健康发展的重要命脉。合理的地下水埋深是维持灌区及其周边绿洲的重要保障,大规模节约用水必然改变灌区水循环通量、土壤水下渗规律,影响地下水埋深,进而可能对河套灌区及其周边植被生长、地下水补水量与面积、土壤含盐量等带来深远影响。因此,本文构建灌区分布式水循环模型、基于机器学习的土壤盐分模型,设置节水方案集,定量分析各方案下的灌区引耗水量、地下水埋深、土壤积盐量等变化,对比分析各方案,在地下水埋深、盐分平衡约束下选择灌区耗水节水量最大的方案作为灌区的真实节水潜力,以期对引黄灌区节水方案制定与灌溉管理提供技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区地处中国西北干旱半干旱区,降雨少,蒸发强烈,易发生干旱,春旱尤其严重,必须靠灌溉发展农业^[17]。千百年来,内蒙古河套灌区由于其地形地势、气候特征等形成了独特的引水和排水渠系网络。灌区引水系统包括总干渠1条,干渠13条,分干48条,支渠204条,以及复杂的斗区、农渠和毛渠共七级引水渠系;排水系统包括总排水干沟1条,干沟12条,分干沟59条,支沟210条,以及更小的排水沟^[17]。1999年10月内蒙古自治区确定分配给河套灌区的引黄指标将由52亿 m^3 减至40亿 m^3 ^[18],给河套灌区的工农业发展带来了巨大挑战,农业节水势在必行。

1.2 模型构建

1.2.1 灌区分布式水循环模型

以数字高程模型(digital elevation model, DEM)节点为中心,将灌区划分为若干个网格,各个网格内依据水量平衡进行水循环过程的模拟。各级引水渠道将水从河道引出输送到田面上,将原来在河道中的汇流过程改变为分散过程。各级排水沟将水从最末一级排水沟引入干沟进行汇流,可看作是一个人工控制的汇流工程。打井抽水灌溉改变地下水的径流时空分布过程,将地下水资源通过集中的抽水分布在田面上。此外田埂(田块)、田面平整、滴灌微灌等灌溉方式、耕种方式、保墒技术、种植作物类型等均改变了降水或灌溉水在田面上的蒸发、下渗、汇流方向和产流量。灌区水循环系统概化图如图1所示。

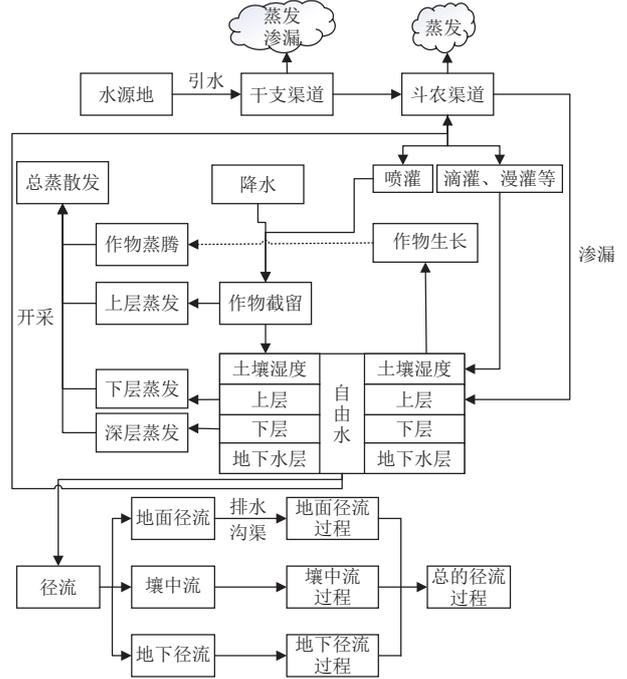


图1 灌区水循环系统概化图

Fig.1 Schematic diagram of hydrological cycle system in irrigated area

1) 蒸散发模拟

考虑3种类型的蒸散发:植被蒸腾、冠层蒸发、裸地蒸发。蒸散发计算需输入蒸发器实测水面蒸发和流域蒸散发能力的折算系数。

2) 土壤水运动模拟

各土层间的非饱和土壤水分运动规律满足达西定律,利用一维Richards方程来描述水分由上层土壤到下层土壤的垂向运动过程,当土壤含水量大于孔隙度时,水力传导度为常数,否则,水力传导度 $K(\text{m/d})$ 是随土壤基质势(或土壤含水率)变化的函数,即非饱和土壤水运移的达西定律^[19]为

$$q = -K(h) \cdot \nabla H \quad (1)$$

或

$$q = -K(\theta) \cdot \nabla H \quad (2)$$

式中 q 为下渗流量, m^3/s ; θ 为土壤体积含水率, cm^3/cm^3 ; h 为土壤基质势, kPa ; ∇H 为水力梯度, m/m ; $K(\theta)$ 和 $K(h)$ 为分别为土壤含水率和土壤基质势的水力传导度函数。

由于 $K(h)$ 受滞后影响较大,式(1)仅适用于单纯的吸湿或脱湿过程,但式(1)可有效地避免滞后作用。滞后现象表现为对于同样质地和结构的土壤,即使在恒温条件下,对于吸水和脱水过程,负压(吸力)与含水率的关系曲线是不同的。本文土水势不考虑气压势、温度势及溶质势,只包括重力势和基质势。因此,总水头以位置水头和压力水头之和表示。

土壤的水分特征曲线与水力传导度之间有密切关系,通过不同的非饱和水力参数将水力传导度和水分特征曲线联系起来。本文利用Brooks-Corey模型(BC模型)描述土壤水分特征曲线和水力传导度之间的关系^[19]:

$$S(\theta) = [\alpha \cdot |\gamma(\theta)|]^{-p_d} \quad (3)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot S(\theta)^{\frac{2}{p_d}+3} \quad (4)$$

$$S(\theta) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

式中 θ_r 、 θ_s 表示残留含水率和饱和含水率， cm^3/cm^3 ； K_s 为饱和水力传导度， m/d ； $S(\theta)$ 为饱和度，无量纲； γ 为土壤负压， m ； p_d 为土壤颗粒分布大小参数，无量纲； α 为多孔介质进气值的倒数， m^{-1} 。

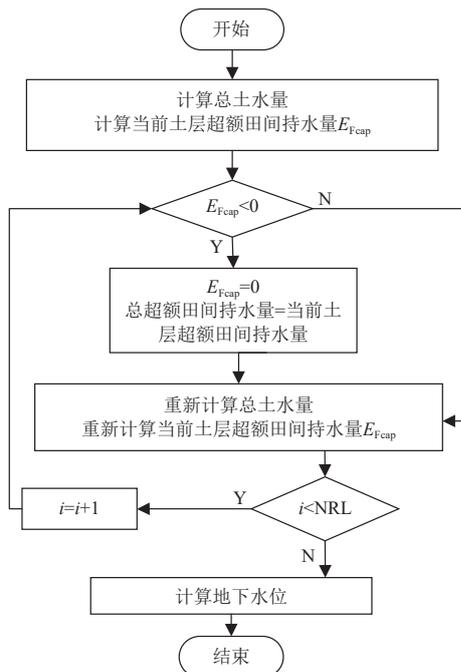
$$Q_v = \frac{1}{2} [q_v(\theta^t) + q_v(\bar{\theta})] \quad (6)$$

式中 Q_v 为单位步长时段内的入渗水分通量， m^3/s ； $\bar{\theta}$ 为累计上层入渗量后当前土层含水率，即残留含水率，%； θ^t 为 t 时刻土壤体积含水率， cm^3/cm^3 ； q_v 为沿竖直方向单位时间步长的土壤水分通量， m^3/s 。

3) 地下水埋深计算

非饱和带采用分层土壤模型进行土壤水模拟。当模型对计算网格内的土壤水模拟时，首先对各层土壤向其上层土壤运移水量进行计算，为便于计算，在向上水分传输补给方面做一定简化处理，只有在下层的土壤含水率高于该层孔隙度时，才发生向上水分传输补给，同时该层的土壤含水量等于孔隙度。

首先进行最下层土壤的超额的田间持水量 E_{FCap} 和水量存储 T_{Stor} 计算，同时，将网格时段内的净壤中流添加到其中。如果在模型计算过程中出现 $E_{\text{FCap}} < 0$ ，则令 $E_{\text{FCap}} = 0$ ；之后，依次计算各层超额的田间持水量 E_{FCap} 和水量存储 T_{Stor} ，并依次累加，直到完成所有土层计算，最终可得到累计各层总超额的田间持水量 T_{EFCap} 和总土壤的水量存储 T_{TStor} ，地下水水位计算流程见图 2。计算式见式 (6) ~ 式 (13)。



注：NRL 为土壤分层的个数，本文为 3 层。 i 为迭代次数。
Note: NRL is soil layers and it's three here. i is iteration times.

图 2 地下水埋深计算流程图

Fig.2 Groundwater depth calculation flowchart

地下水埋深计算按式 (6) 和式 (7) 计算，取向向下为正。

$$t_{\text{Td}} = T_{\text{oD}} (1 - T_{\text{EFCap}}/T_{\text{TStor}}) \quad (7)$$

如果根据式 (6) 计算所得 $t_{\text{Td}} > 0$ ，那么

$$t_{\text{Td}} = -T_{\text{oD}} (T_{\text{EFCap}} - T_{\text{TStor}}) \quad (8)$$

$$T_{\text{EFCap}} = \sum E_{\text{FCap}} \quad (9)$$

$$T_{\text{TStor}} = \sum T_{\text{Stor}} \quad (10)$$

$$T_{\text{Stor}} = D_{\text{LD}} \cdot a_i \cdot (D_p - D_{\text{FCap}}) \quad (11)$$

$$E_{\text{FCap}} = D_{\text{LD}} \cdot a_i \cdot (m_i - D_{\text{FCap}}) \quad (12)$$

若 $E_{\text{FCap}} > 0$ ，则

$$T_{\text{Stor}} = R_i \cdot a_i \cdot (D_p - F_i) \quad (13)$$

$$E_{\text{FCap}} = R_i \cdot a_i \cdot (m_i - F_i) \quad (14)$$

式中 t_{Td} 为地下水水位， cm ； T_{oD} 为总土深， cm ； E_{FCap} 、 T_{Stor} 为各层超额的田间持水量和土壤存储水量， cm^3/cm^3 ； D_{LD} 表示该计算网格最下层土深， cm ； a_i 为第 i 个土层调整系数，无量纲， D_p 为表示最下层土壤层的孔隙度， cm^3/cm^3 ； D_{FCap} 为总田间持水量， cm^3/cm^3 ； m_i 表示第 i 个土层土壤含水量， cm^3/cm^3 ； R_i 表示各层土壤厚度， cm ； F_i 代表第 i 个土层的田间持水量， cm^3/cm^3 ； T_{EFCap} 为总田间持水量， cm^3/cm^3 ； T_{TStor} 为总土壤的水量存储， cm^3/cm^3 。

地下水出流计算采用线性水库法，将灌区划分为若干个网格划，每个网格对应一个集水水库以及基流水库，水流从土壤流入设定的水库，又流向深层基流水库，最后流入排水渠道。

4) 灌区引、灌、排水过程模拟

① 渠灌区引水、排水过程

设置一条引水干渠，从河道中取水，再利用支、斗、农渠进行逐级引水分配到各个水循环单元^[20]。排水干沟按照一维运动波方法计算排水，支沟、斗沟、田间排水毛沟等按照引水渠系的平衡计算思路来计算排水沟系的水量平衡。

② 灌水过程

模型计算中，引、提水量以月为计算的时间单位，为反映每天的灌水过程，设置一个“虚拟水库”，模拟储水、放水过程，根据可灌水量的上限与需水量控制每日的可灌水量。模型设置最大可接受作物种植轮作次数为 2 轮。灌区水分来源：地表水、地下水、当日降水，优先使用当日降水，其次是地表水、最后为地下水。

5) 灌区水量平衡

根据灌溉水分运动过程，建立灌区水量平衡方程，表示为：

$$\Delta T = Q_{\text{irri}} + P - E - Q_{\text{canal}} - Q_{\text{field}} - P_{\text{canal}} \quad (15)$$

$$\Delta Q = Q_{\text{canal}} + Q_{\text{field}} - Q_{\text{eva}} - Q_{\text{e}} - P_{\text{ground}} \quad (16)$$

式中 ΔT 为田间土壤水蓄变量， mm ； Q_{irri} 为灌溉水量， mm ； P 为降雨量， mm ； E 为蒸散发量， mm ； ΔQ 为地下水变化量， mm ； Q_{canal} 为渠系下渗量， mm ，采用渠系

渗漏系数法计算; Q_{field} 为灌区净留水量, 由灌区净灌溉水量减去田间渗漏水量得出, mm; Q_{eva} 为实际蒸散发量, mm; Q_e 为地下水开采量, mm; P_{ground} 为地下水排水量, mm; P_{canal} 为排水渠道排水量, mm。

1.2.2 基于机器学习的土壤盐分模型

较大区域中土壤属性的非线性作用更加明显, 而机器学习与数据挖掘技术能够有效解决土壤盐分与环境因子之间非线性的问题^[21], 本文选择常见的随机森林 (random forest, RF) 和长短期记忆人工神经网络 (long short-term memory, LSTM)、支持向量机 (support vector machines, SVM) 3个机器学习算法来构建土壤盐分模型。随机森林通过集成学习的 Bagging 思想, 在决策树的训练过程中引入随机属性选择, 被誉为“代表集成学习技术水平的方法”。长短期记忆网络是一种特殊的循环神经网络, 能够有效避免模型训练过程中出现的梯度消失或者梯度爆炸问题, 在一定程度上解决了循环神经网络存在的长时间依赖问题。支持向量机是一种二分类模型, 它的目的是寻找一个超平面来对样本进行分割, 分割的原则是间隔最大化, 最终转化为一个凸二次规划问题来求解。对比各类方法及方法集合平均值, 选择拟合精度较大的土壤含盐量的集合模拟结果。

降水是土壤水分的重要来源, 降水/灌溉水对土壤的脱盐效果较强^[22]。在高强度蒸发条件下, 水分蒸发而盐分滞留土壤中, 不同土层的全盐含量随着潜在累积蒸发量的增加而增大^[23]。地下水埋深被认为是水平地形土壤盐渍化的关键驱动因素, 土壤盐分受地下水埋深影响显著, 当地下水埋深小于临界深度 (指不引起土壤严重积盐、且不危害作物生长的最小地下水埋深时) 时, 地下水中的盐分会随毛细水不断向上迁移到耕作层和地表^[24-25], 导致灌区土地盐渍化问题。故本文选用降水量+灌溉水量-实际蒸散发量、地下水埋深 2 个变量作为自变量, 土壤含盐量作为因变量, 基于模拟和观测土壤积盐量的纳什系数评价指标来训练 3 个机器学习算法。

1.3 数据来源

气象数据资料来自国家气象局网站共享数据。研究区 DEM 数据采样的精度为 30 m。土壤分布信息采用南京土壤所公布的全国土壤分布图。考虑到整个含水层的水文地质条件和水力特性, 模型分为两层, 第一层厚度变化不大 (设置为平均厚度 7.4 m), 第二层厚度为 20~300 m。给水度较小位于 0.02~0.05 之间。土地利用数据来自内蒙古巴彦淖尔市自然资源局提供的 2009 年与 2017 年土地利用信息。将研究区划分为 30 km×30 km 正方形栅格, 见图 3。

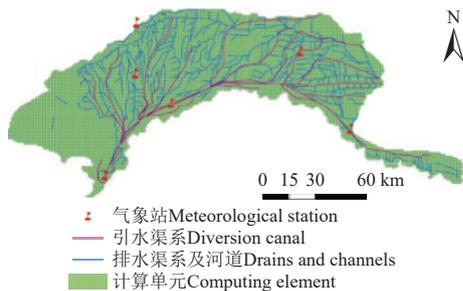


图3 研究区总的计算单元

Fig.3 The total calculation unit in study region

1.4 节水方案设置

根据河套灌区节水现状与节水效果, 本文筛选影响较为显著的渠系节水措施、田间节水措施、种植结构调整措施作为主要节水措施, 以此为基础构建节水方案 (方案设置依据《巴彦淖尔市水资源规划》、《内蒙古河套灌区现代化规划 (2021—2035 年)》), 见表 1。基准方案为 2018 年河套灌区实际情况。

表 1 河套灌区农业节水方案
Table 1 Agricultural water-saving schemes in Hetao Irrigated Region

节水措施 Water-saving measures	方案内容 Project content
基准方案 (S0) Basic scheme	骨干渠道衬砌比达 60%, 渠系水利用系数达 0.56。蔬果类作物产区喷灌、微灌与管道输水等覆盖比例增长 34%。小麦种植占比 7%、玉米 24%, 葵花 47%, 其他 22%
渠系衬砌节水 (S1) Water saving of channel lining	对干、分干、支渠等进行衬砌, 骨干渠道衬砌比达 70%, 渠系水利用系数达 0.60
田间节水调控措施 (S2) Field water-saving control	持续实施田间土地平整、畦田改造等节水措施, 600 万亩 (40 万 hm^2) 中低产田改造任务完成 70%。在蔬果类作物产区推喷灌、微灌与管道输水等灌溉方式, 覆盖比例增长 10%。采取地膜后茬免耕栽培、宽覆膜等土壤保水技术, 推广面积增长 20%
调整种植结构 (S3) Planting structure adjustment	小麦种植占比 5% (减少 2%), 玉米 20% (减少 4%), 葵花 60% (增加 13%), 其他 15% (减少 7%)

注: 耗水量为实际蒸散发量。

Note: The water consumption is equal to the actual evapotranspiration.

2 结果与分析

2.1 模型率定和验证

2.1.1 分布式水循环模型

对水循环过程中的实际蒸散发量、排水量和地下水埋深进行率定和验证, 率定期为 2009—2014 年, 验证期为 2015—2018 年。其中, 蒸发采用系数参考文献^[26], 见表 2; 排水过程验证采用河套灌区管理局提供的 22 条主要排水干沟及总排干 4 个控制断面 2009—2018 年 10 a 的月流量过程信息进行率定与验证, 见表 3; 地下水埋深则利用 2014—2018 年地下水观测井实测资料进行验证。结果表明, 水面蒸发模型的纳什系数均不低于 0.654, 相对误差绝对值不高于 4.82%, 相关关系为 0.88, 排水过程纳什系数均不低于 0.600, 相对误差绝对值不高于 5.11%, 相关关系为 0.82, 地下水埋深的纳什系数均不低于 0.628, 相对误差绝对值不高于 5.12%, 相关关系为 0.86, 满足精度要求。

表 2 不同作物蒸散发系数

项目 Item	蒸散发系数 Crop evapotranspiration coefficients
小麦 Wheat	0.80
玉米 Maize	0.85
葵花 Sunflower	0.93
其他 Others	0.60
裸地 Bare land	0.70
林草地 Forest lawn	1.00

2.1.2 土壤盐分模型

灌溉水量、地下水埋深与土壤积盐数据来自于河套灌区的监测数据，蒸散发量由构建水循环模型输出。输入 1990—2016 年月过程的降水量+灌溉水量-蒸发量、地下水埋深与土壤积盐量数据分别训练随机森林模型、长短期记忆人工神经网络模型与支持向量机模型，采用 2017—2018 年数据验证 3 个模型。支持向量机模型的模拟效果较差，纳什系数在 0.50~0.60 之间，随机森林模型的纳什系数在 0.70~0.80 之间，长短期记忆人工神经网络模型纳什系数为 0.9 左右，可能存在一定的过拟合现象。故本文将随机森林、长短期记忆人工神经网络与支持向量机输出的土壤积盐量数据求集合平均值，再与实测值进行对比，得到土壤积盐量与实测值的纳什系数均不低于 0.76（见表 4），相对误差绝对值不高于 3.01%，相关系数为 0.89，满足精度要求。

表 3 排水量实测值与模拟值纳什系数

Table 3 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of measured and simulated drainage discharge

排水沟 Drainage trench	纳什系数 Nash coefficient		相对误差 Relative error/%	
	率定期 Calibration periods	验证期 Validation Periods	率定期 Calibration periods	验证期 Validation Periods
一排干	0.64	0.70	4.74	4.26
二排干	0.64	0.67	4.74	4.51
三排干	0.69	0.71	4.33	4.20
四排干	0.66	0.71	-4.64	-4.20
五排干	0.69	0.69	4.39	4.34
六排干	0.70	0.69	4.23	4.38
皂沙	0.66	0.65	-4.58	4.73
七排干	0.65	0.63	4.73	4.87
义通干渠	0.61	0.60	5.01	5.11
总排红圪卜	0.69	0.67	4.34	-4.51
八排干	0.68	0.69	4.42	4.34
九排干	0.74	0.69	3.92	4.36
新安	0.68	0.68	4.44	4.40
十排干	0.70	0.69	4.28	4.34

表 4 验证期土壤积盐量实测值与模拟值纳什系数

Table 4 NSE between measured and simulated soil salinity during validation period

月份 Month	纳什系数 Nash coefficient					相对误差 Relative error/%				
	磴口 Dengkou	杭锦后旗 Hanggin houqi	临河 Linhe	五原 Wuyuan	乌拉特前旗 Wulate qianqi	磴口 Dengkou	杭锦后旗 Hanggin houqi	临河 Linhe	五原 Wuyuan	乌拉特前旗 Wulate qianqi
1	0.78	0.80	0.81	0.83	0.85	-4.44	-4.33	4.31	4.17	4.02
2	0.80	0.85	0.78	0.82	0.81	4.32	4.05	4.47	-4.23	4.27
3	0.84	0.81	0.81	0.83	0.76	4.08	-4.29	4.26	4.14	-4.57
4	0.80	0.86	0.77	0.77	0.79	4.37	3.99	4.54	4.52	4.40
5	0.83	0.76	0.84	0.76	0.81	4.19	-4.56	4.10	4.57	-4.27
6	0.83	0.81	0.82	0.83	0.85	4.16	4.27	4.23	4.14	4.02
7	0.83	0.78	0.83	0.82	0.77	4.17	4.46	4.17	4.25	4.50
8	0.83	0.76	0.84	0.79	0.77	4.19	-4.56	4.08	-4.38	4.50
9	0.82	0.82	0.81	0.78	0.86	4.25	4.20	4.31	4.46	4.01
10	0.79	0.83	0.85	0.76	0.81	4.40	4.14	4.04	4.57	4.29
11	0.80	0.84	0.83	0.85	0.82	-4.34	4.09	4.14	4.03	4.23
12	0.79	0.78	0.85	0.80	0.84	4.41	4.47	4.06	4.33	4.08

2.2 模拟结果分析

2.2.1 引耗水量影响

灌区节水会引起入渗、潜水蒸发以及地下水埋深等水循环要素发生变化。表 5 是不同节水方案下灌区引、耗水量的变化情况。

表 5 不同节水方案下灌区引耗水量

Table 5 Water consumption under different water-saving schemes in irrigated region 亿 m³

方案 Scheme	农田耗水量 Farmland water consumption	引黄水量 Water intaking from Yellow River	耗黄水量 water consumption from Yellow River	生态耗水量 Ecological water consumption	节水量 Saving water
S0	34.93	46.36	43.84	17.03	-
S1	32.83	42.18	41.79	16.20	2.93
S2	32.04	42.74	40.05	16.90	3.02
S3	32.16	46.36	42.88	17.26	2.54
S1+S2	30.88	38.46	38.56	15.00	6.08
S1+S3	30.74	41.18	39.51	15.65	5.57
S2+S3	29.47	39.74	37.65	16.80	5.69
S1+S2+S3	27.89	36.27	34.76	14.96	9.11

从表 5 可以看出，S1 方案下渠系水利用系数提高到 0.60，引黄水量减少 4.18 亿 m³，耗黄水量减少 2.05 亿 m³，农田耗水量减少 2.10 亿 m³，但因渠道渗漏量减少，地下水水位下降，可能引起湖泊湿地、林草地等面积萎缩，生态耗水量减少 0.83 亿 m³，S1 方案河套灌区耗水节水量达到 2.93 亿 m³。S2 方案实施田间节水调控措施，引黄

水量减少 3.62 亿 m³，耗黄水量减少 3.79 亿 m³，农田耗水量减少 2.89 亿 m³，河套灌区耗水节水量达到 3.02 亿 m³。S3 方案下调整种植结构，在引黄水量不减少的情况下，耗黄水量减少 0.96 亿 m³，生态耗水量增加 0.23 亿 m³，农田耗水量减少 2.77 亿 m³，河套灌区耗水节水量达到 2.54 亿 m³。不同方案组合，S1+S2+S3 方案河套灌区耗水节水量最多，为 9.11 亿 m³，S2+S3 方案组合次之，耗水节水量 5.69 亿 m³。

2.2.2 地下水埋深影响

河套灌区浅层地下水补给主要依赖引黄灌溉过程。当渠系水利用系数提高，渠系渗漏水量减少，即入渗补给地下水的水量会显著减少，从而影响灌区地下水埋深的时空分布情况，并带来相应的生态环境效应。基准方案下，平均每年地下水入渗补给量 25.79 亿 m³，主要集中在 10 月、5 月、6 月、7 月与 9 月，占全年总补给量的 84%（见图 4）。S1 方案下农田灌溉用水量没有变化，渠系水利用系数提高到 0.6，渠道渗漏补给地下的水量减少，减少了入渗补给地下水水量，地下水水位下降。林草地、未利用地的入渗补给主要依靠本地降水，补给量很小，若潜水蒸发量远大于入渗量，地下水水位将迅速下降，是影响灌区地下水水位变化的关键因素。S1 方案下地下水入渗补给量 19.63 亿 m³，较基准方案减少 6.16 亿 m³，导致地下水埋深的持续加大，地下水埋深>3 m 的面积比

例较基准方案增加了 7.59%，地下水埋深>2.5~3.0 m 的面积比例较基准方案增加了 4.44% (见 图 4)。S2 方案下，引黄水量减少，相应的渠道渗漏量减少，田间工程措施使得相应的农田入渗量减少，S2 方案下地下水入渗补给量较基准方案减少 2.57 亿 m³，灌区地下水位下降，地下水埋深>3 m 的面积比例较基准方案增加了 2.54%，地下水埋深 2.5~3.0 m 的面积比例较基准方案增加了 1.58%。S3 方案下，在引黄水量无变化的情况下，渠道入渗补给量可认为无变化，农田灌溉用水量减少，农田入渗补给量减少，更多的水分补给生态环境用水 (排入乌梁素海)，地下水入渗补给量略微减少，较基准方案减少 0.31 亿 m³，地下水位变化不大。

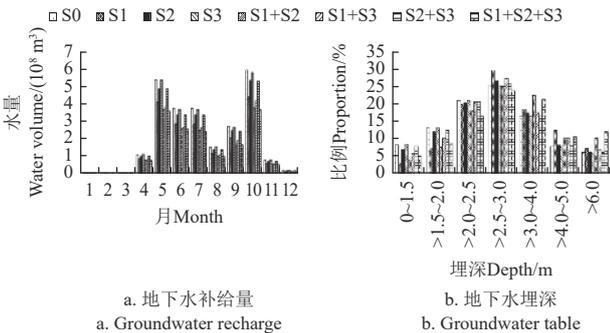


图 4 不同方案下地下水补给量和埋深面积的比例

Fig.4 Proportion of groundwater recharge and buried area under different schemes

不同方案组合，S1+S2+S3 方案下地下水入渗补给量较基准情景减少量最大，为 9.00 亿 m³，S1+S3 方案组合次之，较基准方案减少 8.52 亿 m³。S1+S3 方案较基准方案减少 7.57 亿 m³，S2+S3 方案较基准方案减少 2.64 亿 m³。

选择对地下水入渗补给量影响较大的 S1、S1+S2、S1+S2+S3 方案进行分析。以枯水期 3 月为例，基准情景下灌区西部、山前、临河区等周边部分区域为地下水埋深高值区 (图 5)，随着耗水节水量的增多，地下水埋深高值区从上述区域逐步扩散，S1+S2+S3 方案下在西北部、山前、乌拉特前旗、乌梁素海东部的形成连片埋深高值区，对区域生态的影响更加显著。S1、S1+S2、S1+S2+S3 下地下水埋深超过 6 m 的面积比例较基准情景分别增加了 1.22%、4.31%、5.93%，地下水埋深超过 4 m 的面积比例较基准情景分别增加了 5.80%、6.63%、8.71%。地下水埋深超过 3 m 的面积比例较基准情景分别增加了 7.59%、12.60%、13.23%。

2.2.3 灌区盐分影响

本文选择积盐量作为灌区水盐约束指标。S1 方案较基准情景积盐量增加 1.7 万 t (见表 6)。S2 方案随着田间土地平整、畦田改造，中低产田改造措施的实施，灌区进、排盐量逐渐减小，积盐量较基准情景减少 2.3 万 t。S3 方案随着种植结构调整，灌区进盐量变化不大 (因引黄水量不变)、排盐量增多 (因排水量增多)，积盐量较基准情景减少 4.5 万 t。由表 6 可以看出，S2+S3 方案积盐量较基准情景较少最多，其次为 S3、S1+S2+S3、S2、S1+S3、S1+S3。

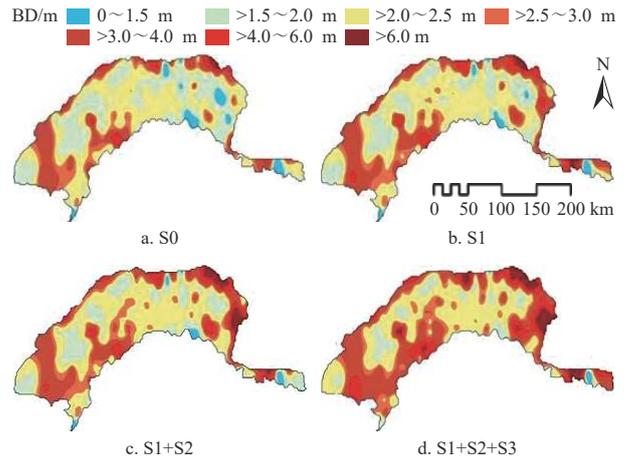


图 5 不同方案下 3 月地下埋深空间分布

Fig.5 Spatial distribution of groundwater buried depth (BD) under different project in March

表 6 不同方案积盐量变化

方案 Scheme	积盐量变化 Changes in salt accumulation/10 ⁴ t
S1	1.7
S2	-2.3
S3	-4.5
S1+S2	0.1
S1+S3	-2.2
S2+S3	-5.9
S1+S2+S3	-3.8

2.2.4 节水潜力分析

从节水对地下水埋深、水盐平衡 2 个方面的影响对各方方案进行对比分析，结果见表 7。

表 7 不同方案耗水节水量与其影响

方案 Scheme	耗水节水量 Saved amount of water consumption/亿 m ³	排水进乌梁素海水量 Water drained into Wulansu/亿 m ³		积盐量变化 Changes in salt accumulation/万 t
		NB/%	AB/%	
S1	2.93	22.44	33.66	1.7
S2	3.02	23.17	34.76	-2.3
S3	2.54	21.50	32.25	-4.5
S1+S2	6.08	26.04	39.06	0.1
S1+S3	5.57	24.98	37.47	-2.2
S2+S3	5.69	25.02	37.80	-5.9
S1+S2+S3	9.11	27.90	41.85	-3.8

注：NB 为自然植被被生育期平均埋深超过 2.5 m 的比例；AB 为农田生育期埋深超过 2.0 m 的比例。

Note: NB represents the proportion of natural vegetation with an average burial depth exceeding 2.5 during the growing season, and AB represents the proportion of farmland with a burial depth exceeding 2.0 during the growing season.

随着耗水节水量的增多，地下水埋深逐渐增厚，将对灌区生态产生明显影响。S3 方案耗水节水量最小 (仅 2.54 亿 m³)，地下水埋深与基准方案相比变化不大。但仍有节水空间。耗水节水量最大的 S1+S2+S3 方案 (耗水节水量 9.11 亿 m³)，引起地下水埋深变化明显，自然植被生育期平均埋深超过 2.5 m 的面积比例达到 27.90%，在西北部、山前、乌拉特前旗、乌梁素海东部的形成连片埋深高值区，会对灌区陆面生态环境造成明显影响。而且 S1+S2+S3 方案下灌区排入乌梁素海的水量减少至 5.15 亿 m³，较基准情景减少了 28%，入乌水量的减少会加剧乌梁素海水体污染^[27]。S1+S2 方案不利于灌区脱盐，

引起乌梁素海排入水量减少 2.62 亿 m^3 , 较基准情景减少了 37%, 会明显加剧乌梁素海水质污染。综合考虑节水对下水埋深、水盐平衡的影响, S1+S3、S2+S3 方案对地下水埋深影响不明显, 虽会引起排入进乌梁素海水量减少, 相对于基准情景分别减少了 6%、12%, 但 S2+S3 方案下积盐量变化明显高于 S1+S3 方案, 更利用灌区排盐, 故推荐灌区适宜节水方案为 S1+S3 方案, 灌区真实节水量为 5.69 亿 m^3 。

3 讨 论

本文将地下水埋深作为重要生态约束控制指标之一, 分析灌区节水对生态环境的影响。S1 方案下, 渠系节水引起地下水水位下降, 与屈忠义等^[28] 研究结果结论较为接近。对于河套灌区适宜地下水位, 汪林等^[29-30] 认为宁夏河套灌区非生育期地下水的适宜控制埋深为 2.0~2.4 m、作物生长期地下水的适宜控制埋深为 1.2~1.5 m。郝远远等^[31] 研究发现宁夏灌区玉米生长期的适宜埋深应控制在 1.5 m 左右。王伦平等^[32] 经过作物生理特性鉴定得出小麦和糜子的地下水适宜深度为 1.5~2.0 m。高鸿永等^[33] 认为当地下水位埋深在 1.2~2.5 m 时, 新植林区幼树生长发育正常, 幼树基本无枯梢枯干现象; 当地下水位埋深超过 3 m 时, 幼树枯梢枯干现象随地下水下降而增多。彭翔^[34] 认为河套灌区天然植被的最佳地下水埋深为 1.6~2.0 m, 生态维持水位埋深区间为 1.0~5.0 m, 地下水埋深超过 5 m 时, 将明显影响天然植被正常生长。综合考虑上述研究成果, 河套灌区农田生育期地适宜地下水埋深应控制在 1.5~2.0 m, 非生育期地下水埋深应该控制在 2.0~2.5 m; 河套灌区林草地适宜地下水埋深应控制在 2.0~3.0 m, 最大应控制在 3.5 m 以内, 才能保证天然植被不退化。本文所选择的 S2+S3 方案, 自然植被生育期平均埋深超过 2.5 m 的面积比例、农田生育期埋深超过 2.0 m 的面积比例分别较基准方案增多 2.22%、1.05%, 对灌区生态环境影响不明显。而耗水节水量最大的 S1+S2+S3 方案, 自然植被生育期地下水平均埋深超过 2.5 m 的面积比例、农田生育期埋深超过 2.0 m 的面积比例较基准方案分别增多 8.22%、13.44%, 将会对生态环境产生影响。

关于灌区土壤脱盐与水盐平衡问题, 汪林等^[35] 通过盐分排引比分析灌区积盐、脱盐的和盐渍土改良的指标, 证实了 35 年来银北灌区盐碱地处于脱盐这一过程。贾忠华等^[36] 选择灌区盐分的排引比分析宁夏银南灌区水盐平衡。本文选择积盐量作为水盐平衡约束的指标。当 S1 方案下渠系水利用系数提高, 引水量减少, 将直接减少排水量, 加重灌区盐分累积, 不利于灌区脱盐, 与王国帅等^[37-38] 研究结论一致, 节水改造后, 引排水量逐年减少, 盐分无法有效排除灌区。S2 方案结果说明田间调控措施有利于灌区脱盐, 与马贵仁等^[39] 的研究结论一致; 田间平地缩块、畦田改造、土地平整等措施, 能够有效提高农作物灌水效率, 均匀灌水, 既达到节约用水的目的, 同时还能够减少土壤中盐分积累, 利于灌区脱盐, 与崔婷婷^[40] 的研究结论一致; 地膜覆盖可改良土壤盐碱化, 与王婧等^[41] 研究结论一致。S3 方案说明调整种植结构在引黄水量不减少的情况下有利于灌区脱盐, 与郭

姝姝^[42] 研究结果一致, 扩大玉米种植面积、葵花面积均可有效地降低河套灌区含盐量。S3 方案种植结构调整, 增加种葵花等低耗水、耐盐作物的种植比例, 可减少秋浇水量^[43], 但种植结构调整对水盐平衡与盐碱化的影响仍需进一步深入定量研究。地下水埋深与土壤盐分关系、不同水盐条件下的响应过程也需要开展一系列的系统试验与调查研究工作。

4 结 论

本文构建分布式水循环模型与基于机器学习的盐分模型, 探讨了河套灌区节水潜力, 得出如下结论:

1) 基于河套灌区分布式水循环模型, 对水循环过程中的实际蒸散发量、排水量和地下水埋深等指标进行参数率定和验证, 结果显示: 水面蒸发的纳什系数均不低于 0.654, 相对误差绝对值不高于 4.82%, 相关关系为 0.88, 排水过程纳什系数均不低于 0.600, 相对误差绝对值不高于 5.11%, 相关关系为 0.82, 地下水埋深的纳什系数 0.628, 相对误差绝对值不高于 5.12%, 相关关系为 0.86, 满足精度要求。选择 3 个机器学习算法构建土壤盐分模型, 取平均值与实测值进行对比, 得到土壤积盐量与实测值的纳什系数均不低于 0.76, 相对误差绝对值不高于 3.01%, 相关系数为 0.89, 满足精度要求。

2) 筛选影响较为显著的渠系节水措施、田间节水措施、种植结构调整措施作为主要节水措施, 以此为基础构建节水方案及组合方案 7 个。衬砌节水渠道 S1 方案下渠系水利用系数提高到 0.60, 耗水节水量达到 2.93 亿 m^3 。田间节水调控 S2 方案, 耗水节水量达到 3.02 亿 m^3 。种植结构调整 S3 方案下在引黄水量不减少的情况下, 耗水节水量达到 2.54 亿 m^3 。不同方案组合, S1+S2+S3 方案灌区节水量最多, 为 9.11 亿 m^3 , S2+S3 方案组合次之, 耗水节水量 5.69 亿 m^3 。S1+S3 方案耗水节水量 5.57 亿 m^3 。

3) 渠系水利用系数提高, 将引起地下水水位下降, 不利于排盐, S1 方案下地下水埋深大于 3 m 的面积比例较基准方案增加了 7.59%, 地下水埋深 2.5~3.0 m 的面积比例较基准方案增加了 4.44%, 不利于灌区排盐。田间工程措施使得相应的农田入渗量减少, 地下水水位下降, 有利于灌区脱盐, S2 方案下地下水入渗补给量较基准方案减少 2.57 亿 m^3 , 灌区地下水水位下降较为明显, S2 方案有利于灌区脱盐。S3 方案下地下水入渗补给量略微减少, 地下水水位变化不大, 有利于灌区脱盐。不同方案组合, S1+S2、S1+S2+S3 方案下对地下水埋深影响较大, 尤其是 S1+S2+S3 方案在灌区西北部、山前、乌拉特前旗、乌梁素海东部的形成连片埋深高值区, 影响区域生育期农田作物与林草地植被生长。S1+S2 方案下不利于灌区脱盐。在综合考虑生态环境的约束下, 推荐耗水节水量最大的方案 S2+S3, 即灌区适宜的耗水节水潜力为 5.69 亿 m^3 。该方案下虽然也会引起地下水水位略有下降、进乌梁素海排入水量略微减少, 但最有有利于灌区排盐。

[参 考 文 献]

- [1] 佚名. 农水水电兴利助农托起农民幸福生活[J]. 中国水利, 2021(13): 38.

- [2] 周祖昊, 刘佳嘉, 严子奇, 等. 黄河流域天然河川径流量演变归因分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 27-37.
ZHOU Zuhao, LIU Jiajia, YAN Ziqi, et al. Attribution analysis of the natural runoff evolution in the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(1): 27-37. (in Chinese with English abstract)
- [3] SIAD S M, IACOBELLIS V, ZDRULI P, et al. A review of coupled hydrologic and crop growth models[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 224: 105746
- [4] 雷波, 刘钰, 许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 10-14.
LEI Bo, LIU Yu, XU Di. Estimating theory and method of irrigation water-saving potential based on irrigation district scale [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(1): 10-14. (in Chinese with English abstract)
- [5] 崔远来, 谭芳, 郑传举. 不同环节灌溉用水效率及节水潜力分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 788-793.
CUI Yuanlai, TAN Fang, ZHENG Chuanju. Analysis of irrigation efficiency and water saving potential at different scales[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 788-793. (in Chinese with English abstract)
- [6] 裴源生, 张金萍, 赵勇. 宁夏灌区节水潜力的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 239-243.
PEI Yuansheng, ZHANG Jinping, ZHAO Yong. Water saving potential in Irrigation District of Ningxia Autonomous Region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(2): 239-243. (in Chinese with English abstract)
- [7] RAEISI L G, MORID S, DELAVAR M, et al. Effect and side-effect assessment of different agricultural water saving measures in an integrated framework[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105685.
- [8] KARIMOV A, MOLDEN D, KHAMZINA T, et al. A water accounting procedure to determine the water savings potential of the Fergana Valley[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 108: 61-72.
- [9] 傅国斌, 李丽娟, 于静洁, 等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 54-58.
FU Guobin, LI Lijuan, YU Jingjie, et al. Estimation of water-saving potential in the Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(1): 54-58. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭致功, 刘钰, 许迪, 等. 基于 RS 数据和 GIS 方法估算区域作物节水潜力[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 8-12.
PENG Zhigong, LIU Yu, XU Di, et al. Application of RS and GIS technique for water-saving potential estimation of regional crops[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)* 2009, 25(7): 8-12. (in Chinese with English abstract)
- [11] TORNQVIST R, JARSJO J. Water savings through improved irrigation techniques: Basin-scale quantification in semi-arid environments[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(4): 949-962.
- [12] 顾文权, 邵东国, 崔远来, 等. 流域尺度农业真实节水潜力及其估算模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 180-182.
GU Wenquan, SHAO Dongguo, CUI Yuanlai, et al. Real agricultural water-saving potential and its evaluation model in basin scale[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(1): 180-182. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴迪, 崔远来, 黄文波, 等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 82-90.
WU Di, CUI Yuanlai, HUANG Wenbo, et al. Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(12): 82-90. (in Chinese with English abstract)
- [14] SCHINDLER D E, HILBORN R. Prediction, precaution, and policy under global change[J]. *Science*, 2015, 347: 953-954.
- [15] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的荒漠绿洲水盐运移模拟与评估[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 87-98.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Simulation and evaluation of soil water and salt transport in desert oases of Hetao Irrigation District using HYDRUS-1D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(8): 87-98. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张万锋, 杨树青, 胡睿琦, 等. 基于 PSWE 模型的土壤水盐运移与夏玉米生产效益模拟[J]. 农业机械学报, 2021, 53(6): 87-98.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, HU Ruiqi, et al. Simulation of soil salt-water migration and summer maize productivity based on PSWE model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 53(6): 87-98. (in Chinese with English abstract)
- [17] WEN Y, WAN H, SHANG S, et al. A monthly distributed agro-hydrological model for irrigation district in arid region with shallow groundwater table[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127746.
- [18] 朱正全, 冯绍元, 王娟, 等. 蒙古河套灌区农业灌溉资源型节水潜力分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 77-80.
Zhu Zhengquan, Feng Shaoyuan, Wang Juan, et al. Analysis and estimation on resource-based water-saving potential of agricultural irrigation in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016 (9): 77-80. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨金忠, 朱焱, 查元源, 等. 地下水与土壤水运动数学模型和数值方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016
- [20] 毕彦杰, 赵晶, 张文鹤, 等. WACM4.0 模型模拟内蒙古河套地区山水林田湖草系统水循环[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 148-158.
BI Yanjie, ZHAO Jing, ZHANG Wenge, et al. Simulation of hydrological cycle for mountain-water-forest-cropland-lake-grass system in Hetao region, Inner Mongolia of China by WACM4.0 model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(14): 148-158. (in Chinese with English abstract)
- [21] 曹燕, 白玉杰, 李金文, 等. 长江三角洲地区滩涂土壤盐分空间分布特征研究[J]. 土壤与作物, 2022, 11(1): 31-40.
CAO Yan, BAI Yujie, LI Jinwen, et al. Spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal saline-alkali area in Yangtze River Delta[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(1): 31-40. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83.
YANG Guang, LI Wanjing, REN Futian, et al. Soil salinity

- accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 73-83. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘丽娟, 李小玉. 干旱区土壤盐分积累过程研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 891-898.
LIU Lijuan, LI Xiaoyu. Progress in the study of soil salt accumulation in arid region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 891-898. (in Chinese with English abstract)
- [24] 苏春利, 纪倩楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 916-923.
SU Chunli, JI Qianan, TAO Yanzhen, et al. Differentiation characteristics and factors of soil salinization in the west of Hetao Irrigation Area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 916-923. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李娜, 岳卫峰, 龚培昌, 等. 干旱灌区农田土壤水盐分布特征及其对地下水响应[J]. 节水灌溉, 2022(1): 7-13.
LI Na, YUE Weifeng, GONG Peichang, et al. Characteristics of soil water and salt distribution and its response for groundwater in an arid irrigation area[J]. Water Saving Irrigation, 2022 (1): 7-13. (in Chinese with English abstract)
- [26] 闫浩芳. 内蒙古河套灌区不同作物腾发量及作物系数的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
YAN Haofang. Research on Evapotranspiration and Crop Coefficient of Different Crops in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李刚. 内蒙古河套灌区节水对乌梁素海的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
LI Gang. Research on the Influence of Water Saving on Wuliangsu Hai Lake of Hetao Irrigated Area in Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [28] 屈忠义, 陈亚新, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉工程实施后地下水变化的模型预测[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 59-62.
QU Zhongyi, CHEN Yaxin, SHI Haibin, et al. Regional groundwater depth forecast by BP model of post-water-saving reconstruction in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 59-62. (in Chinese with English abstract)
- [29] 汪林, 甘泓, 汪珊, 等. 宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [30] 程献国, 张霞, 姜丙洲. 宁夏青铜峡灌区适宜节水阈值研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 83-89.
CHENG Xianguo, ZHANG Xia, JIANG Bingzhou. Research on appropriate water saving threshold in Qingtongxia irrigation district of Ningxia autonomous region[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(5): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- [31] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 128-136.
HAO Yuanyuan, XU Xu, HUANG Quanzhong, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 128-136. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王伦平, 陈亚新, 曾国芳. 内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993.
- [33] 高鸿永, 伍靖伟, 段小亮, 等. 地下水位对河套灌区生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 134-138.
GAO Hongyong, WU Jingwei, DUAN Xiaoliang, et al. The impact of water-table on the ecological environment of HeTao Irrigation District[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(4): 134-138. (in Chinese with English abstract)
- [34] 彭翔. 基于遥感的河套灌区地下水埋深变化对生态环境的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
PENG Xiang. Effect of Changes in Groundwater Level on the Ecological Environment in Hetao Irrigation District Using Remote Sensing Method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [35] 汪林, 甘泓, 于福亮, 等. 论银北灌区的盐害指标与排引比[J]. 地球学报. 2001(1): 91-96.
WANG Lin, GAN Hong, YU Fuliang, et al. A discussion on the salt harm index and the drainage-diversion ratio in Yinbei Irrigation District[J]. Acta Geoscientia Sinica. 2001(1): 91-96. (in Chinese with English abstract)
- [36] 贾忠华, 罗纨, 方树星, 等. 宁夏银南灌区排水现状分析及计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 60-65.
JIA Zhonghua, LUO Wan, FANG Shuxing, et al. Analytical study on current drainage condition in the Yinnan Irrigation District in Ningxia Hui Autonomous Region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(3): 60-65. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子间水盐运移规律及平衡分析[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1518-1528.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Analysis of water and salt transportation and balance during cultivated land, waste land and lake system in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1518-1528. (in Chinese with English abstract)
- [38] 常晓敏. 河套灌区水盐动态模拟与可持续性策略研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
CHANG Xiaomin. Study on Dynamic Simulation of Water and Salt and Sustainability Strategy in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [39] 马贵仁, 屈忠义, 冯雪婷, 等. 盐碱地改良前后水盐均衡分析—以河套灌区为例[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(Suppl): 95-103.
MA Guiren, QU Zhongyi, FENG Xueting, et al. The analysis of water-salt balance before and after saline-alkali-land improvement—A case study of Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(Suppl): 95-103. (in Chinese with English abstract)
- [40] 崔婷婷. 银北引黄灌区滴灌条件下盐碱地适应利用技术研究[D]. 银川: 宁夏大学文, 2017.
CUI Tingting. Study on Adaptability Utilization Technology of Saline—Alkali Land Under Drip Irrigation in Yinbei Yellow River Irrigation District[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [41] 王婧, 逢焕成, 任天志, 等. 地膜覆盖与秸秆深埋对河套

- 灌区盐渍土水盐运动的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 52-59.
- WANG Jing, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al. Effect of plastic film mulching and straw buried on soil water-salt dynamic in Hetao plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 52-59. (in Chinese with English abstract)
- [42] 郭姝姝. 基于遥感及 CLUE-S 模型的内蒙古河套灌区土壤盐渍化时空演变与调控研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- GUO Shushu. Study on Spatiotemporal Evolution and Regulation of Soil Salinization in HetaoIrrigation District, Inner Mongolia, China Using Remote Sensing and CLUE-S Model[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [43] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31-36.
- LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Project of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 31-36. (in Chinese with English abstract)

Prediction of water-saving potential in Inner Mongolia Loop using distributed water cycle model and machine learning

ZHAO Jing¹, DUAN Jingjing¹, WANG Tao¹, BI Yanjie^{2*}, GAO Feng¹

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation Design and Reserch Co.Ltd, Tianjin 300222, China)

Abstract: This study aims to explore the real water-saving potential in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia of China. The distributed water cycle and salinity models were constructed using machine learning. A series of water-saving schemes were established to quantitatively analyze the water intake, water consumption, groundwater depth, and salt accumulation. The results were as follows: 1) The distributed water cycle model was used to calibrate and verify some indicators, such as evaporation, runoff, and groundwater depth in the water cycle process. The Nash coefficients of water surface evaporation, drainage processes, and groundwater depth were no less than 0.654, 0.600, and 0.628, respectively, where the absolute relative errors were no higher than 4.82%, 5.11%, and 5.12%, respectively, and the correlation values were 0.88, 0.82, and 0.86, respectively, fully meeting the accuracy requirements. Three algorithms of machine learning were selected to construct the soil salinity model. The Nash coefficients of soil salt accumulation were no less than 0.76, compared with the measurement. 2) Canal and field water-saving measures were optimized to screen the crop structure adjustment. Seven water-saving schemes and combinations were constructed for the main water-saving measures. In Scheme water saving of channel lining (S1), the water utilization coefficient of the canal increased to 0.60, with a water-saving amount of 293 million cubic meters. Scheme field water-saving control (S2) was used to implement the field water-saving regulation, particularly with a water-saving amount of 302 million cubic meters. In Scheme planting structure adjustment (S3), the crop structure was adjusted without the reduction in the amount of water that diverted from the Yellow River, where the water-saving amount of 254 million cubic meters was obtained. Among different scheme combinations, Scheme S1+S2+S3 shared the highest water-saving amount of 911 million cubic meters, followed by Schemes S2+S3 and S1+S3 with a water-saving amount of 569 million and 557 million cubic meters, respectively. 3) An increase in the canal water utilization coefficient led to a decline in groundwater levels, which was unfavorable for salt drainage. In Scheme S1, the proportion of areas with a groundwater depth greater than 3 meters increased by 7.59%, compared with the baseline scheme, whereas, the proportion with a groundwater depth between 2.5 and 3.0 meters increased by 4.44%, which was not conducive to the salt drainage. The field engineering measures reduced the infiltration rate of farmland, leading to a decline in the groundwater levels, which was beneficial for the salt drainage. In Scheme S2, the groundwater recharge in the irrigation area decreased by 257 million cubic meters, compared with the baseline scheme, indicating a more significant decline in groundwater level. Scheme S2 was favorable for the salt drainage. In Scheme S3, the groundwater recharge slightly decreased with the relatively stable groundwater level, which was also favorable for salt drainage. Among them, the S1+S2 and S1+S2+S3 combination shared a greater impact on the groundwater depth, especially S1+S2+S3 in the northwest part of the irrigation area. A high-value area of continuous buried depth was formed to dominate the growth of crops and vegetation during the growing season. There was a 5.46% increase in the proportion of naturally vegetated areas with an average buried depth exceeding 2.5 meters in Scheme S1+S2, compared with the baseline scheme. Therefore, the scheme S2+S3 was recommended with the largest water-saving amount, where the suitable water-saving potential of the irrigation area was 569 million cubic meters, considering the constraints of the ecological environment. Consequently, this scheme can be the most favorable for salt drainage in the irrigation area.

Keywords: groundwater; salts; machine learning; distributed water cycle model; water consumption and water saving; Hetao Irrigation District