

水土资源均衡约束下宁夏引黄灌区水资源高效利用研究

杨贵羽^{1,2} 李烁阳^{1,2} 常翠^{1,2} 彭致功^{1,2} 何希煜^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为全面践行“节水优先、空间均衡”治水思想,协同解决水资源开发利用与生态安全保障问题,本文以青铜峡贺兰县灌区为研究对象,重点考虑区域可用水量总量和灌溉绿洲生态安全所需的合理地下水埋深两大核心约束因素,借助水土资源均衡配置模型,通过设置情景方案,探讨了农业深度节水的可能方向。结果表明:为实现灌区空间均衡发展、协同推进农业深度节水,若按照实施单一节水措施,应优先采取水稻减种和控制灌溉措施,其次为提高渠系水利用系数和扩大高效节水灌溉面积;各措施适宜控制范围为:水稻减种比例控制在50%~75%之间且剩余部分实施控灌;渠系水利用系数保持在0.64;在推广高效节水灌溉方面,扬黄、引黄区域高效节灌面积占比应不超过80%和35%,即分别维持在28.48 km²和132.20 km²。

关键词: 灌区; 水资源高效利用; 节水措施; 地下水埋深; 水土资源均衡配置

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)06-0329-08

OSID:



Efficient Utilization of Water Resources in Ningxia Yellow River Irrigation Area Considering Water – Land Resource Balance

YANG Guiyu^{1,2} LI Shuoyang^{1,2} CHANG Cui^{1,2} PENG Zhigong^{1,2} HE Xiyu^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming to comprehensively implement the water management concept of “prioritizing water conservation and spatial equilibrium”, and support the coordinated development of water resource utilization and ecological security, taking Qingtongxia Helan County Irrigation Area in Ningxia as object, the potential direction of agricultural water conservation focusing on the two core constrains—the regional available water resources and the rationale groundwater depth required for ecological security was analyzed. By employing a water-land resources balance allocation model and setting ten scenarios, potential directions for advanced agricultural water-saving intensification were explored. The results indicated that the following measurement should be implemented to achieve spatially balanced development and synergistic agricultural water-saving, if implementing single water-saving measures: priority should be given to reducing rice planting area and controlled irrigation, followed by improving canal system water utilization efficiency and expanding high-efficiency water-saving irrigation area. The optimal control ranges for these measures were: rice planting reduction ratio should be controlled between 50% and 75% with the remaining area under controlled irrigation; canal system water utilization coefficient should be maintained at 0.64; regarding high-efficiency water-saving irrigation promotion, the area proportion in Yanghuang and Yellow River diversion regions should not exceed 80% and 35%, namely maintaining 28.48 km² and 132.20 km², respectively.

Key words: irrigation area; efficient utilization of water resources; water-saving measurement; groundwater depth; balanced allocation of water and land resources

收稿日期: 2025-04-23 修回日期: 2025-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600)、清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院专项统筹重点项目(SKL-IOW2023TC2307)和宁夏回族自治区重大研发计划项目(2018BBF02022)

作者简介: 杨贵羽(1973—),女,正高级工程师,博士,主要从事水文及水资源学、土壤学和农业水土工程研究,E-mail: guiyuy@iwhr.com

0 引言

我国水资源自然禀赋差,水土资源不匹配,随着经济社会快速发展和生态环境保护力度增加,水资源供需矛盾日益突出。为缓解严峻的水资源情势、促进有限水资源的合理利用,国家通过颁布法规条例^[1-2]、推行节水型社会建设行动^[3]等方式,有效约束了取用水对象,规范了取用水行为,促进了全国用总量零增长^[4]下的经济社会发展。然而,随着节水政策、措施等执行力度的加大,众多节水措施在提高用水效率^[5-7]的同时也引发了一系列生态环境问题。农业作为用水大户、节水主要对象,在长期节水过程中已引发的诸如地下水超采、土地退化、土壤盐渍化等相关生态问题^[8-12]更加突出。这不仅制约着区域自身的可持续发展,而且影响着区域的均衡发展。面对严峻情势,如何深入开展农业节水,维持灌区生态稳定发展、寻求合理节水的平衡点,成为贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”新时代治水思想,践行“四水四定”基本原则最为迫切需要解决的问题。

鉴于此,为协同解决农业水资源短缺和生态问题,本文选择农业用水集中的宁夏青铜峡贺兰县灌区为例,综合考虑用水总量约束和关系土壤生态安全的合理地下水位埋深两大关键要素,借助水土资源均衡配置模型,以保障水资源高效利用和灌区土地不退化为目标,通过情景方案设置,对比分析促进灌区水土健康发展的农业深度节水方向,以期为贺兰灌区全面落实“节水优先”和“以水定地”的农业发展战略提供借鉴。

1 研究区概况

宁夏位于我国西北部黄河中上游地区,降水稀少、蒸发强烈,当地水资源有限。依托黄河穿境而过的优势,北部引黄灌区成为宁夏社会经济的核心地带。然而,由于长期不合理的水资源开发利用加上气候变化影响导致诸如地下水位持续下降、土壤盐渍化、湖泊湿地萎缩等生态问题^[13-16],不仅加剧了区域间空间发展的不均衡,而且也造成了区域内土地质量退化,拉大水土均衡差距,严重影响灌区可持续发展。

贺兰县位于宁夏引黄灌区中北部,隶属于青铜峡灌区(图1),具有引黄灌区共性问题。据统计,全县多年平均水资源量仅为 $4.47 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[17],引黄水量和地下水是灌区发展的主要水源。然而,现状分水指标约束下用水总量^[18]已趋上限(表1);在自然和人工开采共同作用下,引起地下水位持续下降

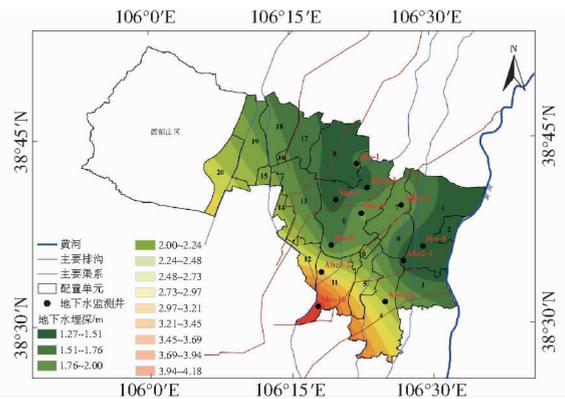


图1 研究区位置与水土资源配置单元划分

Fig. 1 Location of Helan County irrigation area and its water-land resources allocation units

表1 现状用水量与用水总量红线、确权水量对比

Tab. 1 Comparison of total amount of current water used and that of allowable water utilization, authorized water amount

指标	2020年 实际用 水量/ m^3	用水总量红线 指标/ m^3		可用水富余量/ m^3		承载 状况
		2025年	2035年	2025年	2035年	
总量	5.590×10^8	6.090×10^8	5.870×10^8	5.000×10^7	2.800×10^7	承载
红线	10^8	10^8	10^8	10^7	10^7	有限
确权 水量	5.590×10^8	5.570×10^8		-2.000×10^6	10^6	超指 标

(图2)和土壤盐渍化问题。据相关调查,贺兰县盐碱化土地面积约 233.45 km^2 ,占银川盐碱土地面积的 46.1% ^[19]。在严格落实“四水四定”过程中,贺

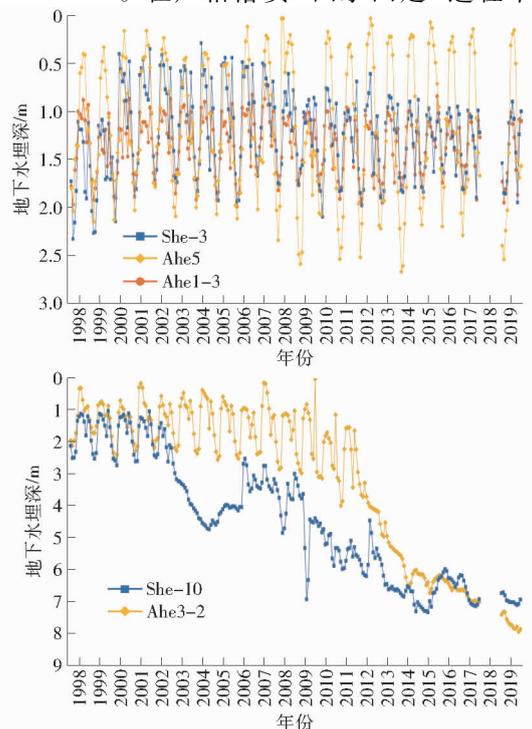


图2 平原区监测井地下水埋深演变

Fig. 2 Temporal evolution of groundwater depth for monitoring well in plain

兰灌区面临水资源短缺及水资源开发利用相伴生的生态问题。因此,开展合理的水土均衡配置成为保障灌区可持续发展的重要任务。其中农业用水作为灌区“水-土-粮食-生态”的重要保障环节,已成为首要抓手。

2 计算方法和数据说明

2.1 计算方法

水土资源均衡配置方法是以用水总量红线和合理地下水生态水位埋深为约束,以合理地下水位埋深控制面积尽可能大和各单元对应土地利用情况下的缺水率尽可能小为均衡调控目标,联合水资源配置模型和地下水数值模拟模型耦合形成的水土资源均衡配置模型为支撑,实现供用水区域时空平衡和区域农业发展与土地可持续发展的时空均衡。

具体计算由 3 层核心优化结构构成,通过 5 个计算模块实现(图 3)。以灌区可供水量为约束,首先采用水资源配置模型实现年尺度有限水量的空间均衡分配;然后,采用均衡优化算法结合灌区水土资源进行年内均衡分配,获得年内各计算单元配置结

果;接着以合理地下水位埋深控制范围为约束,以当前时段空间均衡配置结果作为地下水系统的源汇项,采用地下水数值模拟模型,开展水土资源均衡优化对应的地下水位空间分布模拟,完成结合地下水埋深的时空优化;最后通过对以上过程的循环优化反馈迭代,获得用水总量和合理地下水位共同约束下灌区水土资源的时空均衡分配结果。综合以上可实现地下水和农业可供水分配量作用下“真实”总量约束和区域的水土资源空间均衡分配,促进灌区“生态健康有调控-生产用水有保障-循环发展可持续”的协调发展。

(1) 空间均衡

包括水平向和垂向均衡 2 个维度。水平向均衡是以灌区内各用水单元缺水率方差最小和各用水单元缺水率平方和最小为目标;垂向均衡主要以地下水位埋深控制在不起土地退化和土壤盐渍化的合理范围为目标。

目标函数为

$$\min F_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{I_{S_i} + I_{G_i}}{W_i} \right)^2 \quad (1)$$

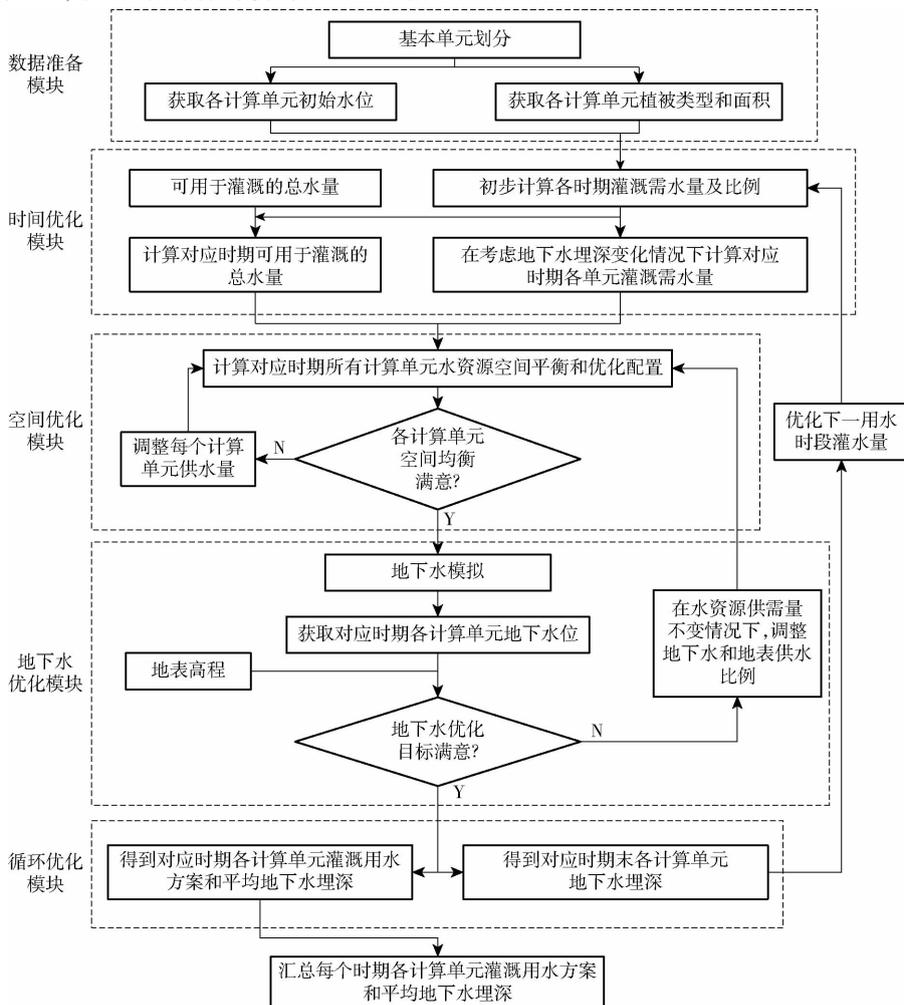


图 3 计算流程

Fig. 3 Flowchart of calculation

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i - I_{S_i} - I_{G_i}}{W_i} \right)^2 \quad (2)$$

其中

$$W_i = \sum_{j=1}^m W_{i,j} \quad (3)$$

$$W_{i,j} = \sum_{k=1}^a \left(\frac{A_{d,i,j,k}(r_{j,k} - f_{j,k}(h_j))}{\eta_d} + \frac{A_{s,i,j,k}(r_{j,k} - f_{j,k}(h_j))}{\eta_s} \right) \quad (4)$$

式中

F_1 ——各单元缺水率方差

F_2 ——各单元缺水率平方和

I_{S_i} ——第 i 个计算单元全年地表水灌溉水量, 万 m^3

I_{G_i} ——第 i 个计算单元全年地下水灌溉水量, 万 m^3

W_i ——第 i 个计算单元全年灌溉需水量, 万 m^3

n ——计算单元数量

j ——作物生育期和冬灌对应月份

$W_{i,j}$ ——第 i 个计算单元第 j 个月的农业灌溉需水量, 万 m^3

k ——种植作物类型数

$A_{d,i,j,k}$ ——地面灌溉方式下第 i 个计算单元第 j 个月第 k 种作物种植面积, km^2

$A_{s,i,j,k}$ ——节水灌溉方式下第 i 个计算单元第 j 个月第 k 种作物种植面积, km^2

$r_{j,k}$ ——第 j 个月第 k 种作物需水净定额, m^3/km^2

η_d ——地面灌溉方式灌溉水有效利用系数

η_s ——节水灌溉方式灌溉水有效利用系数

$f_{j,k}(h_j)$ ——第 j 个月第 k 种作物利用地下水统计量, m^3/km^2

约束条件: 各计算单元灌溉水量不超过其需水量 ($W_{i,j}$); 各干渠地表水灌溉量不超过其最大引水能力, 即

$$I_{S_{i,j}} + I_{G_{i,j}} \leq W_{i,j} \quad (5)$$

$$I_{G_{i,j}} \leq \min(E_{i,j}, G_{i,j}) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^c I_{S_{i,j}} \leq L_b \quad (7)$$

式中 $I_{S_{i,j}}$ ——第 i 个计算单元第 j 个月灌溉地表水可供水量, 万 m^3

$I_{G_{i,j}}$ ——第 i 个计算单元第 j 个月灌溉地下水可供水量, 万 m^3

$E_{i,j}$ ——第 i 个计算单元第 j 个月地下水取水能力, 万 m^3

$G_{i,j}$ ——第 i 个单元第 j 个月地下水最大允许开采量, 万 m^3

L_b ——第 b 个干渠月最大引水能力, 万 m^3

c ——该干渠供水单元数量

(2) 时间均衡

集中体现为对应土地利用情势下配置时段内的均衡, 包括年度均衡和年内均衡。年度均衡体现为不同年全年的供用水均衡匹配程度; 年内均衡是以区域空间均衡年度结果为约束, 结合作物季节性需水量, 获得不同单元时段内各用水单元在灌溉需水时段的供需水均衡程度。二者均以相对缺水率平方和最小为目标。

目标函数为

$$\min F_3 = \left(\frac{W_i - I_{S_i} - I_{G_i}}{W_i} \right)^2 \quad (8)$$

式中 F_3 ——各用水单元灌溉需水时段供需水均衡程度, 具体生育期需水量见文献[20]

约束条件: 将空间均衡优化所得的各计算单元地表水、地下水可供水量分别作为实现均衡优化的约束条件。具体结合生育期供水量约束共同实现, 即满足各计算单元各用水生育期供水量小于等于需水量, 表达式为

$$\sum_{j=1}^m I_{S_{i,j}} \leq I_{S_i} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^m I_{G_{i,j}} \leq I_{G_i} \quad (10)$$

$$I_{S_{i,j}} + I_{G_{i,j}} \leq W_{i,j} \quad (11)$$

(3) 地下水优化

地下水优化是通过地下水数值模拟模型实现灌溉水资源时空优化配置条件下地下水位能够维持在合理埋深, 既不造成盐碱化也不引起土壤退化。将水资源配置优化结果作为上边界, 以防止植被退化的地下水埋深和防控盐渍化的地下水埋深阈值为约束; 通过合理调整地表水与地下水供水比例, 实现区域地下水位优化和盐渍化调控。即地下水优化目标采用地下水埋深偏离值指标最小, 以各地下水观测井处地下水埋深与合理地下水埋深差值累计值最小和位于合理地下水埋深区间面积最大为目标。

优化目标为

$$\min F_4 = \sum_{b=1}^{n_w} \sum_{j=1}^m |H_{b,j} - H^*| \quad (12)$$

$$\max F_4 = C_{A_j} \quad (13)$$

其中

$$H^* = \begin{cases} H_{\min}^* & (H_{b,j} < H_{\min}^*) \\ 0 & (H_{\min}^* \leq H_{b,j} \leq H_{\max}^*) \\ H_{\max}^* & (H_{b,j} > H_{\max}^*) \end{cases} \quad (14)$$

式中 F_4 ——地下水埋深偏离程度

$H_{b,j}$ ——第 j 月第 b 个监测井地下水埋深, m

H^* ——合理地下水埋深上限或下限, m

H_{max}^* ——合理地下水最大埋深, m

H_{min}^* ——合理地下水最小埋深, m

n_w ——地下水观测井数量

C_{A_j} ——位于合理地下水埋深区面积, km^2

综合以上, 通过不同时段水资源优化配置和地下水位优化循环迭代计算, 支撑各计算单元全周期水土资源的均衡分配。详细水土资源均衡配置模型原理参见文献[21]。

2.2 贺兰灌区水土资源均衡配置模型

2.2.1 配置模型

以贺兰县乡镇(农牧场)行政区划为基础, 结合干支渠管理范围与乡级河长制的管理特点, 以乡镇嵌套各干渠管理所管理灌域为对象, 将灌区共划分为20个基本配置单元(图1)。综合统计年鉴和实地调研将各单元土地利用类型归纳为6大类: 水稻、小麦、玉米、麦套玉米、蔬菜、林草和其他作物(包括苜蓿、葡萄和枸杞等); 作物生育期集中于3—8月和11月(冬灌), 共7个月, 即 $m=7, a=6$ 。

其中, 作物灌溉需水量采用定额法计算。以《宁夏农业灌溉用水定额》(宁政办规发[2020]20号)[22]为基准, 综合调查资料 and 不同作物对地下水埋深较浅区域地下水吸收量修正确定灌溉定额[23]; 再结合灌溉面积、作物结构、灌水方式和灌溉水利用系数等要素最终确定灌溉需水量。

可供水量以可利用水资源量和水权确权用水量约束。对于合理地下水埋深约束范围, 按照生育期不同控制为 $1.2 \sim 3 \text{ m}$ [24-25], 如图4所示。

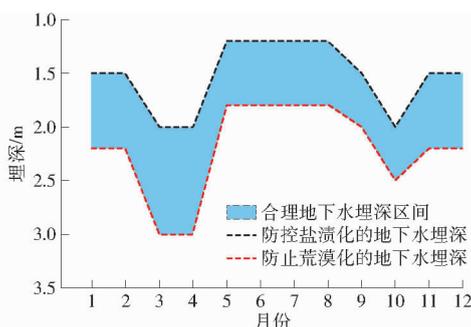


图4 各时段灌区合理地下水埋深控制区间

Fig. 4 Control range of rational groundwater depth in Helan irrigation area for different months

2.2.2 地下水模型

以 Modflow 为工具, 综合研究区水文地质结构和供耗水特点, 概化地下水系统与模拟区域边界后进行模型构建与模拟。

(1) 地下水系统概化

综合平原区西部边缘贺兰山东麓断裂带与山体过渡相连, 东面以黄河断裂带与鄂尔多斯地块相连,

水平方向上具有明显的分带特征且由西到东包括山前洪积倾斜平原地段、冲洪积平原地段和冲湖积平原地段, 研究区内含水层主要为第四系松散岩类孔隙水等特点, 将含水层概化为非均质、各向同性三维非稳定流系统。

(2) 边界概化

基于流场特征和地层结构特点, 将西部贺兰山前为边界, 定义为二类流量补给边界; 东部以黄河为边界, 简化处理为一类定水头边界; 南北部贺兰县界为边界, 属于人为划定边界, 处理为通用水头边界。垂向边界以潜水含水层自由水面为系统上边界; 潜水与周围环境发生垂向水量交换项包括: 田间入渗补给、大气降水入渗补给、渠系渗漏补给、蒸发排泄、排水沟排泄等。模型底部基本为相对隔水的粘性土层, 概化为隔水边界。

(3) 模型模拟

综合区域土壤类型、水文地质结构以及参数空间变异特点和灌区管理需求, 按照 $0.4 \text{ km} \times 0.4 \text{ km}$ 网格将模拟区剖分为 6753 个计算单元(图5)。以月为应力期单位, 每个应力期分 3 个时间步长, 初始流场为 2016 年 1 月 1 日, 通过对 11 眼地下水监测井实测水位与模拟水位对比(图6), 开展模型参数率定、校验, 完成模型构建。

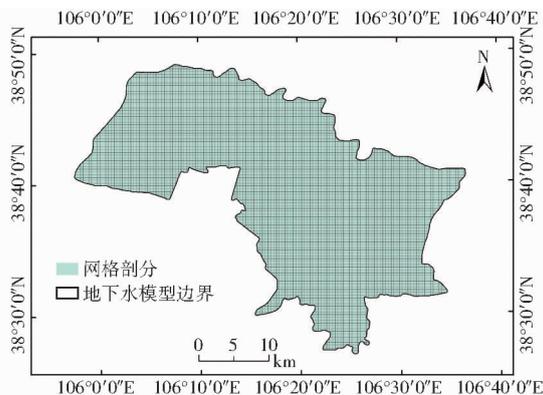


图5 地下水模拟范围及剖分单元

Fig. 5 Groundwater simulation range and subdivision units

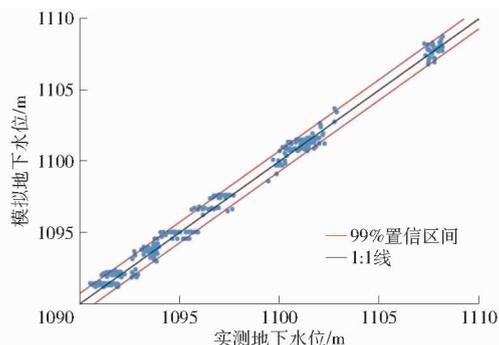


图6 监测井实测与模拟水位拟合

Fig. 6 Fitting diagram of observed water level and simulated water level in monitoring wells

2.3 数据来源与情景方案设置

以贺兰县灌区 2017 年经济社会发展水平为基准年对应的土地利用中种植结构为基础,开展土地利用结构下水土资源时空均衡配置。涉及的基础数据及其来源具体如下:作物种植面积,来自《宁夏统计年鉴》^[26]和灌溉管理部门的统计数据(<http://slt.nx.gov.cn>);典型作物用水定额采用《宁夏农业灌溉用水定额》(宁政办规发[2020]20号);各片区灌溉用水量数据来自《宁夏水资源公报》^[18]和《宁夏水利统计公报》^[27];地下水监测井水位数据和地质剖面数据来自宁夏水文水资源调查局和地质云(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>);用于计算作物需水量的气象数据来自中国气象数据共享网(<http://www.cma.gov.cn>)。

结合研究区发展规划和农业节水措施共设置 10 个情景方案(表 2)。其中,基准情景方案 J0:总播种面积为 488.18 km²,包括水稻 127.684 km²、小麦 47.504 km²、玉米 40.220 km²、麦套玉米 18.683 km²、蔬菜 70.382 km²、其他作物 183.705 km²;高效节灌面积按照引黄灌区和扬黄灌区分别占对应灌区面积的比例为 58% 和 20.8%,即维持 20.61 km² 和 91.65 km²;灌区平均渠系水利用系数为 0.605;水稻传统灌溉方式灌水量为 1.499 × 10⁶ m³/km²。

表 2 情景方案设置
Tab.2 Scenarios setting

节水措施	方案	具体内容
基准方案	J0	2017 年发展基础和节水条件
种植结构调整	S1	水稻面积 50% 退减为玉米
	S2	水稻面积 75% 退减为玉米
高效节灌面积发展	S3	扬黄灌区 70%,引黄灌区 30%
	S4	扬黄灌区 80%,引黄灌区 35%
	S5	扬黄灌区 90%,引黄灌区 40%
渠系水利用系数提高	S6	渠系水利用系数提高至 0.62
	S7	渠系水利用系数提高至 0.64
	S8	渠系水利用系数提高至 0.66
水稻控灌	S9	水稻采用控制灌溉(净定额 1.184 × 10 ⁶ m ³ /km ²)

其他情景方案(S1~S9):在基准方案基础上,按照量水发展、以水定地基本原则,从种植结构调整和节水工程措施实施 2 方面设置 9 个情景方案。其中,种植结构调整,综合考虑当地种植结构变化,按照适度压减高耗水水稻种植面积改种玉米,并对剩余水稻施行控灌;工程措施,以增加高效节灌面积比例与提高渠系水利用系数为主。

3 结果与分析

通过水土资源均衡配置模型对所设情景方案计

算,揭示不同情景方案缺水率和合理地下水埋深所占面积变化。

3.1 缺水率变化

由图 7 可见,不同方案缺水率均有不同程度变化。其中,调整种植结构方案 S1 和 S2,即当水稻面积压减 50%~75% 时,全灌区缺水率维持在 10%~15% 之间,相对于基准方案,缺水率降低 30%~47.6%,节水效果相对明显。

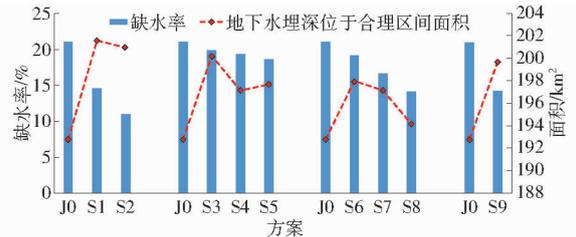


图 7 不同方案下缺水率和地下水埋深位于合理区间面积变化

Fig.7 Change of water shortage rate and that of reasonable range area of groundwater depth in scenarios

高效节灌面积发展方案 S3~S5,即当扬黄灌区和引黄灌区节灌面积占比分别提高到 70%~90% 和 30%~40% 时,全灌区缺水率维持在 19%~20%,且随着节灌面积占比增加,缺水率呈下降趋势,但与基准年方案相比,下降并不明显。

渠系水利用系数提高方案 S6~S8,即当渠系水利用系数提高到 0.62~0.66 时,缺水率由 19.1% 下降为 14.1%,与基准年方案相比,变化明显。

水稻控灌方案 S9,即水稻灌溉定额由现状 1.499 × 10⁶ m³/km² 降为控制灌溉定额 1.184 × 10⁶ m³/km²,相应缺水率由基准年的 21% 降为 14.27%。

比较结果可见,各种节水措施对缺水率均有影响,且通过均衡配置后,缺水率在空间上也呈现一定的均衡分布态势(图 8);但不同方案对缺水率的影响程度不同。其中影响最大的方案为:压减 75% 水稻面积转种玉米方案 S2、执行水稻控灌方案 S9、渠系水利用系数提高为 0.66 方案 S8;对缺水率影响相对较小方案为高效节灌灌溉面积发展方案中的引黄灌区提高至 70%~80%、扬黄灌区提高至 30%~35% 方案 S3 和方案 S4,即引黄、扬黄区域高效节灌面积分别维持不超过 28.48 km² 和 132.20 km²。

3.2 地下水埋深变化

伴随着缺水率下降,不同方案下地下水埋深处于合理区间面积也随之变化(表 3 和图 7)。相较基准方案,各方案对地下水埋深调控效果总体呈现为:灌区内位于地下水生态水位埋深阈值范围面积均有增加,增加率维持在 0.72%~4.58% 之间;不

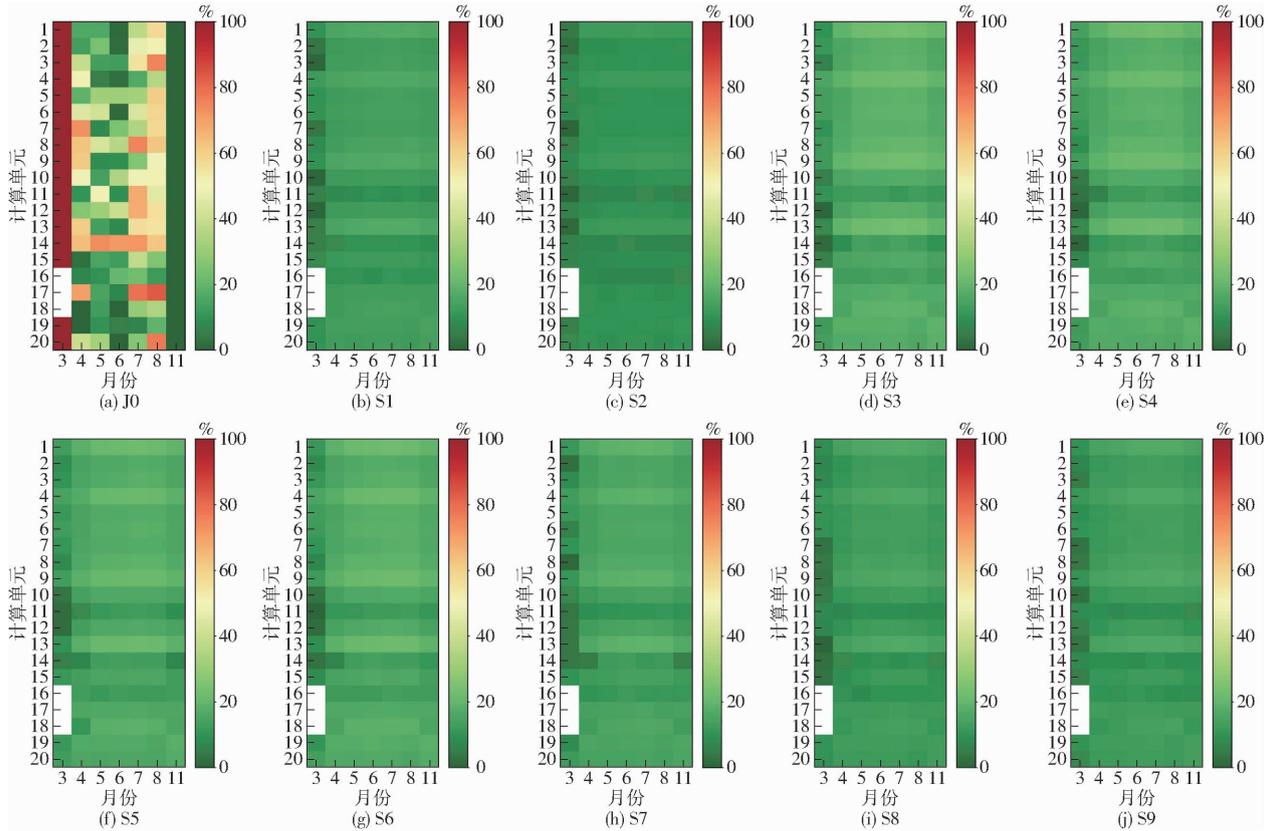


图 8 典型方案作物生育期内缺水率时空变化

Fig. 8 Spatial-temporal changes of water shortage rate in crop growth stage in typical scenarios

表 3 不同方案作物各生育期地下水处于合理埋深面积

Tab.3 Area under reasonable depth of groundwater in different growth stages in scenarios

方案	解冻至	作物	冬灌至		与基准 年相比 增长率/%	
	夏灌前 (3— 4月) 面积/ km ²	生长期 (5— 9月) 面积/ km ²	冬灌前 (9— 10月) 面积/ km ²	次年解 冻前 (11— 2月) 面积/ km ²		
J0	265.15	92.41	253.28	160.42	192.82	
S1	276.86	97.34	260.59	171.82	201.65	4.58
S2	278.28	96.2	256.88	172.60	200.99	4.24
S3	272.35	98.66	263.10	166.77	200.22	3.84
S4	266.86	99.67	260.77	161.36	197.16	2.25
S5	265.72	99.2	261.98	163.92	197.71	2.54
S6	268.69	98.74	261.73	163.04	198.05	2.71
S7	268.36	97.18	259.99	162.91	197.11	2.23
S8	264.08	96.28	256.34	160.14	194.21	0.72
S9	270.82	96.64	263.51	167.83	199.70	3.57

同生育期空间上也呈现均衡分布态势。但不同方案差异较大,其中以种植结构调整方案 S1 和方案 S2 最优;高效节灌面积提升和实施水稻控制灌溉方案 S3 和方案 S9 次之;渠系水利用系数提升方案 S8 最小。

4 讨论

为深入贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、

两手发力”的新时代治水思想,践行“四水四定”基本原则,在阐述水土资源空间均衡发展辩证关系的基础上,选择青铜峡腹地贺兰县灌区为例,以灌区水循环以及 2017 年经济发展和对应用水水平为基础,从工程措施和非工程措施 2 方面设置 10 个情景方案,借助水土资源均衡配置模型,从降低缺水率并保障合理地下水位控制范围尽可能大为目标,分析了不同方案的节水效果和合理地下水位保持情况。

综合缺水率和地下水埋深变化发现,方案 S2 (压减 75% 水稻转种玉米且剩余部分采用控灌)较方案 S1 (压减 50% 水稻转种玉米且剩余部分采用控灌),灌区缺水率均较基准方案有较大缓解,但处于合理地下水位控制范围面积却由 201.65 km²减少至 200.99 km²,说明若在其他节水措施不变的情形下,当水稻压减超过一定程度,在提高灌溉用水效率,减少需水量的同时,将造成灌溉渗漏补给地下水水量下降,进而造成地下水合理埋深范围较小。

方案 S3 ~ S5 中,随着节灌面积的推广,缺水率一致下降,且地下水位控制在合理埋深范围面积也在增加;但对于处于合理地下水位埋深控制范围而言,方案 S4 ~ S5 小于方案 S3,呈减少趋势。说明在现状基准用水条件下,若采用单一的高效节灌措施,当扬黄和引黄灌区高效节灌面积占比分别超过

80%和35%,由于灌溉用水需求量减少,有限的灌溉水难以补给地下水,从而造成地下水位埋深下降,即呈现对合理地下水位控制出现负面影响。

方案S6~S8中,随着渠系水利用系数提高,区域缺水率和位于合理地下水位埋深范围面积均优于基准年方案,但随着渠系水利用系数提高,处于合理地下水位埋深范围面积却呈下降趋势,且由0.64继续提高到0.66过程中,地下水位埋深处于合理范围面积急剧下降。

比较不同措施,从缺水率来看(图7),当大幅压减水稻种植面积,对供需缺水率的影响最大;其次,为灌溉水有效利用系数;最后是高效节水面积措施实施。但对于合理地下水位埋深控制范围表现为:以压减水稻种植面积并进行控管最优,高效节灌面积增加居中,最后为渠系水利用系数不超过0.66。这可能源于不同节水措施对地下水的渗漏补给不同,造成地下水位埋深首先满足控盐水位,因而合理面积占比增加,但随着节水程度增加,可能由于灌溉补给地下水量进一步减少,造成地下水位埋深超过土壤退化范围,从而出现合理地下水位埋深控制范围呈先增大后减小的变化特征。因此,在灌区发展中,应综合实现灌溉供需水平衡和合理地下水位埋深的时空均衡;若要进一步开展农业深度节水,建议应优先开展水稻压减并执行控灌,其次为提高渠系水利用系数和推广高效节灌面积;且按照实施单一措施,满足常规水平年农业灌溉供水保证率85%且地下水具有常年调节的现实要求,灌区未来农业深

度节水的适宜节水措施和控制阈值应为:退减水稻种植面积50%~75%且剩余部分执行控灌、渠系水利用系数维持在0.64左右;在发展高效节灌面积方面,扬黄区域节灌面积占比应不超过80%,引黄区域节灌面积不超过35%。

需要说明的是,本研究是以单一节水措施为对象开展的模拟分析。考虑到多种措施综合实施具有相互叠加效应,相应的结果可能有所变化。多措施组合的农业深度节水适宜节约用水方向和相应控制阈值需进一步研究。

5 结束语

在阐述水土资源空间均衡发展辩证关系的基础上,选择青铜峡腹地贺兰县灌区为例,以2017年经济发展和用水水平为基础,从工程措施和非工程措施2方面设置10个情景方案,借助水土资源均衡配置模型,以缺水率最小和地下水生态水位合理控制面积最大为目标,探讨提出了贺兰县灌区未来农业深度节水方向和可能阈值。结果表明,为保障水资源利用效率和地下水位埋深处于合理范围,在现状节水情势下,应进一步开展农业深度节水,实施单一节水措施时建议未来适宜的节水措施和控制阈值应为:种植结构调整方面,考虑退减水稻种植面积50%~75%且剩余部分执行控灌;在工程措施方面,应提高渠系水利用系数且维持在0.64和扬黄、引黄区域高效节灌面积比不超过80%和35%。若综合利用不同措施,以上控制阈值应适当放松。

参 考 文 献

- [1] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国水法[M]. 北京:法律出版社,1988.
- [2] 中华人民共和国国务院. 节约用水条例[Z]. 2024.
- [3] 中华人民共和国发展改革委员会、水利部. 国家节水行动方案(2019—2030)[Z]. 2019.
- [4] 新华社:水利部部长李国英—近10年全国用水总量实现零增长[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/xw/mtzs/xhsxhw/202503/t20250309_1728537.html.
- [5] 彭致功,张宝忠,刘钰,等. 基于灌溉制度优化和种植结构调整的用水总量控制[J]. 农业工程学报,2018,34(3):103-109. PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Constraint of total water consumption amount based on optimized irrigation schedule and planting structure adjustment[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3):103-109. (in Chinese)
- [6] 庞桂斌,徐征和,杨士红,等. 控制灌溉水稻叶片水分利用效率影响因素分析[J]. 农业机械学报,2017,48(4):233-241. PANG Guibin, XU Zhenghe, YANG Shihong, et al. Influence factors analysis of rice leaf water use efficiency under controlled irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):233-241. (in Chinese)
- [7] 尹飞虎,张富仓. 新疆农业节水与水资源高效利用的对策与建议[J]. 水资源与水工程学报,2025,36(2):1-8. YIN Feihu, ZHANG Fucang. Countermeasures and recommendations for agricultural water conservation and high-efficient water resources utilization in Xinjiang[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2025, 36(2):1-8. (in Chinese)
- [8] 康绍忠. 中国农业节水十年:成就、挑战与对策[J]. 中国水利,2024(10):1-9. KANG Shaozhong. Ten years of agricultural water-saving in China: achievements, challenges and measures[J]. China Water Resources, 2024(10):1-9. (in Chinese)
- [9] 王军涛,李强坤,景明,等. 黄河灌区节水与生态环境问题分析[C]//2021中国水资源高效利用与节水技术论坛论集,2021.
- [10] 王水献,吴彬,杨鹏年,等. 焉耆盆地绿洲灌区生态安全下的地下水位埋深合理界定[J]. 资源科学,2011,33(3):422-430. WANG Shuixian, WU Bin, YANG Pengnian, et al. Determination of the ecological groundwater depth considering ecological integrity over oasis irrigation areas in the Yanqi Basin[J]. Resources Science, 2011, 33(3):422-430. (in Chinese)

34(5): 430-435, 442.

LUO Yufeng, MA Zhen, LÜ Xinwei, et al. Accuracy assessment of rainfall forecast and analysis on water-saving irrigation strategies during rice growing seasons in South China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(5): 430-435,442. (in Chinese)

- [25] ALLEN R G. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation & Drainage Paper, 1998.
- [26] LUO Y, KHAN S, CUI Y, et al. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2009, 7: 1-9.
- [27] HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53-63.
- [28] 陶国通, 王景雷, 南纪琴, 等. 基于温度的作物需水量估算方法[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2019-2025.
TAO Guotong, WANG Jinglei, NAN Jiqin, et al. Calculation method for crop water requirement based on air temperature[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2019-2025. (in Chinese)
- [29] GU Z, QI Z, MA L, et al. Development of an irrigation scheduling software based on model predicted crop water stress[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 208-221.
- [30] 陈梦婷, 杨琳, 吴光星, 等. 考虑降雨有效利用的水稻灌溉模式的优化[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 832-837.
CHEN Mengting, YANG Lin, WU Guangxing, et al. Optimization of paddy rice irrigation schedule considering effective utilization of rainfall[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(8): 832-837. (in Chinese)

(上接第 336 页)

- [11] 王立洪, 张斌, 万英. 新疆南疆农业灌溉对生态与环境影响[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 30-33.
WANG Lihong, ZHANG Bin, WAN Ying. Effect of agricultural irrigation on the ecological environment in Southern Xinjiang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 30-33. (in Chinese)
- [12] 杨柳. 陕西省泾惠渠灌区发展中的生态环境问题分析及调控研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
YANG Liu. Ecological environment problems analysis and regulation study in the development of Jinghui canal irrigation district in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 刘涛. 宁夏引黄灌区盐碱荒地水肥盐与植物根系调控技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
LIU Tao. The control techniques of water-nutrient-salt and plant root in a saline-alkali wasteland of Ningxia Irrigation Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [14] 程良, 张红玲, 张娜, 等. 宁夏引黄灌区水资源开发利用存在的问题及对策[J]. 农业科技与信息, 2023(12): 122-126.
CHENG Liang, ZHANG Hongling, ZHANG Na, et al. Problems and countermeasures of water resources development and utilization in Ningxia's Yellow River irrigation area[J]. Agricultural Science-technology and Information, 2023(12): 122-126. (in Chinese)
- [15] 靳晓辉, 樊玉苗, 段浩, 等. 银川平原地下水位对黄河流域水量统一调度的时空响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 45-51.
JIN Xiaohui, FAN Yumiao, DUAN Hao, et al. Temporal and spatial response of groundwater depth in Yinchuan Plain to the integrated water regulation of the Yellow River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(4): 45-51. (in Chinese)
- [16] 陈探, 赵爽, 张大鹏. 1990—2021年新疆典型湖泊水量变化遥感估算[J]. 应用生态学报, 2024, 35(11): 3141-3148.
CHEN Tan, ZHAO Shuang, ZHANG Dapeng. Remote sensing estimation of water volume changes of typical lakes in Xinjiang from 1990—2021[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(11): 3141-3148. (in Chinese)
- [17] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏回族自治区水资源综合调查评价[R]. 2019.
- [18] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏水资源公报[R]. 2017—2023.
- [19] 宁夏回族自治区遥感调查院. 宁夏银北-卫宁地区盐渍地土地调查项目成果报告[R]. 2022.
- [20] 杨贵羽, 彭致功, 王浩, 等. 灌区水土资源均衡配置与健康评价[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [21] LI Shuoyang, YANG Guiyu, WANG Hao, et al. A spatial-temporal optimal allocation method of irrigation water resources considering groundwater level[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 1080.
- [22] 宁夏回族自治区. 农业灌溉用水定额[Z]. 2023.
- [23] 谢新民, 赵文骏, 裴源生, 等. 宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [24] 阮本清, 韩宇平, 蒋任飞, 等. 生态脆弱地区适宜节水强度研究[J]. 水利学报, 2009, 39(7): 809-814.
RUAN Benqing, HAN Yuping, JIANG Renfei, et al. Appropriate water saving extent for ecological vulnerable area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 39(7): 809-814. (in Chinese)
- [25] 孙宪春, 金晓媚, 万力, 等. 地下水对银川平原植被生长的影响[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 321-324.
SUN Xianchun, JIN Xiaomei, WAN Li, et al. Effect of groundwater on vegetation growth in Yinchuan plain[J]. Geoscience, 2008, 22(2): 321-324. (in Chinese)
- [26] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总局. 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016-2020.
- [27] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏水利统计公报[M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 2020.