doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.062

气候变化条件下基于过程的灌区多尺度灌溉用水优化

姜　瑶[1,2]　颜泽文[1]　熊吕阳[1]　贾　卓[1]　黎良辉[1]

(1. 南昌大学工程建设学院, 南昌 330031; 2. 江西省水利科学院鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330031)

摘要: 针对灌区水资源优化配置对系统真实过程响应及其时空变化描述不足的问题,本文基于系统多层优化框架,考虑灌区农业水文要素的空间分布特征,将农业水文模型与优化模型紧密耦合,构建了基于过程的灌区灌溉用水优化模型,并以黑河中游盈科灌区为案例研究区,以 20 a(2003—2022 年)气象数据为耦合模型输入,量化了气候变化所带来的不确定性,探讨了 3 个灌溉供水水平下灌区不同尺度的灌溉用水优化配置及其对气候变化的响应。结果表明,各尺度灌溉量-产量/效益最优关系的时空差异明显,各尺度灌溉配水量受气候条件变化的影响明显,同一灌溉水平不同气候条件下,产量和效益表现为随着气候由有利年到不利年变化而增大。

关键词: 灌溉用水; 模拟-优化; 耦合; 农业水文模型; 气候变化

中图分类号: S274　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0718-11　　**OSID**:

Process-based Optimization of Multi-scale Irrigation Water Allocation Considering Climate Changes

JIANG Yao[1,2]　YAN Zewen[1]　XIONG Lüyang[1]　JIA Zhuo[1]　LI Lianghui[1]

(1. *School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang* 330031, *China*
2. *Innovation Center of Poyang Lake Ecological Water Conservancy Technology, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang* 330031, *China*)

Abstract: The optimal allocation of water resources in irrigation districts usually did not adequately describe the real response of the physical processes of the irrigation system, and also did not consider the temporal and spatial changes of the elements and processes. Therefore, aimed at developing a process-based optimization model for irrigation water allocation. The model was constructed by coupling an agro-hydrological model (SWAP - EPIC) with a regional multi-level optimization model, which can describe the agro-hydrological processes as well as its spatial-temporal differences within an irrigation district. The Yingke Irrigation District (YID) in the middle reaches of the Heihe River basin was taken as a case study area. The climate data in 20 years (2003—2022) was used as the input of the coupling model to quantify the uncertainty caused by climate changes. Meanwhile, three irrigation water supply levels were also considered in the optimization model. The optimal allocation of irrigation water at different scales (irrigation district scale, canal scale and field scale) and its response to climate changes under three irrigation water supply levels were discussed. The results showed that the optimal irrigation - yield/benefit relationships at different scales existed significant spatial-temporal differences due to the influences of agro-hydrological environment changes like different climate conditions and soil - crop fields distributions. The optimal allocation of irrigation water at different scales were significantly affected by climate changes. Under the same irrigation water supply level but different climate conditions, the yield and irrigation benefit were increased with the climate condition from unfavorable year to favorable year. The research result can provide an invitational method and scientific reference for the irrigation water allocation optimization in the irrigated areas.

Key words: irrigation water use; simulation - optimization; coupling; agro-hydrological model; climate change

收稿日期: 2024-06-11　修回日期: 2024-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52269012)、江西省自然科学基金项目(20232BAB214084、20243BCE51083)和江西省水利科学院开放研究基金项目(2022SKLS06)

作者简介: 姜瑶(1989—),女,讲师,博士,主要从事灌区水文过程及用水调控研究,E-mail: jiangyao313@ncu.edu.cn

通信作者: 熊吕阳(1993—),男,讲师,博士,主要从事灌区水文模型、农业面源污染和农业用水调控研究,E-mail: xionglvyang@ncu.edu.cn

0　引言

水是粮食生产和社会经济发展不可替代的宝贵资源，随着人口大规模增加和社会经济快速发展，加之环境污染、气候变化等问题，水资源供需矛盾日益凸显[1-2]，直接制约区域可持续发展。在水资源短缺背景下，确保合理配置灌区水资源，提高农业用水效率具有重要意义[3]。灌区水资源优化配置是实现灌区高效用水的有效手段之一。

灌溉系统是一个多因素耦合的复杂动态系统[4]，系统内部的过程与要素通常具有时间动态性和空间异质性。传统优化模型的核心一般是用一组描述变量之间数学关系的经验函数和约束来概化灌溉系统[5]，不能充分考虑系统内物理过程的动态性和影响因素的空间分布[6]。同时，在灌区水资源优化配置过程中存在诸多不确定性[7]，现阶段研究大多通过引入不确定性分析方法对不确定性参数进行直接描述，以此考虑参数不确定性对灌区水资源优化配置的影响，例如灌区供水、需水不确定性[8]、降水不确定性[9]、管理因素不确定性[7]等。然而，除了参数本身不确定性，各因素间的相互作用关系也会随着环境变化（如气候变化）而变化，存在不确定性，但当前考虑这种关系本身不确定性的灌区水资源优化配置研究较少。典型例子如灌区灌溉水优化配置模型中常用的作物水分生产函数，它描述了作物产量与水量间的关系，会因作物类型、土壤、气候等环境的不同而不同。在优化模型中，水分生产函数除基于田间试验得到外，大多数是基于经验模型进行量化表征[10-11]。这 2 种方法得到的水分生产函数其实是一定环境条件下确定的变化关系，并不能真正反映灌溉系统内真实的物理过程响应及其时空变化。

模拟模型能很好地描述灌溉系统的物理过程和空间特征，能模拟和预测用户自定义情景下的水转化过程响应，将模拟模型与优化模型结合应用，可弥补传统优化模型不足，体现出更多优势。当前，模拟-优化耦合模型已在区域多水源优化配置[12]、输配水调控[13]、地下水管理[14]等方面得到广泛应用，并逐渐在灌区水资源优化配置研究中得到应用。在灌区灌溉用水优化方面，早期研究多是将模拟模型与优化模型进行松散结合，即通过模型建立作物-水分响应关系，并将此量化关系输入到优化模型中[15-16]。近年来，一些灌区水资源优化配置研究开始采用动态耦合方式实现模拟-优化的同步运行，如 LI 等[17]构建了田间灌溉制度优化的模拟-优化模型。LI 等[18]将田间水盐平衡模型与优化模型耦合用于田间灌溉排水决策。然而，紧密耦合方式在搜索最优解的过程中会反复运行模拟模型，使得模型求解时计算成本巨大，区域尺度参数和影响因素的空间变化会进一步加剧求解难度，从而制约了模拟-优化耦合方式在区域尺度的应用。

因此，本研究基于系统多层优化框架，并考虑灌区农业水文要素空间分布特征，将农业水文模型与优化模型紧密耦合，构建基于过程的灌区灌溉用水优化模型，并将其应用于黑河流域中游盈科灌区，以实现气候变化条件下基于过程的灌区灌溉用水优化和空间配置，为气候变化背景下灌区水资源管理和调控提供技术支撑和科学参考。

1　模型构建

1.1　模型框架

1.1.1　基于过程的灌区灌溉用水优化模型

基于文献[19]提出的系统多层优化框架和模拟-优化耦合方式，构建具有 3 层结构的灌区灌溉用水优化模型，模型框架如图 1 所示。第 1 层为田间尺度灌溉制度优化，以农业水文模型为基础，将其与优化算法紧密耦合，建立不同农田类型（即作物-土壤单元）的模拟-优化耦合模型，以实现田间尺度灌溉水生产力最大化。第 2 层为渠系尺度优化，基于第 1 层模拟-优化结果，以渠系尺度灌溉效益最大为目标，建立基于过程的渠系尺度灌溉配水优化模型，对各渠系控制区内不同作物-土壤单元间的灌溉水量进行优化配置。第 3 层为灌区尺度优化，以第 2 层优化结果为基础，以灌区总灌溉效益最大为目标，建立基于过程的灌区尺度灌溉配水优化模型，优化灌区内不同渠系控制区之间的灌溉配水量。有关模型的数学描述如下：

（1）第 1 层：不同作物-土壤单元内灌溉制度优化（田间尺度）

目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_i = Y_i(X_{is}) \\ \min X_i = \sum_{s=1}^{S} X_{is} \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$X_{ismin} \leqslant X_{is} \leqslant X_{ismax} \tag{2}$$

式中　X_{is}——作物-土壤单元 i 内作物生长阶段 s 灌溉量，mm

X_i——作物-土壤单元 i 总灌溉量，mm

Y_i——作物-土壤单元 i 产量，kg/hm^2

S——作物生长阶段总数

X_{ismax}——作物-土壤单元 i 内作物生长阶段 s 最大灌溉量，mm

X_{ismin}——作物-土壤单元 i 内作物生长阶段 s 最小灌溉量，mm

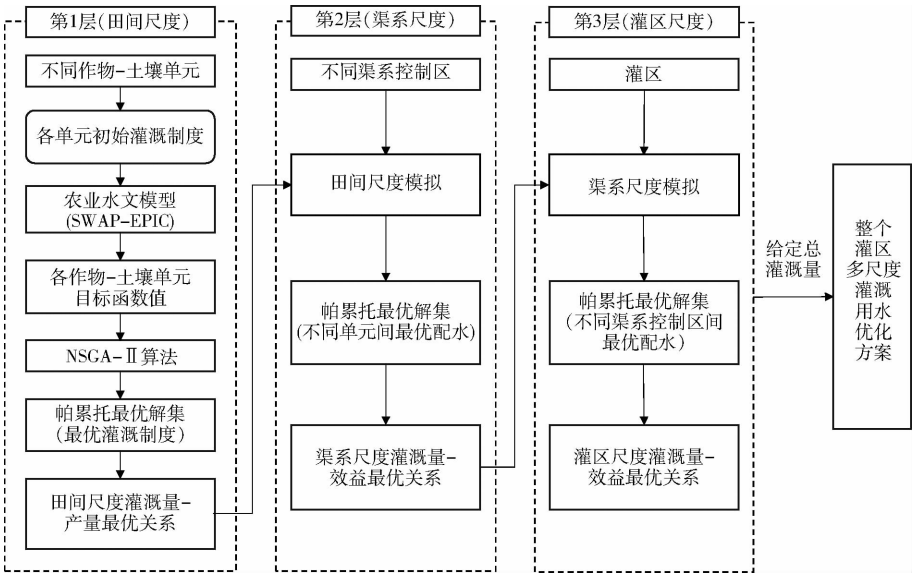

图 1 基于过程的灌区灌溉用水优化模型框架及求解流程

Fig. 1 Framework of process-based optimization model for irrigation water allocation and its solution flow

(2)第 2 层:各渠系控制区内不同作物-土壤单元间灌溉配水优化(渠系尺度)

目标函数为

$$\begin{cases}\max B_j = \sum_{i=1}^{I}(Y_i(X_i)A_{ji}C_i)/A_j \\ \min X_j = \sum_{i=1}^{I}(X_i A_{ji})/A_j\end{cases} \tag{3}$$

其中

$$X_{i\min} \leqslant X_i \leqslant X_{i\max} \tag{4}$$

式中 B_j——渠系控制区 j 灌溉效益,元/hm^2

X_j——渠系控制区 j 总净灌溉量,mm

A_{ji}——渠系控制区 j 内作物-土壤单元 i 种植面积,hm^2

C_i——作物-土壤单元 i 内作物市场价格,元

A_j——渠系控制区 j 总灌溉面积,hm^2

I——作物-土壤单元总数

$X_{i\max}$——作物-土壤单元 i 最大总灌溉量,mm

$X_{i\min}$——作物-土壤单元 i 最小总灌溉量,mm

(3)第 3 层:灌区内不同渠系控制区间灌溉配水优化(灌区尺度)

目标函数为

$$\begin{cases}\max B = \sum_{j=1}^{J}(B_j(X_j)A_j) \\ \min X = \sum_{j=1}^{J}(X_j/\eta_j A_j)\end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\sum_{i=1}^{I}(X_{i\min}A_{ji})/A_j \leqslant X_j \leqslant \sum_{i=1}^{I}(X_{i\max}A_{ji})/A_j \tag{6}$$

式中 B——灌区总灌溉效益,元

X——灌区总灌溉供水量,m^3

η_j——渠系控制区 j 灌溉水利用效率

J——渠系控制区总数

1.1.2 农业水文模型

第 1 层中农业水文模型采用 SWAP - EPIC 模型[20],用于模拟作物-土壤单元内的农业水文过程。SWAP - EPIC 模型将传统的 SWAP 模型[21]与 EPIC 模型[22]的作物生长模块耦合,改进了原 SWAP 模型中的作物模拟模块和土壤水模块,可以更好地模拟田间农业水文过程和作物生长以及作物实际产量,且所需参数相对较少,在以往研究中有较好地应用[23-24]。模型输入数据主要包括土壤参数和作物信息、逐日气象数据(辐射、风速、水汽压和温度)、灌溉制度等,同时输出各深度土壤含水率、水平衡分量(蒸散量、深层渗漏量和土壤储水量变化量)、作物生长指标(干生物量、叶面积指数和作物高度)和作物产量。

1.2 模型求解

优化过程采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA - Ⅱ)[25]进行求解,其中第 1 层为模拟-优化耦合计算,第 2 层和第 3 层分别基于上一层优化结果进行优化求解,求解流程如图 1 所示,具体求解步骤包括:

(1)调用第 1 层模型。针对每个作物-土壤单元,采用拉丁超立方抽样方法,生成灌溉制度的初始样本,并将其作为输入驱动模拟模型,随后根据模拟结果估算优化目标函数值。在此基础上,利用 NSGA - Ⅱ进行优化计算,生成新一代灌溉制度样本,以此进行模拟-优化的迭代运算,并最终得到满足两个目标的帕累托最优解集(即最优灌溉制度),即田间尺度灌溉量-产量最优关系。

(2)将第 1 层通过模拟-优化得到的各单元灌溉量-产量最优关系作为模拟替代,代入第 2 层优化

模型中，进行各渠系控制区内不同单元之间的灌溉配水优化。基于 NSGA－Ⅱ算法，获得该层模型的帕累托最优解集，即各渠系控制区内不同作物-土壤单元间的最优灌溉配水方案，以及对应的渠系尺度灌溉量-效益最优关系。

（3）将第 2 层得到的渠系尺度灌溉量-效益最优关系作为第 3 层优化的模拟替代，调用第 3 层优化模型，基于 NSGA－Ⅱ进行求解，得到灌区内不同渠系控制区间的最优灌溉配水方案及相应的灌区尺度灌溉量-效益最优关系。

（4）在不同灌区总供水量条件下，通过反向搜索不同尺度灌溉量-产量/效益的最优关系，得到整个灌区各尺度灌溉配水优化方案及其相应的最大产量/效益。

2　实例研究

2.1　研究区概况

以我国西北内陆黑河流域中游盈科灌区作为案例研究区（图 2）。盈科灌区为黑河流域中游绿洲的三大灌区之一，位于甘肃省张掖市，总面积 192 km^2，其中灌溉面积约 134 km^2，占总面积的 69%。盈科灌区属温带大陆性干旱气候，冬季寒冷干燥，春秋多风少雨。灌区年平均气温 7℃左右，日照时数 3 000 h 以上，多年（2003—2022 年）平均降雨量仅为 133 mm，无霜期 140 d 左右。灌区耕作层（0～140 cm）土壤质地主要以粉壤土和壤土为主。灌区内主要种植玉米、春小麦和一些经济作物，其中玉米和春小麦种植面积约占总种植面积的 83%，经济作物以蔬菜为主，包括包菜、辣椒等，面积占 15% 左右[26]。盈科灌区灌溉渠系由 1 条主干渠、2 条分干渠以及1 000 多条下级分配渠道组成（图 2），由盈科干渠从东总干渠引黑河水进行灌溉，灌溉方式以漫灌或传统畦灌为主。

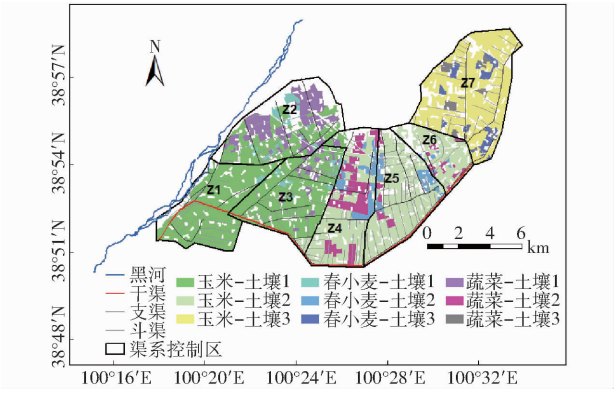

图 2　盈科灌区渠系及作物-土壤单元分布图

Fig. 2　Distribution of canal system and crop－soil unit in Yingke Irrigation District

2.2　模型参数设置

在运行模型前，需对第 1 层中农业水文模型参数进行率定和验证，以保证模型在研究区的适用性。以往研究[24]已成功将农业水文模型（SWAP－EPIC）应用于盈科灌区及黑河流域，并根据田间观测数据对模型主要参数进行了率定和验证。因此，直接采用文献[24]中已率定和验证参数，详细的率定、验证过程和结果见文献[24]。通过适当率定和验证，SWAP－EPIC 模型即可用于优化农业水文过程的模拟。

依据盈科灌区渠系分布，共定义 7 个渠系控制区：Z1～Z7（图 2）。根据以往研究[24]，灌区内土壤可分为 3 种类型，即粉壤土（深度 0～140 cm）、壤土（深度 0～140 cm）和粉壤土（深度 0～60 cm）＋壤土（深度 60～140 cm），分别定义为土壤类型 1～3。作物主要考虑玉米、春小麦和蔬菜（以包菜为代表）。根据土壤类型和作物空间分布，共定义 9 种作物-土壤单元，其空间分布如图 2 所示。各渠系控制区分别由 1 种或多种作物-土壤单元组成，其面积占比如表 1 所示。9 种作物-土壤单元分别对应 9 种水分生产函数，即上述模型中的田间尺度灌溉量-产量关系，该关系最优表达式由第 1 层模拟-优化模型求解得到。考虑气候变化的影响，采用 20 a 的历史气象数据作为第 1 层模拟-优化模型输入，以此得到不同气候条件下田间尺度灌溉量-产量最优关系。参考文献[16,27]，基于产量定义 3 种气候条件，以更好地反映气候条件对作物生产的影响。具体做法为：基于 20 a 的灌溉量-产量最优关系，选择各灌溉量所对应产量序列的四分位数（25% 和 75%）和中位数（50%）分别组成 3 条曲线，代表不同产量水平，在 20 个最优关系中选取最接近此 3 条曲线的实际最优关系，并将其所对应的年份分别定义为有利年、平均年和不利年 3 个代表年型。在 20 a 的优化结果中，选取 3 个代表年的优化结果进行分析，以反映气候条件变化对优化结果的影响。

20 a 气象数据采用 2003—2022 年数据，收集自盈科灌区内张掖气象站（37°56′N，100°26′E，海拔 1 482 m），包括最大最小气温、降雨量、平均风速、太阳辐射和相对湿度。2003—2022 年参考作物蒸散发量（ET_0）和降雨量如图 3 所示。优化模型中所需的作物价格通过查阅当地作物市场价格得到，玉米、春小麦和蔬菜价格分别为 2.82、2.60、4.00 元/kg，其他参数取值参考文献[16]。为准确反映气候条件变化对结果的影响，优化模型中所需参数均未考虑其不确定性。灌区总灌溉量考虑高、中、低 3 个供水水平（分别表示为 L1、L2 和 L3），参考盈科灌区历

表 1 研究区作物-土壤单元面积占比

Tab. 1 Proportion of crop - soil unit area in study area

渠系控制区	总灌溉面积/hm²	作物-土壤单元面积占比/%								
		玉米-土壤 1	玉米-土壤 2	玉米-土壤 3	春小麦-土壤 1	春小麦-土壤 2	春小麦-土壤 3	蔬菜-土壤 1	蔬菜-土壤 2	蔬菜-土壤 3
Z1	1 786.81	99.0	0	0	0	0	0	1.0	0	0
Z2	2 019.85	53.5	0	0	37.9	0	0	8.6	0	0
Z3	2 104.84	87.7	0	0	8.0	0	0	4.3	0	0
Z4	2 268.55	0	56.8	0	0	31.4	0	0	11.8	0
Z5	2 073.05	0	80.9	0	0	8.1	0	0	11.0	0
Z6	862.20	0	84.2	0	0	11.2	0	0	4.6	0
Z7	2 308.79	0	0	83.2	0	0	7.4	0	0	9.4

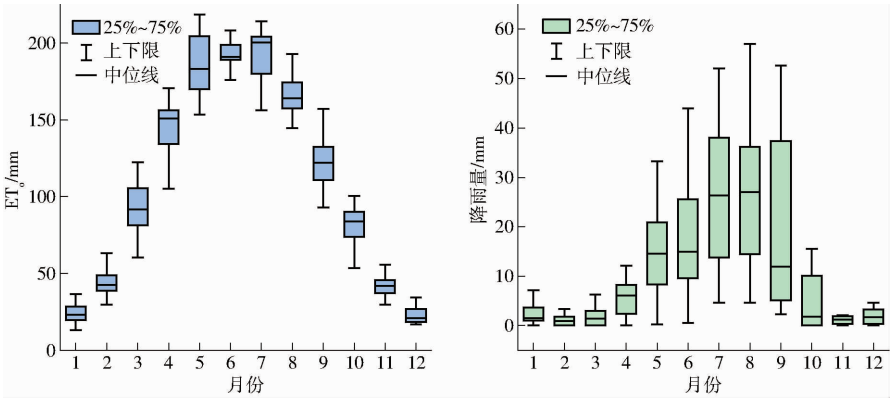

图 3 盈科灌区近 20 a(2003—2022 年)月平均参考作物蒸散发量(ET_o)和降雨量分布

Fig. 3 Distribution of monthly average reference crop evapotranspiration (ET_o) and rainfall in Yingke Irrigation District over past 20 years (2003—2022)

史灌溉数据,分别设置为 8.02×10^3、7.29×10^3、6.56×10^3 m^3。

3 结果与分析

3.1 不同尺度灌溉量-产量/效益最优关系

图 4 为基于模拟-优化得到的 20 a 不同气候条件下 9 种作物-土壤单元的灌溉量-产量最优关系(帕累托最优解集),其中 3 个代表年型(有利年、平均年和不利年)分别为 2015、2011、2020 年。由图 4 可知,在较低灌溉水平下,作物产量随着灌溉量增加而增加,但在较高灌溉水平下,作物产量相对稳定,各单元内的灌溉量-产量最优关系近似为二次函数。在空间上,虽然所有作物-土壤单元灌溉量与产量的关系变化相似,但同一作物在不同土壤类型中的产量有所不同,总体上呈现在低灌溉水平(灌溉量不满足作物生长)下,土壤类型 2 对应作物产量比其他 2 个土壤类型作物产量高,表明土壤差异性对作物生长具有一定的影响。同时,气候条件的影响非常显著,对于同一作物-土壤单元,不同年份下其灌溉量-产量最优关系存在显著差异。例如,对于玉米-土壤 1 单元,当灌溉量为 600 mm 时,玉米最高产量可达 12 000 kg/hm²,而最低产量仅为 8 759 kg/hm² 左右。当灌溉量为 350 mm 时,不同年份下春小麦-土壤 1 单元产量为 6 494 ~ 4 374 kg/hm²,蔬菜-土壤 1 单元产量为 6 411 ~ 4 130 kg/hm²。另外,蔬菜和春小麦产量随气候变化的波动相较于玉米更大,其中蔬菜产量波动最大,说明蔬菜和春小麦相较于玉米对气候变化更敏感。

图 5 为 20 a 不同气候条件下每个渠系控制区的灌溉量-效益最优关系,图中每个点对应一组渠系控制区不同作物-土壤单元间灌溉量分配的最优解,用总灌溉量和总效益两个目标值表示。如图 5 所示,各渠系控制区灌溉效益随灌溉量的变化也近似于二次函数,但由于各渠系控制区的种植结构不同,呈现明显的空间差异。例如,Z1 区灌溉效益随气候条件变化的波动相较于其他区域最小,同时在较高灌溉配水量下的灌溉效益最大,这是因为该区域玉米种植面积占 99%,而玉米产量对气候变化的敏感性低于春小麦和蔬菜。在较低灌溉配水量下,Z2、Z4 和 Z5 区灌溉效益高于其他区域,这是因为这 3 个区域内春小麦和蔬菜种植面积占比均高于其他区域,而春小麦和蔬菜相较于玉米的需水量较小,在较低灌溉配水量下的产量及收益优于玉米。同时,与其他渠系控制区相比,Z2 和 Z4 区灌溉效益随灌溉

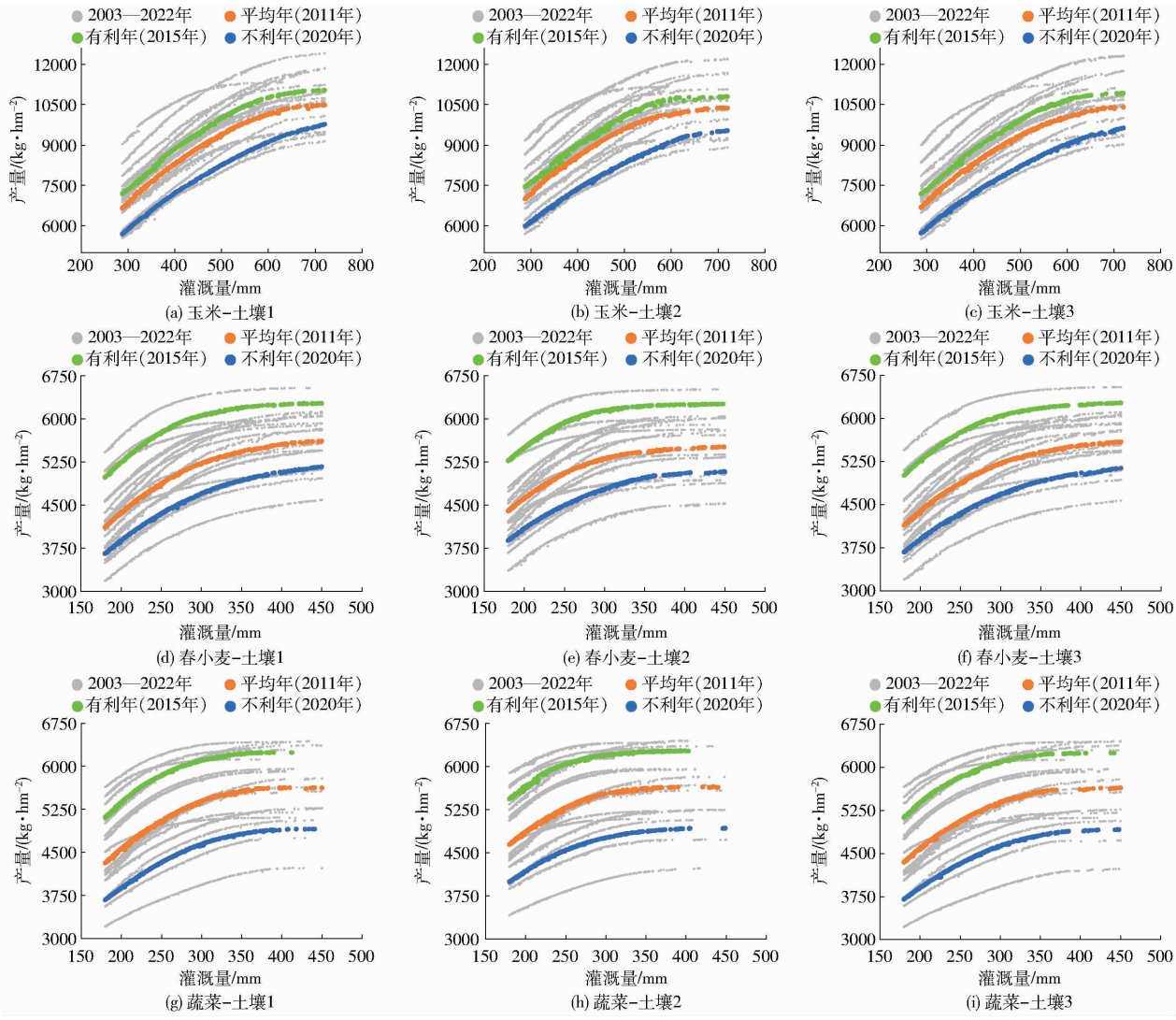

图 4　不同气候条件下不同作物-土壤单元灌溉量-产量最优关系

Fig. 4　Optimal solution set of irrigation and yield in different crop－soil units under different climatic conditions

量的增加相对缓慢，这是因为这 2 个区域内春小麦种植面积更大，而春小麦较低的价格限制了这些区域总效益的增加。

通过在第 3 层搜索每个渠系控制区最优解的最优组合，得到整个灌区灌溉量-总效益最优关系（图 6）。整个灌区总效益随总灌溉量的变化趋势与上述田间与渠系尺度的灌溉量-产量/效益最优关系类似，近似于二次函数关系。随着总灌溉量在 3.5×10^7 ~ 8.8×10^7 m^3之间变化，有利年、平均年和不利年灌溉总效益分别为 2.69×10^8 ~ 3.86×10^8元、2.46×10^8 ~ 3.65×10^8元、2.02×10^8 ~ 3.27×10^8元。相同灌溉量下，气候条件变化导致灌区灌溉总效益波动显著，以 3 个代表年型为例，有利年与平均年总效益差为 2.0×10^7 ~ 2.6×10^7元，平均年与不利年总效益差为 3.5×10^7 ~ 4.2×10^7元。

3.2　气候变化影响下的灌溉配水

利用所构建优化模型求解得到不同气候条件不同总灌溉量下的灌区各尺度灌溉配水优化方案。以 3 个代表年型为例，根据给定的 3 个水平的灌区总灌溉量，基于灌区尺度、渠系尺度优化结果，反向搜索确定了不同渠系控制区之间的灌溉配水最优方案（表 2、3）和各渠系控制区内不同作物-土壤单元间灌溉量最优分配及其空间分布（图 7 ~ 9）。

可以观察到，同一气候条件与供水水平下，灌区内各渠系控制区间的灌溉配水量存在明显差异，这主要与各渠系控制区内的种植结构相关。通常，玉米种植面积占比较大的区域其灌溉配水量也较大，如 Z1 和 Z3 区灌溉配水量在不同气候条件下均高于其他区（表 2）。春小麦和蔬菜种植面积占比较大的区域其灌溉量相对较小，如 Z2、Z4 区（表 2）。同时，各渠系控制区灌溉配水量因气候条件不同而不同。以中等供水水平（L2）为例，有利年、平均年、不利年各渠系控制区灌溉量分别为 464 ~ 654 mm、430 ~ 623 mm、432 ~ 664 mm，灌溉配水空间差异逐渐增大。相应地，各渠系控制区最优灌溉效益也呈明显规律，在相同供水水平下，最优灌溉效益随气候条件

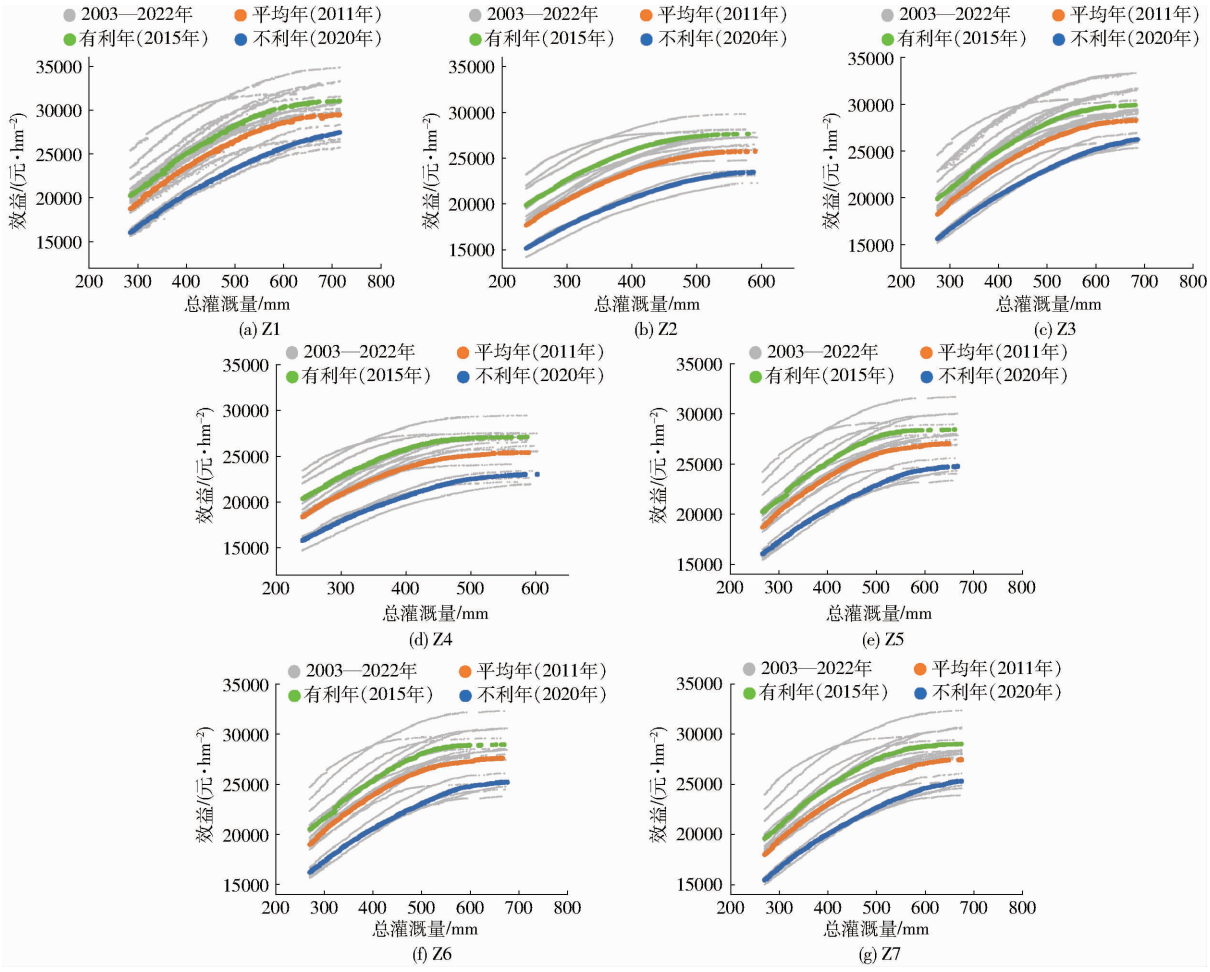

图 5 不同气候条件下不同渠系控制区灌溉量-效益最优关系

Fig. 5 Optimal solution set of irrigation and benefit in different canal systems under different climate conditions

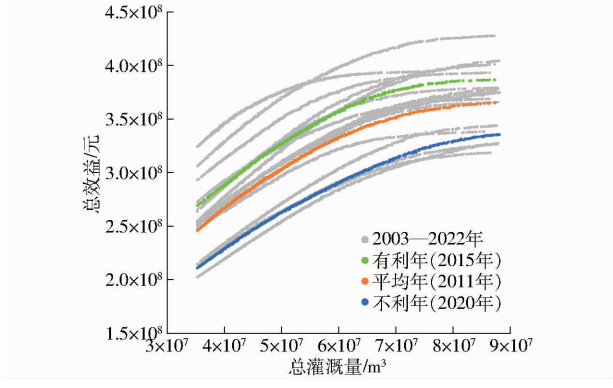

图 6 不同气候条件下整个灌区灌溉量-总效益最优关系

Fig. 6 Optimal solution set of irrigation and total benefit of the whole irrigation district under different climatic conditions

从有利到不利而逐渐减小,同一气候条件下,最优灌溉效益则随灌溉量增加而增加(表 3)。

3 个供水水平下灌区内不同作物-土壤单元最优灌溉量在有利年、平均年、不利年空间分布如图 7 ~9 所示。受气候条件、作物价格、种植结构、土壤条件等因素的影响,高、中、低 3 个供水水平下田间尺度最优灌溉量空间变化量分别为 181 ~720 mm、201 ~720 mm、186 ~639 mm,较大灌溉量主要集中在以玉米为主的区域(如 Z1、Z3 等)(图 7 ~9)。相同气候条件不同供水水平下,田间最优灌溉量空间分布随着灌区总灌溉量的不同而不同。以平均年为例(图 7b、8b、9b),3 个供水水平下,玉米平均灌溉量分别为 669、615、559 mm,空间变化量分别为 587 ~720 mm、560 ~677 mm 和 521 ~628 mm,相应变异系数(C_v,为样本标准差与平均值之比)分别为 0.061、0.065 和 0.075(表 4),表明其灌溉量空间差异随着灌区总灌溉量减小而增大。相反,春小麦和蔬菜灌溉量空间差异则随着灌区总灌溉量减小而减小,3 个供水水平下春小麦和蔬菜灌溉量空间变化量分别为 181 ~450 mm(C_v = 0.256)、219 ~450 mm(C_v = 0.275)、206 ~334 mm(C_v = 0.179)和 277 ~441 mm(C_v = 0.157)、275 ~339 mm(C_v = 0.130)、233 ~308 mm(C_v = 0.101)。这主要是因为,在平均年,随着灌区总灌溉量减少,灌溉水量会优先分配给效益更高的蔬菜,因此其空间差异减小,而效益较低的春小麦通常会分配最小灌溉量,因此其空间差异也较小。

表 2　不同气候条件不同供水水平下各渠系控制区最优灌溉配水量

Tab. 2　Optimal irrigation water allocation of each canal system under different irrigation water supply levels and different climate conditions　　mm

渠系控制区	L1			L2			L3		
	有利年	正常年	不利年	有利年	正常年	不利年	有利年	正常年	不利年
Z1	657	677	699	629	623	664	595	570	513
Z2	514	591	551	474	500	432	415	422	486
Z3	665	644	614	551	575	625	523	563	583
Z4	542	472	514	464	430	442	408	418	432
Z5	549	590	647	542	606	503	493	463	509
Z6	597	622	548	654	557	624	540	576	520
Z7	661	623	601	566	543	576	493	483	416

表 3　不同气候条件不同供水水平下各渠系控制区最优灌溉效益

Tab. 3　Optimal irrigation benefit of each canal system under different irrigation water supply levels and different climate conditions

渠系控制区	L1 灌溉效益/(元·hm^{-2})			L2 灌溉效益/(元·hm^{-2})			L3 灌溉效益/(元·hm^{-2})		
	有利年	正常年	不利年	有利年	正常年	不利年	有利年	正常年	不利年
Z1	3.07×10^4	2.92×10^4	2.71×10^4	3.05×10^4	2.89×10^4	2.67×10^4	3.01×10^4	2.80×10^4	2.35×10^4
Z2	2.73×10^4	2.56×10^4	2.31×10^4	2.70×10^4	2.52×10^4	2.12×10^4	2.60×10^4	2.39×10^4	2.23×10^4
Z3	2.99×10^4	2.82×10^4	2.54×10^4	2.91×10^4	2.76×10^4	2.56×10^4	2.86×10^4	2.74×10^4	2.49×10^4
Z4	2.70×10^4	2.49×10^4	2.26×10^4	2.67×10^4	2.43×10^4	2.16×10^4	2.59×10^4	2.41×10^4	2.13×10^4
Z5	2.82×10^4	2.67×10^4	2.47×10^4	2.82×10^4	2.69×10^4	2.29×10^4	2.76×10^4	2.53×10^4	2.31×10^4
Z6	2.91×10^4	2.77×10^4	2.43×10^4	2.92×10^4	2.73×10^4	2.52×10^4	2.88×10^4	2.74×10^4	2.37×10^4
Z7	2.90×10^4	2.73×10^4	2.46×10^4	2.85×10^4	2.63×10^4	2.42×10^4	2.76×10^4	2.53×10^4	2.05×10^4
灌区总效益/元	3.85×10^8	3.62×10^8	3.29×10^8	3.80×10^8	3.56×10^8	3.19×10^8	3.71×10^8	3.45×10^8	3.04×10^8

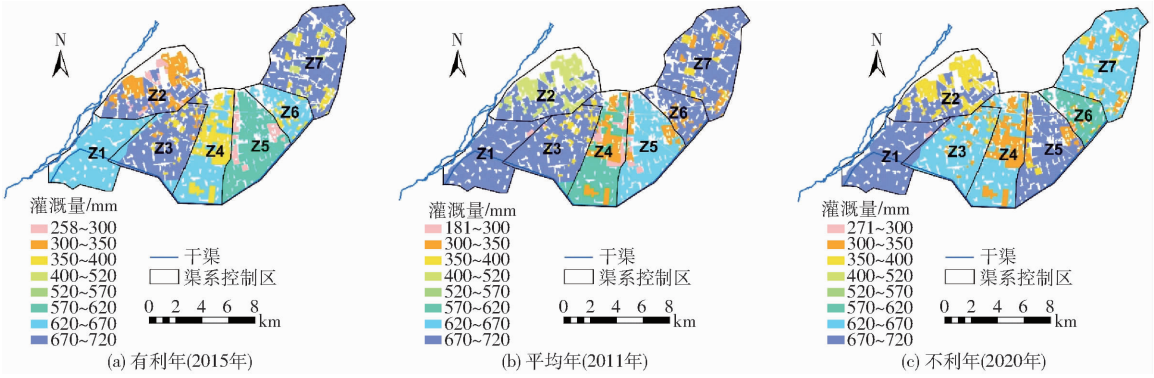

图 7　高供水水平下田间优化灌溉量空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of optimal irrigation amount in field at high level of irrigation water supply

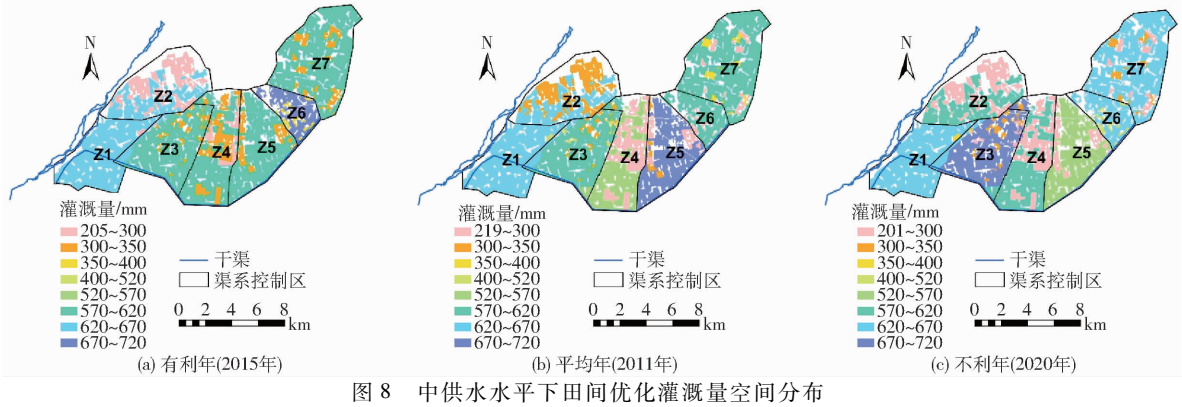

图 8　中供水水平下田间优化灌溉量空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of optimal irrigation amount in field at middle level of irrigation water supply

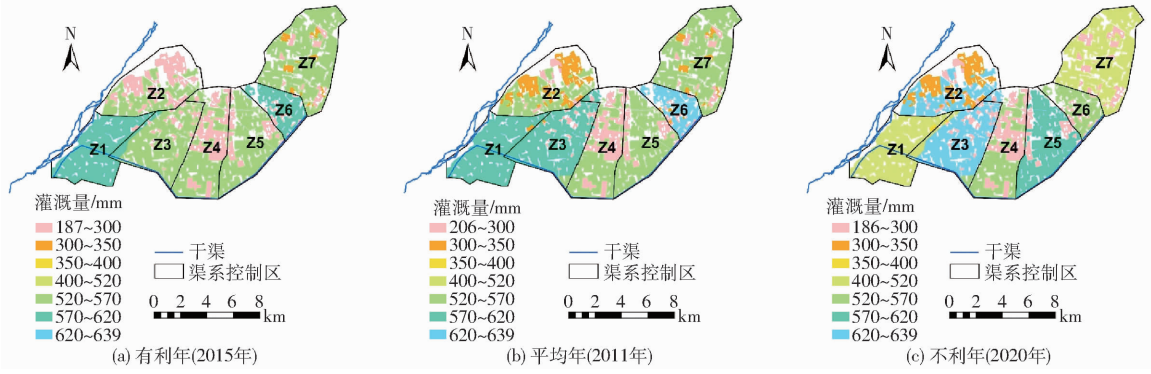

图 9 低供水水平下田间优化灌溉量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of optimal irrigation amount in field at low level of irrigation water supply

表 4 不同供水水平不同气候条件下各作物最优灌溉量

Tab. 4 Optimal irrigation amount of each crop under different irrigation water supply levels and climate conditions

作物	年型	L1				L2				L3			
		最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	C_v	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	C_v	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	C_v
玉米	有利年	716	618	669	0.053	704	584	621	0.067	599	540	562	0.044
	平均年	720	587	669	0.061	677	560	615	0.065	628	521	559	0.075
	不利年	719	593	671	0.067	671	569	626	0.069	639	456	564	0.112
春小麦	有利年	438	258	351	0.194	427	205	310	0.211	293	187	218	0.172
	平均年	450	181	317	0.256	450	219	325	0.275	334	206	264	0.179
	不利年	361	271	321	0.111	450	201	283	0.347	369	186	259	0.235
蔬菜	有利年	407	259	351	0.143	371	297	316	0.086	302	234	274	0.109
	平均年	441	277	356	0.157	399	275	331	0.130	308	233	283	0.101
	不利年	367	315	341	0.064	405	237	301	0.203	315	219	263	0.131

在相同供水水平不同气候条件下,田间最优灌溉量空间分布也存在明显差异,气候条件变化对灌溉配水优化结果影响明显。在灌溉总供水量有限的条件下(供水水平 L2 和 L3),各作物灌溉量空间差异通常随着气候由有利年向不利年变化而增大(图 8、9)。例如,在低供水水平下(L3),玉米灌溉量在 3 个代表年分别为 540 ~ 599 mm、521 ~ 628 mm 和 456 ~ 639 mm,其 C_v 分别为 0.044、0.075 和 0.112(表 4)。这主要是因为在灌溉供水量有限的条件下,作物在有利年的单方水产量相对较高,相对于其他年份,较小灌溉量即可达到较优产量和效益,因此各作物灌溉量趋近于其最优灌溉量,空间差异不大。然而,随着气候条件由有利变为不利,作物单方水产量显著减小,尤其是蔬菜受气候条件变化的影响明显,灌溉量会优先分配给效益更高的玉米,其次是蔬菜和小麦,因此各作物灌溉量差异增大,且蔬菜和春小麦灌溉量空间差异大于玉米(表 4)。在灌溉总供水量较为充足的条件下(如供水水平 L1),各作物灌溉量空间差异通常在不利年更小(图 7)。例如,在高供水水平下(L1),蔬菜灌溉量在 3 个代表年分别为 259 ~ 407 mm、277 ~ 441 mm、315 ~ 367 mm,其 C_v 分别为 0.143、0.157 和 0.064(表 4)。这可能是因为作物在不利年产量较低,在灌溉量充足的条件下,灌溉配水往往会趋近于较大值,因此不利年作物灌溉量差异相对更小。

3.3 讨论

案例分析表明,所构建的基于过程的灌区灌溉用水优化模型能更好地描述灌溉系统内农田水转化过程及其空间差异,且可采用不同气象数据作为模型驱动数据,直观地反映气候变化对优化结果的综合影响,相较传统模型更具有优势。同时,该模型采用多层优化框架,仅在第 1 层调用模拟模型,整体计算运行时间相对较短,总体上是一个高效可行的灌区灌溉水资源优化模型,在灌区有着较强的适用性。

然而,所采用模拟模型仍为田间尺度水文模型,虽然通过区域多层优化框架将尺度拓展至灌区,但仍无法充分描述灌溉系统各过程的动态响应及其空间差异,如渠系配水过程。同时,案例研究表明,灌溉量-产量/效益最优关系是本文优化的关键,该关系来自于模拟模型的模拟结果,因此模拟模型本身的局限性和不确定性也会对优化结果产生影响,以上这些都有待在未来进一步深入研究。

4　结论

(1)各尺度灌溉量-产量/效益最优关系呈明显的时空差异。田间尺度灌溉量-产量最优关系的空间差异与其作物类型和土壤差异性有关。渠系尺度灌溉量-效益最优关系的空间差异主要与其作物种植结构有关。同时,气候条件的影响非常显著。对于同一种作物-土壤单元或渠系控制区,不同气候条件下其灌溉-产量/效益的最优关系存在显著差异,同一灌溉量下的产量和效益表现为随着气候由不利年到有利年变化而增大。

(2)各渠系控制区灌溉配水量因气候条件和供水水平的不同而不同,相同供水水平下,各渠系控制区间灌溉配水量的差异随气候条件从有利变为不利而增大。对于田间灌溉量,相同气候条件和不同供水水平下,玉米灌溉量空间差异随灌区总灌溉量减小而增大,春小麦和蔬菜灌溉量空间差异随灌区总灌溉量减小而减小。在中、低供水水平下,田间灌溉量空间分布差异通常随气候由有利年向不利年变化而增大。在高灌溉水平下,各作物灌溉量空间差异通常表现为不利年更小。

(3)所构建模型是一种有效可行的区域尺度灌溉用水优化方法,与以往优化模型相比,该模型在模型框架、计算方法、结果和应用等方面都具有明显特点,使该模型具有很强的灵活性,可直接得到可用灌溉量下的各尺度最优分配方案,便于在其他灌区推广应用。

参　考　文　献

[1] LI M, FU Q, SINGH V P, et al. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture[J]. Advances in Water Resources, 2019, 127: 209 – 224.

[2] 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(2): 287 – 295.
QI Xuebi, HUANG Zhongdong, QIAO Dongmei, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2):287 – 295. (in Chinese)

[3] 陈红光,王琼雅,李晓宁,等. 基于区间两阶段鲁棒优化模型的灌区水资源优化配置[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 271 – 280.
CHEN Hongguang, WANG Qiongya, LI Xiaoning, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage robust stochastic programming model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 271 – 280. (in Chinese)

[4] ALVAREZ J F O, VALERO J A D, MARTIN-BENITO J M T, et al. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management[J]. Irrigation Science, 2004, 23(2): 61 – 75.

[5] SINGH A. An overview of the optimization modelling applications[J]. Journal of Hydrology, 2012, 466: 167 – 182.

[6] SINGH A, PANDA S N. Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return [J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 267 – 275.

[7] 姜瑶,颜泽文,黎良辉,等.灌区用水优化模型参数全局敏感性分析与不确定性优化[J].农业机械学报, 2023, 54(7): 372 – 380.
JIANG Yao, YAN Zewen, LI Lianghui, et al. Global sensitivity analysis of parameters for irrigation water optimization model and uncertainty optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 372 – 380. (in Chinese)

[8] LI M, SUN H, LIU D, et al. Multi-scale modeling for irrigation water and cropland resources allocation considering uncertainties in water supply and demand[J]. Agricultural Water Management, 2021, 246: 106687.

[9] GUO P, WANG X, ZHU H, et al. Inexact fuzzy chance-constrained nonlinear programming approach for crop water allocation under precipitation variation and sustainable development[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(9): 05014003.

[10] JENSEN M E. Water consumption by agricultural plants[M]. New York: Academic Press, 1968.

[11] DOORENBOS J, KASSAM A H. Yield response to water[M]// FAO irrigation and drainage paper No. 33. Roma: FAO, 1986.

[12] 赵金鹏,高占义,陈皓锐. 灌区多水源联合利用的模拟-优化耦合模型研究[J].灌溉排水学报, 2023, 42(11): 106 – 111.
ZHAO Jinpeng, GAO Zhanyi, CHEN Haorui. Simulation – optimization model for multi-water resource distribution in irrigation districts[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 106 – 111. (in Chinese)

[13] 吴彩丽,白美健,张宝忠,等. 基于水动力学模拟的灌区输配水系统优化调控模式研究[J].节水灌溉, 2023(4): 87 – 95.
WU Caili, BAI Meijian, ZHANG Baozhong, et al. Study on optimized regulation mode of irrigation district water distribution system based on water hydrodynamic process simulation[J]. Water Saving Irrigation, 2023(4): 87 – 95. (in Chinese)

[14] REJANI R, JHA M K, PANDA S N. Simulation-optimization modelling for sustainable groundwater management in a coastal basin of Orissa, India[J]. Water Resources Management, 2009, 23(2): 235 – 263.

[15] WANG Y, GUO P. Irrigation water resources optimization with consideration of the regional agro-hydrological process of crop growth and multiple uncertainties[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106630.

[16] JIANG Y, XU X, HUANG Q, et al. Optimizing regional irrigation water use by integrating a two-level optimization model and an agro-hydrological model[J]. Agricultural Water Management, 2016, 178: 76 – 88.
[17] LI J, JIAO X, JIANG H, et al. Optimization of irrigation scheduling for maize in an arid oasis based on simulation-optimization model[J]. Agronomy, 2020, 10(7): 935.
[18] LI X, ZHANG C, HUO Z. Optimizing irrigation and drainage by considering agricultural hydrological process in arid farmland with shallow groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124785.
[19] JIANG Y, XIONG L, XU Z, et al. A simulation-based optimization model for watershed multi-scale irrigation water use with considering impacts of climate changes[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126395.
[20] XU X, HUANG G, SUN C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2013, 125: 46 – 60.
[21] KROES J G, VAN DAM J C. Reference manual SWAP: version 3.0.3 (Alterra-Report 773)[M]// Green world research. Wageningen: Alterra, 2003: 211.
[22] WILLIAMS J R, JONES C A, KINIRY J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Trans. ASAE, 1989, 32: 497 – 511.
[23] 徐旭, 黄冠华, 黄权中. 农田水盐运移与作物生长模型耦合及验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 110 – 117.
XU Xu, HUANG Guanghua, HUANG Quanzhong. Coupled simulation of soil water flow, solute transport and crop growth processes at field scale and its validation[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(4):110 – 117. (in Chinese)
[24] JIANG Y, XU X, HUANG Q, et al. Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147: 67 – 81.
[25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA – Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 – 197.
[26] 姜瑶. 黑河中游绿洲多尺度农业水文过程及用水效率的模拟分析与优化调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
JIANG Yao. Simulation analysis and optimal regulation for agro-hydrological processes and water use efficiency on multiple scales of the middle Heihe River basin[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[27] GARCIA-VILA M, FERERES E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 36(1): 21 – 31.

(上接第 666 页)

[18] XU X, JIANG Y, CHEN W, et al. Damo-yolo: a report on real-time object detection design[J]. arXiv Preprint, arXiv:2211.15444, 2022.
[19] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904 – 1916.
[20] LI J, WEN Y, HE L. Scconv: spatial and channel reconstruction convolution for feature redundancy[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 6153 – 6162.
[21] LI C, ZHOU A, YAO A. Omni-dimensional dynamic convolution[J]. arXiv Preprint, arXiv:2209.07947, 2022.
[22] HAN K, WANG Y, GUO J, et al. ParameterNet: parameters are all you need for large-scale visual pretraining of mobile networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024: 15751 – 15761.
[23] ZHANG X, SONG Y, SONG T, et al. AKConv: convolutional kernel with arbitrary sampled shapes and arbitrary number of parameters[J]. arXiv Preprint, arXiv:2311.11587, 2023.
[24] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design[J]. arXiv Preprint, arXiv:2103.02907, 2021.
[25] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[J]. arXiv Preprint, arXiv:1807.06521, 2018.
[26] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R – CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(6): 1137 – 1149.
[27] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1512.02325, 2015.
[28] WANG C Y, YEH I H, MARK L H Y. Yolov9: learning what you want to learn using programmable gradient information[C]// European Conference on Computer Vision, 2024: 1 – 21.