

考虑土壤水平衡的灌区水资源优化配置研究

赵敏 郭萍* 张妍

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 针对内蒙古河套灌区解放闸灌域地下水埋深较浅且矿化度高及黄河水量逐年减少等因素导致的农业用水严重短缺问题,本研究以解放闸灌域玉米为研究对象,耦合 Jensen 模型与土壤水平衡模型构建灌区尺度灌溉水资源优化配置模型,对不同的地下水埋深及土壤含水量情景下水资源优化配置方案进行研究,并利用 Lingo 软件编程求解模型。结果表明:当地下水埋深为 2.5 m 时,引黄水量为 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,可以达到 5.55×10^8 元的净经济效益;而土壤含水量为 0.12~0.16 时,净经济效益为 $[5.41, 5.67] \times 10^8$ 元。优化结果验证了模型在当地可行,并针对河套灌区解放闸灌域的不同土壤含水量与地下水埋深情景分别提供 14 种配水方案。

关键词 水资源优化配置; 土壤水平衡; 解放闸灌域; Jensen 模型

中图分类号 S274.3

文章编号 1007-4333(2020)07-0091-12

文献标志码 A

Study on the water optimal allocation in irrigation district based on considering soil water balance

ZHAO Min, GUO Ping*, ZHANG Yan

(College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Due to the shallow groundwater depth, the high salinity of groundwater and the decreasing of water amount in the Yellow River year by year, there is a serious shortage of agricultural water in the Jiefangzha irrigation district, Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. Aiming at this problem, this study builds an irrigation water resources optimization model by integrating the Jensen model and soil-water balance model and maize in the Jiefangzha irrigation district is taken as study object. Agricultural water optimal allocation schemes are generated under different scenarios of groundwater depths and soil water contents. Lingo software programming is used to the developed model. The results show that: When the local water depth is 2.5 m, the amount of optimal irrigation water is $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$, which achieves a net economic benefit of 5.55×10^8 yuan. When the soil water content is within the range of 0.12–0.16, the net economic benefit is $[5.41, 5.67] \times 10^8$ yuan. The optimization results indicate that the model is feasible and can provide 14 water allocation schemes under different soil water content locally and groundwater depth scenarios in the Jiefangzha irrigation area of the Hetao Irrigation District.

Keywords water resources optimal allocation; soil water balance; Jiefangzha area; Jensen model

河套灌区是我国 3 个特大型灌区之一,平坦的地势以及便利的引黄灌溉条件使其成为重要的商品粮基地和产油基地。解放闸灌域($106^{\circ}43' \sim 107^{\circ}27' \text{ E}$, $40^{\circ}34' \sim 41^{\circ}14' \text{ N}$)是河套灌区第二大灌域,引黄灌区面积占总种植面积的 95%,农业用水几乎全部依赖于引黄灌溉,是典型的无灌溉则无农业的地区^[1]。

但长年的引黄漫灌不仅导致灌溉效率低下,而且引发地下水矿化度高、土壤盐渍化等问题。这些因素严重影响当地农作物正常生长,制约了农作物产量提高^[2]。近年来黄河受到气候变化与人类活动影响,径流量逐年减少,城镇化进程不断加快,建设用水量大幅度增加,农业灌溉用水供需矛盾不断加

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC1508705)

第一作者: 赵敏,硕士研究生, E-mail:18858498881@163.com

通讯作者: 郭萍,教授,主要从事水资源规划及风险分析研究, E-mail:guop@cau.edu.cn

剧^[3]。因此,迫切需要借助灌区水资源优化配置技术对有限农业水资源进行优化分配,提高水资源利用效率。

灌区水资源优化配置被证明是实现灌区高效用水的有效方法,即:在整个灌溉季节,将灌区可利用的、有限的水资源在时、空上进行合理的分配,获得全灌区最高的产量或收益^[4]。该技术在我国黑河、石羊河流域及东北地区已得到较好应用,为当地农业水资源配置规划提供了决策参考。早期优化配水模型一般基于相对简单的线性规划模型结构进行构建,以达到整个灌区净经济效益最大的优化目标^[5]。随着 Jensen 模型的引入,水资源优化配置模型在农业水资源管理应用方面进一步发展,可以通过优化方法得到不同作物的灌溉制度^[6]。已有研究在进行水资源优化配置研究时,越来越注重如多目标、区间、模糊等优化方法的拓展与选择,却一定程度上忽略了优化模型对于具体问题中一些特殊环境的适用性。对于河套灌区地下水埋深较浅,土壤水与地下水交换频繁的特殊水文环境,相关优化模型适用性还有待提高^[7]。已有研究也会忽略作物对不同时期土壤水分和农业水循环的响应以及灌溉系统的水文循环过程,不考虑地下水潜水蒸发对土壤含水量带来的影响^[8-9]。而将水资源优化配置模型与土壤水平衡模型相结合是解决以上问题行之有效的改进方法^[10]。2017年, Li 等^[10]综合考虑到内蒙古河套灌区地下水埋深较浅的情况,以玉米这种种植面积大的高耗水作物作为典型作物,将作物水模型和水循环模型与不确定性优化模型相结合进行优化配水,在实现较高的经济效益基础上获得了玉米的灌溉制度。但是,上述研究尺度为田间尺度,而在实际灌溉水资源管理中对于水资源的调配是在整个灌区或区域进行的;相关试验研究表明,初始地下水埋深及土壤含水量对土壤水与地下水转化有较明显的影响,间接影响了灌溉水量的配置^[11]。因此,在考虑初始地下水埋深及土壤含水量条件下,从灌域尺度来研究解放闸灌域玉米灌溉制度优化方案对于实际水资源策略制定有一定指导意义。本研究为优化分配有限引黄灌溉水量以实现灌区最大的净经济效益,拟采用将水分生产函数模型、土壤水平衡模型与水资源优化配置模型相结合的研究方法,在灌域尺度上构建考虑土壤水平衡的水资源优化配置模型,对河套灌区解放闸灌域玉米灌溉水资源优化配置问题进行研究,以为灌区管理者提供多情景下合理的优

化配水方案,助力灌区可持续发展。

1 材料与方法

1.1 模型建立

1.1.1 模型基本框架

针对解放闸灌域农业用水供需失衡、地下水埋深浅等问题,本研究构建了基于土壤水平衡的水资源优化配置模型来分配引黄灌溉水量,模型基本框架图如图 1 所示。模型通过实际蒸散量这一参数建立 Jensen 水分生产函数模型,土壤水平衡模型及优化配水模型三者之间的相关关系。模型以天为基本时间步长,以月作为配水时间尺度,灌水量作为优化模型决策变量,作物产量作为输出变量,通过优化模型最大化经济效益,确定多情景下的优化配水方案。

1.1.2 Jensen 模型

非充分灌溉条件下,作物灌溉配水研究通常需要借助水分生产函数来反映作物各生育阶段水分亏缺对作物产量影响。本研究选用的是 Jensen 连乘动态模型^[12],其表达式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (1)$$

式中: i 为作物生育阶段编号; n 为作物生育阶段数; ET_{ai} 为第 i 个生育阶段作物实际蒸腾量, mm; ET_{mi} 为第 i 个生育阶段作物最大蒸腾量, mm; Y_a 为作物在实际蒸腾量下对应的实际产量, kg/hm²; Y_m 为作物在最大蒸腾量下对应的最高产量, kg/hm²; λ_i 为第 i 个生育阶段作物水分敏感指数。

采用 Jensen 模型是利用生育期 ET 计算作物产量,一般通过田间试验得到不同生育期的水分敏感指数。在本研究中,采用 1 个月作为模型的阶段。因此,生长阶段的水分敏感指数需要进行回归转化^[14]:

$$Z(t) = \sum_{i=0}^T \lambda(t) \quad (2)$$

式中: t 为播种后的天数,通过累积函数 $Z(t)$,从 t_{i-1} 到 t_i 时刻,水的敏感性指数可以用以下公式计算:

$$\lambda_i = Z(t_i) - Z(t_{i-1}) \quad (3)$$

Wang 等^[15]用 logistic 曲线描述了水分敏感指数随时间累积值的变化如下:

$$Z(t) = \frac{K}{1 + e^{b-mt}} \quad (4)$$

式中: K 、 b 、 m 为经验系数。

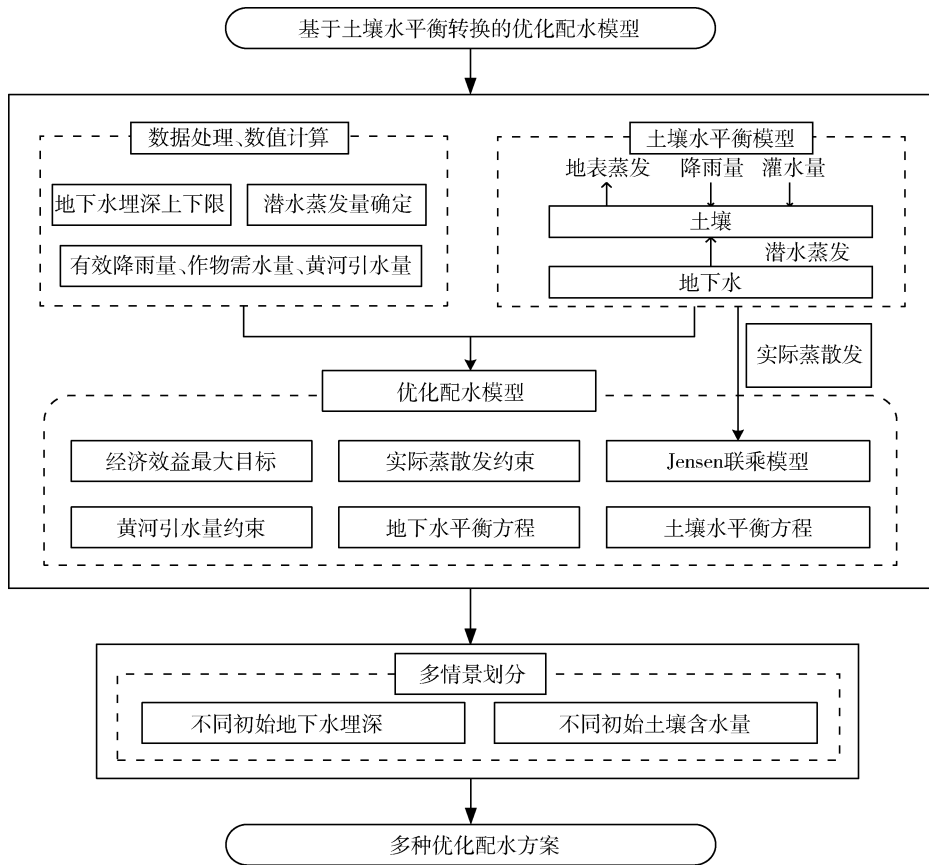


图 1 模型研究框架图

Fig. 1 The study framework of the model

1.1.3 土壤水平衡模型

由于解放闸灌域的地下水埋深浅，作物对不同时期土壤水分和农业水循环的响应不可忽略。通过查阅相关论文及数据资料，解放闸灌域主要土壤类型为砂壤土，土壤种类变化不大，因而本研究假设农业生产的下垫面是均质土壤并且土壤含水量一致。作物实际蒸散发(ET_{ai})处于不断变化之中，可通过土壤水平衡公式进行估算。土壤水分平衡考虑主要成分包括灌溉(IW)，降水(P)，地下水蒸发(ET_g)，实际蒸散发(ET)。如果研究区域降雨少，地形相对平坦，地表径流径流量小，地表径流常被忽略不计^[10]。土壤水平衡的时间步长为 1 d，作物土壤水分平衡方程可表示为：

$$\Delta W_i = n \times (\theta_{i+1} - \theta_i) \quad (5)$$

$$\Delta W_i = IW_i + P_i + ET_{gi} - ET_{ai} \quad (6)$$

$$\sum_i^I A \times 10^{-3} IW_i = \eta \times Q_t \quad (7)$$

式中：ΔW_i 为第 i 天土壤含水量变化值，mm；n 表示地下水埋深，1 m；θ_i，θ_{i+1} 分别表示第 i 天和第 i+1

天土壤含水量，本研究中的土壤水含量为 0.08~0.20^[10]；IW_i 表示第 i 天灌水量，mm；P_i 表示第 i 天的有效降雨量，mm；ET_{gi} 为潜水蒸发量，mm；ET_{ai} 为第 i 天实际蒸散发量，mm；Q_t 为第 t 月的灌水量，m³；η 为灌溉水利用系数；A 表示研究区域灌溉面积，hm²。

地下水蒸发是将浅层地下水转化为土壤水和大气水的重要途径，也是地下水的主要消耗。本研究用 Hu 等^[16]提出的计算地下水蒸发的经验公式，该模型在新疆得到了高精度模拟结果。

$$ET_{gi} = 2.9547 \times (h_i)^{-1.7629} \times (1 - e^{-(0.0877 \times h_i - 0.0112) \times E_i}) \quad (8)$$

式中：E_i 为蒸发皿蒸发量，mm；h 为地下水埋深，m。

作物生长过程中的潜水深度由每天的地下水平衡方程(9)计算。对于浅层地下水，地下水与土壤水的交换十分频繁。地下水消耗主要包括农田潜水蒸发和侧向排泄，本研究中忽略侧向排泄，在水量平衡的基础上，研究地下水动态变化关系。

$$1000\mu(h_i - h_{i+1}) = -ET_{gi} \quad (9)$$

式中: h_i, h_{i+1} 分别表示第 i 天和第 $i+1$ 天地下水埋深, m, 解放闸灌域的地下水埋深约为 1.0 ~ 3.8 m^[10]; ET_{gi} 为第 i 天的潜水蒸发量, mm; μ 为特定的饱和土壤含水量, 70 mm/m^[10]。

1.2 案例研究

1.2.1 水资源优化配置模型构建

本模型以净经济效益最大为目标, 以月灌溉水量为决策变量, 并在实际蒸散发和黄河可供水量的约束下, 结合 Jensen 模型和土壤水平衡模型建立优化配水模型, 利用 Lingo 软件进行求解, 输出各生育期灌溉水量、日实际蒸散发量、潜水蒸发量、土壤含水量、地下水埋深、系统净经济效益等值。

$$\max F = B \times Y_{\max} \prod_{t=1}^T \left(\frac{ET_t}{ET_{\max t}} \right)^{\lambda_t} \times A - TC \times A - S \times \sum_{t=1}^T Q_t \times A \quad (10)$$

优化配水模型应设置约束条件:

1) 实际作物蒸散发约束:

$$ET_t \leq ET_{\max t} \quad (11)$$

$$ET_t = \sum_{i=1}^I ET_{ai} \quad (12)$$

$$ET_{\max t} = \sum_{i=1}^I ET_{mi} \quad (13)$$

2) 土壤水平衡约束:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + IW_i + P_i + ET_{gi} - ET_i \quad (14)$$

3) 黄河可供水量约束:

黄河在作物生长期内的供水量作为一个刚性水量指标可以用于灌溉, 但不能超过最大供水量 Q_y 。研究区域以黄河为水源, 在作物生长阶段, 每年约 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

$$\sum_{t=1}^T Q_t \leq Q_y \quad (15)$$

4) 非负约束:

$$Q_t \geq 0, \forall t \quad (16)$$

式中: F 为种植净效益, 元; i 为不同天数; t 为不同月份; B 为玉米单价, 元/kg; 灌溉面积, hm^2 ; TC 为种植成本, 元/ hm^2 ; S 为用水成本, 元; A 为灌溉面积, hm^2 ; Q_t 为不同时段供水量, m^3 ; Y_{\max} 作物最大产量, kg/hm^2 ; ET_t 为第 t 月作物的实际蒸散发量, mm; $ET_{\max t}$ 为第 t 月最大蒸散发量, mm; ET_{ai} 为第 i 天实际蒸散发量, mm; ET_{mi} 为第 i 天最大蒸散发量, mm; θ_{i+1} 为第 $i+1$ 天土壤含水量; θ_i 为第 i 天土壤含水量; IW_i 为第 i 天灌水量, mm; P_i 为第 i 天有效降雨量, mm; ET_{gi} 为第 i 天潜水蒸发量, mm。

1.2.2 基础数据

解放闸灌域属于显著的大陆性气候, 降雨量小

而蒸发量大, 年平均降水量为 140 mm, 蒸发量约为 2 000 mm。据历年《引黄灌区成果报告》显示, 该灌域总灌溉面积为 14.209 万 hm^2 , 其中引黄面积约占总灌溉面积 90% 以上, 本研究采用平水年的年均引黄水量, 约 12 亿 m^3 。灌溉水的成本一般与种植时间有关, 4—9 月水价为 0.083 元/ m^3 ^[10]。灌溉作物包括主要作物(玉米、小麦、向日葵)和蔬菜、甜瓜等, 本研究选择种植面积最大的玉米(约占总种植面积的 35%)作为典型作物, 种植面积约 32 047 hm^2 , 每年玉米灌溉用水量约 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据《巴彦淖尔市统计年鉴 2017》^[13], 玉米价格为 2.4 元/kg, 用于作物种植花费的成本为每公顷 10 500 元。参考 Li 等^[10] 计算结果以及气象站获得的临河气象资料得出玉米不同月份 ET_{mi} 和 λ_i 如表 1 所示, 且玉米最高产量为 12 850 kg/hm^2 。

本研究的作物需水量采用作物系数法确定, 其中参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 。采用 Penman-Monteith 公式计算^[18], 解放闸灌域生育期内各月份 ET_0 值如表 2 所示。本研究选用 Chen 等^[19] 确定的蒸发皿系数 0.53, 作物蒸发蒸腾量及蒸发皿蒸散发量计算如下:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (17)$$

$$E = ET_0 / 0.53 \quad (18)$$

式中: ET_c 为作物蒸发蒸腾量估计值, mm; K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量, mm; E 为蒸发皿蒸发量, mm。

3 结果与分析

利用 Lingo 软件对上述综合优化模型进行求解, 并将日最大蒸散发量、日有效降雨量、可供水量及社会经济等数据输入基于土壤水平衡的水资源优化配置模型中, 输出决策变量(实际蒸散发量 ET_a 、灌水量 IW)以及通过模型公式计算得出的潜水蒸发量 ET_{gi} 、地下水埋深 H_i 和土壤含水量 θ_i 等参数, 观察其每日变化情况。内蒙古河套灌区解放闸灌域地下水埋深较浅, 潜水蒸发量较大, 地下水埋深(为 1~4 m)和土壤含水量(为 0.08~0.20)对灌水量和模型结果有较大的影响, 并且有关研究表明, 研究区域地下水埋深及土壤含水量存在时空变化特征^[21]。因此, 本研究将先以初始土壤水含量为固定值, 划分 7 种不同的地下水埋深情景, 并综合考虑灌区实际情况, 选定其中一种初始地下水埋深情况, 进一步进行 7 种不同初始土壤含水量情景划分。

表 1 解放闸灌域玉米各月份相关参数

Table 1 Related parameters of maize in Jiefangzha irrigation area

月份 Month	最大蒸散发/mm Maximum evapotranspiration	敏感指数 Sensitive index	作物系数 Crop coefficient
4 月 April	20.44	0.01	0.224
5 月 May	62.50	0.05	0.224
6 月 June	125.05	0.14	0.713
7 月 July	243.69	1.31	1.224
8 月 August	167.13	0.03	1.224
9 月 September	49.55	0.01	0.479

表 2 解放闸灌域各月份参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 值Table 2 Monthly reference crop evapotranspiration ET_0 Jiefangzha irrigation area

日期 Date	mm					
	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
1	3.45	4.18	5.46	5.05	4.97	3.45
2	3.51	4.12	5.35	5.47	5.13	3.88
3	3.38	4.23	5.09	4.87	4.98	3.64
4	3.05	4.63	4.96	5.52	5.18	3.37
5	2.68	4.78	5.19	5.17	5.21	3.81
6	3.16	4.79	5.47	5.60	4.77	3.61
7	3.21	4.61	5.06	5.47	5.18	3.58
8	3.56	4.57	4.62	5.10	4.93	3.33
9	3.63	4.48	5.40	4.89	5.23	3.43
10	3.63	4.38	5.37	4.90	4.51	3.34
11	3.40	4.89	5.75	5.63	4.71	3.40
12	3.55	5.33	6.07	4.97	4.46	3.28
13	3.30	5.20	5.37	5.39	4.45	3.38
14	4.02	4.92	5.56	5.28	4.55	3.16
15	3.93	5.13	5.58	5.30	4.74	3.41
16	4.13	4.78	5.38	5.63	3.84	3.23
17	3.89	5.10	5.37	5.62	4.07	2.90
18	3.98	5.02	5.76	5.49	4.31	2.80
19	3.80	5.31	5.43	5.50	4.12	3.15
20	4.08	4.84	4.98	4.32	4.40	3.30
21	3.71	4.76	5.24	4.69	3.84	3.19
22	3.87	4.98	5.63	4.95	4.14	2.83
23	4.28	4.83	5.34	4.67	4.17	2.94
24	4.50	4.91	4.73	5.18	4.19	2.93
25	4.14	5.33	5.60	4.72	4.32	2.81
26	4.18	5.53	5.76	4.72	4.28	2.60
27	4.05	5.29	5.38	5.24	3.67	2.96
28	4.63	5.90	4.39	5.39	4.53	2.88
29	4.75	5.65	4.85	5.44	4.18	2.56
30	4.63	5.52	5.61	5.68	4.00	2.15
31		5.72		5.40	3.93	
汇总 Total	115.06	153.70	159.75	304.28	139.00	95.32

3.1 不同初始地下水埋深对优化结果的影响

解放闸灌域地下水埋深处于1~4 m,因而将初始地下水埋深划分为7种不同情景(1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 m),探究不同生育期的潜水蒸发量、不同生育期总灌水量、系统净经济效益及地下水埋深变化值随初始地下水埋深变化情况。

图2为潜水蒸发量与地下水埋深变化量随初始地下水埋深变化规律。由图2可以看出,随着初始地下水埋深的增大,潜水蒸发量逐渐减少,在地下水

埋深为1 m时潜水蒸发量甚至达到了地下水埋深为4 m时3倍之多,可见初始地下水埋深对灌溉过程中的潜水蒸发具有显著影响。此外,随着初始地下水埋深增大,地下水埋深变化量也逐渐减小。当初始地下水埋深为2.5 m时,地下水埋深变化量曲线出现了拐点;当初始地下水埋深小于2.5 m时,地下水埋深变化量较大且斜率较大;地下水埋深大于2.5 m时地下水埋深变化量小且斜率降低。

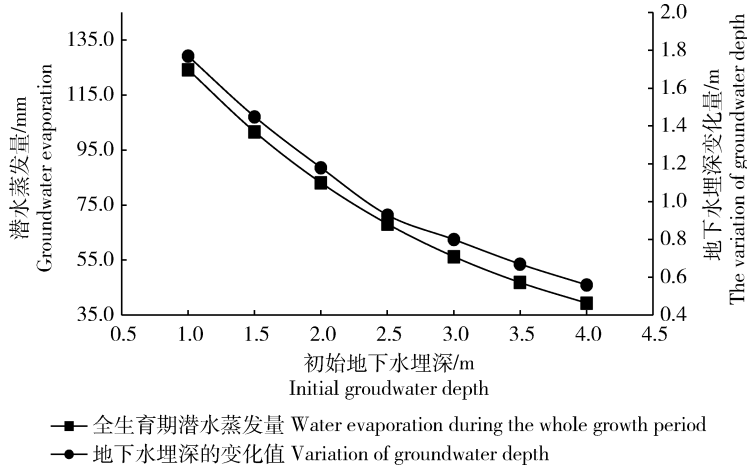


图2 潜水蒸发、地下水埋深增大值随初始地下水埋深变化规律

Fig. 2 The variation law of phreatic evaporation and groundwater depth with groundwater depth

为探究初始地下水埋深对灌溉水量的影响,对不同情景下春玉米各个生育阶段灌溉水量分别求解,其优化结果见图3。结果表明灌溉总水量均小于作物需水量。灌水量主要集中在6、7、8月份,并且除了地下水埋深为4 m时的情况,灌水量最大值均出现在7月份,最小值出现在9月份。灌水量最小时引黄水量为0 m³,作物生长所需水量全都由降雨提供。该优化结果与作物耗水量分布一致,符合实际情况。

当初始地下水埋深浅时,灌水量都小于需水量;而当初始地下水埋深大于2.5 m时,出现部分灌溉水大于需水量的情况。这是因为初始地下水埋深浅,部分地下水可通过潜水蒸发补给土壤水用于作物生长;而当初始地下水埋深大时,潜水蒸发量小,部分引黄水量下渗补给地下水。

作物全生育期灌水量随地下水埋深变化的关系如图4所示。研究发现初始地下水埋深对作物灌水量大小及各生育期分布均有一定影响,随着初始地下水埋深的增大,引黄灌溉水量也不断增大。与此同时,根据净经济效益可知,农业经济效益随地下水

埋深增大不断降低:当初始地下水埋深为4 m时,系统产生的净经济效益为 5.49×10^8 元;当初始地下水埋深为1 m时,系统产生的净经济效益为 5.67×10^8 元。不同情境系统产生的净经济效益在 $5.49 \times 10^8 \sim 5.67 \times 10^8$ 元。将优化结果与作物需水量结果进行比较,结果发现当地下水埋深为2.5 m时,当地可节约引黄水量约 5.34×10^7 m³,净经济效益达到 5.55×10^8 元。

3.2 不同初始土壤含水量对优化结果的影响

综合上述结果及实际情况,本研究选取地下水埋深为2.5 m的情景,进行不同初始土壤含水量情景划分。初始土壤含水量情景划分为0.080、0.100、0.120、0.140、0.160、0.180、0.193这7种,并探究其对净经济效益、灌水量、潜水蒸发量、实际蒸散发量,地下水埋深变化值等要素的影响。

在不同初始土壤含水量情景下(图5),分析灌水量在各生育期分配情况。优化结果表明土壤含水量不断变化时,各生育期灌水量也在不断变化之中。当土壤含水量较低时,应当在4、5月份灌溉一定水量以满足作物对土壤水分的需求;而随着土壤含水量

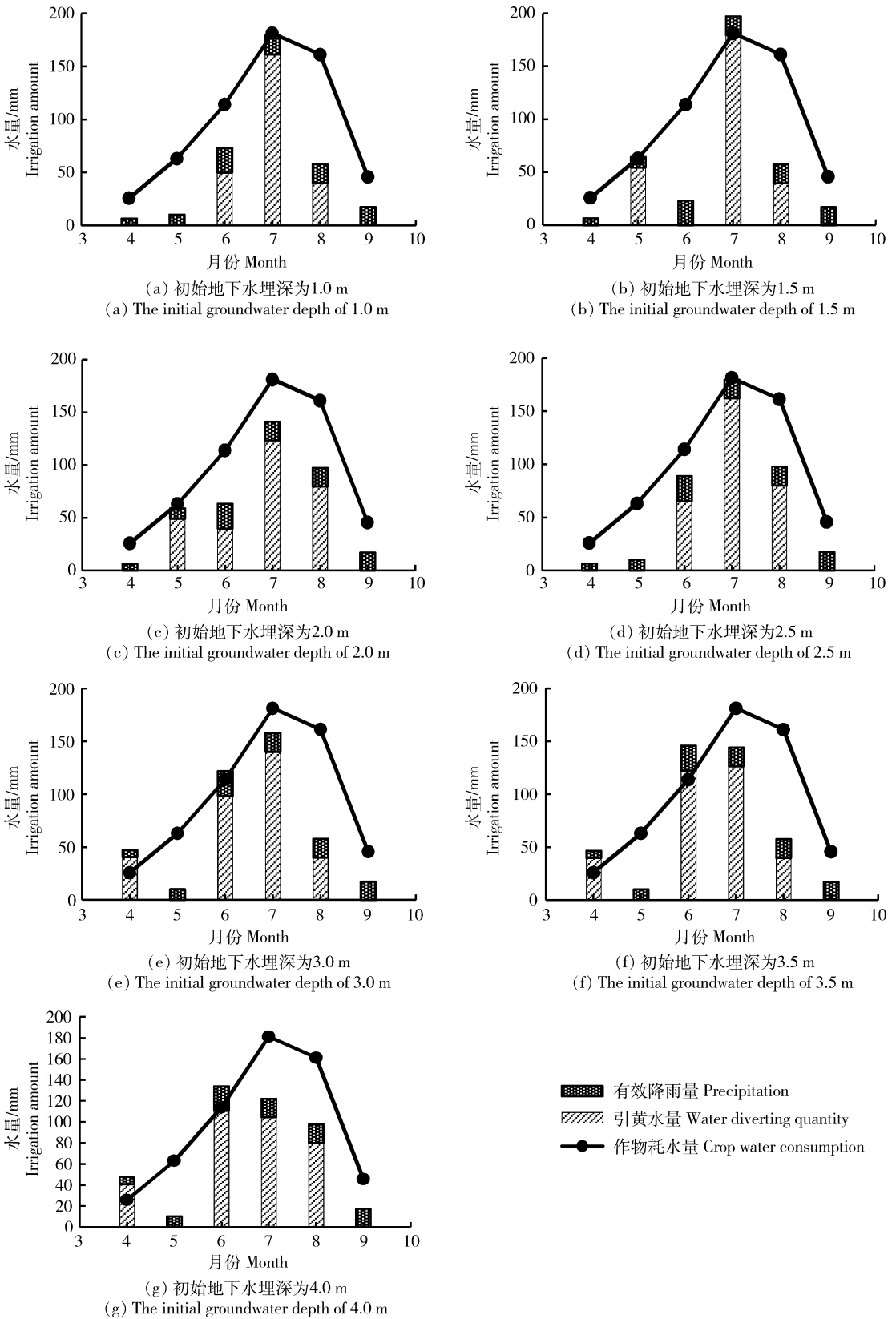


图 3 不同地下水埋深情景下灌水量在各生育阶段分配情况

Fig. 3 Irrigation water distribution of different growth stages under different groundwater depth scenarios

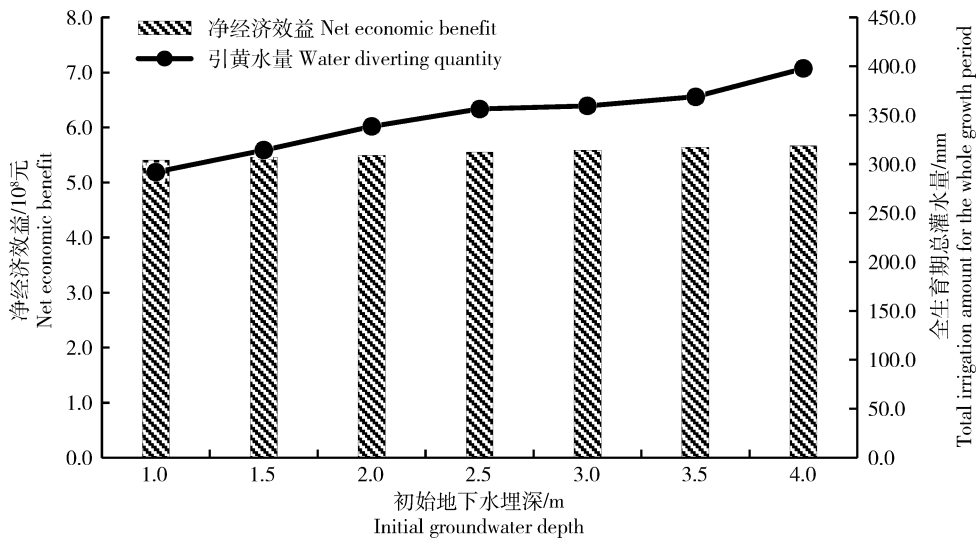


图4 系统净效益及全生育期灌水量随不同初始地下水埋深的变化情况

Fig. 4 The net economic benefit and total irrigation water amount with different initial groundwater depth

的增加,灌水量不断向7、8月份集中,在这两个生育阶段作物生长所消耗的水分较大。输出结果与实际情况相对应。

为了进一步了解作物全生育期灌水量及系统净经济效益受初始土壤含水量影响,建立作物全生育期灌水量及系统净效益与初始土壤含水量变化的关系(图6)。土壤含水量对作物灌水量大小及各生育期的分布均有一定的影响。随着初始土壤含水量增大,引黄灌溉水量也不断减小。此外,随着初始地下水埋深增大,农业经济效益呈现先增大后减小的趋势。当初始土壤含水量为0.080时,系统净经济效益为 5.41×10^8 元,当初始土壤含水量为0.193时,系统净经济效益为 5.67×10^8 元。多种情境下系统净经济效益约为 $[5.41, 5.67] \times 10^8$ 元。研究表明,当土壤含水量控制在0.12~0.16时,运用该配水方案可以提高水资源利用效率。

综合上述分析结果可知,初始地下水埋深及初始土壤含水量对引黄灌溉水量及系统净经济效益有较大的影响。研究表明^[22]地下水埋深2.5m可作为土壤轻度盐渍化的一个临界值,即当地下水埋深小于2.5m时,产生土壤盐渍化问题。地下水埋深变化量过大或者过小都不好,地下水埋深变化在一定范围内就可以保证作物正常生长并避免土壤盐渍化。张义强等^[23]、杨会峰等^[24]通过在解放闸灌域进行实验研究发现,在大部分地区,地下水埋深2.5m是轻度盐渍化的临界点,当地下水埋深小于2.5m

时,出现轻度盐渍化现象。而地下水埋深控制在2.0~2.8m较合适,可保证作物的正常生长并缓解土壤盐渍化的问题。本研究结果与上述研究一致,表明模型在当地具有一定的适用性。

4 讨论

针对河套地区地下水埋深浅、土壤盐碱化的问题,已有相关研究^[25]考虑了地下水位、土壤含水量,进而获得灌溉水量配置。本研究是对Li等^[10]所发展方法的改进,本研究选取初始地下水埋深为2.5m,初始土壤含水量为0.14情景下的作物需水量、引黄水量、净经济效益值与Li等^[10]的水量分配研究结果进行对比。2种方法所获得各月份作物需水量与引黄灌溉水量对比情况如表3所示。本研究得到的各月份作物需水量值和引黄灌溉水量均相对偏少,但是相差不大,表明将模型从田间尺度运用到灌区尺度有一定的可行性。有研究表明当灌水量超过作物需水量时,作物的产量不会增加反而降低。在Li等^[10]的研究中,5月份的灌水量值超过了作物需水量,造成了水资源的浪费,而本研究的所有情景都满足灌水量小于作物需水量这一条件的(表3),其优化后的配水结果约为 $4\,526 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,并产生 1.53×10^4 元/ hm^2 的经济效益;本研究优化后引黄水量约为 $4\,145 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,产生 1.64×10^4 元/ hm^2 的净经济效益。即在初始地下水埋深及土壤含水量较合适的情景下,每 hm^2 可节约灌溉用水 381 m^3 ,并

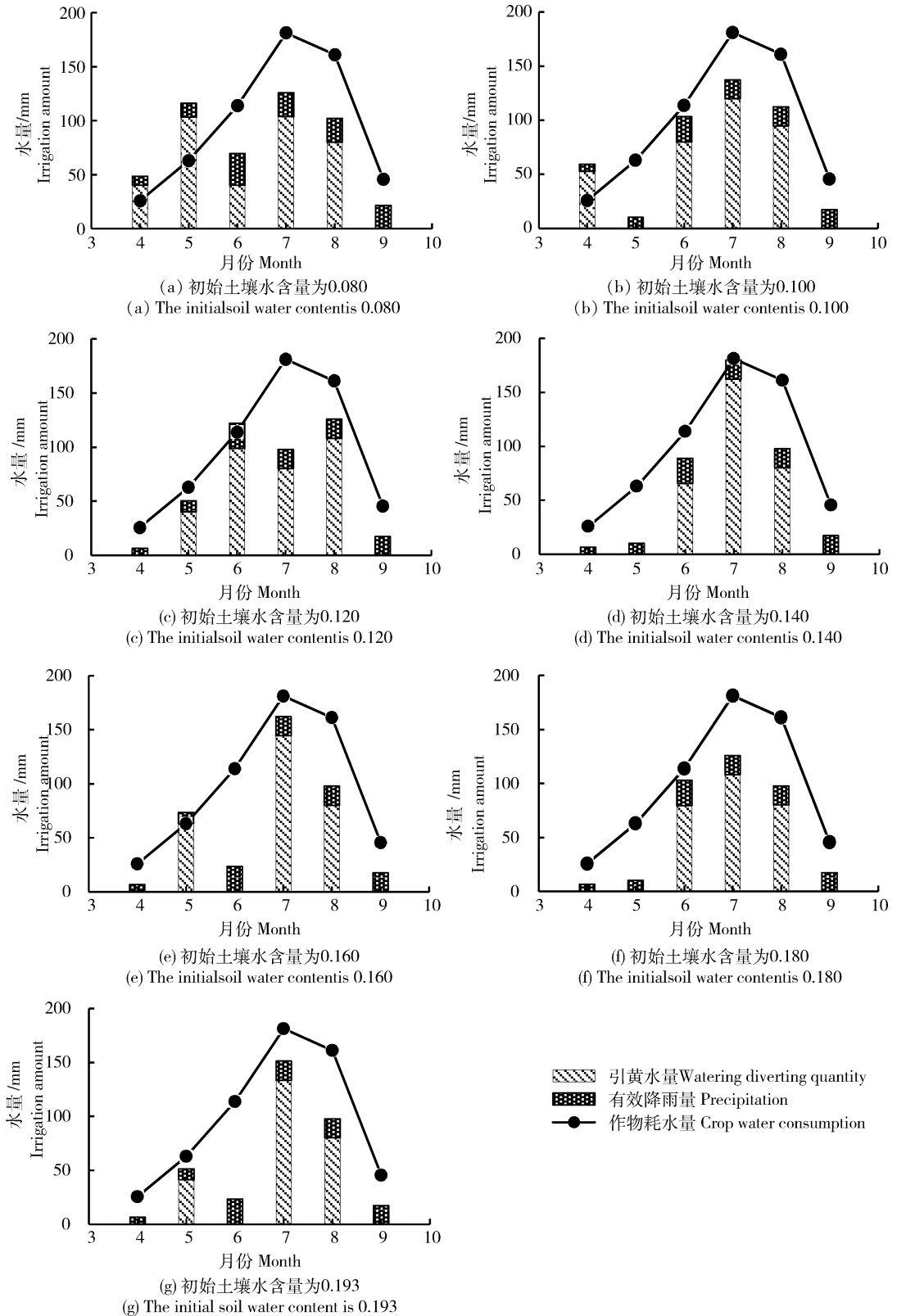


图 5 不同土壤含水量情景下灌水量在各生育阶段的分配

Fig. 5 Irrigation water distribution of different growth stages under different soil water content scenarios

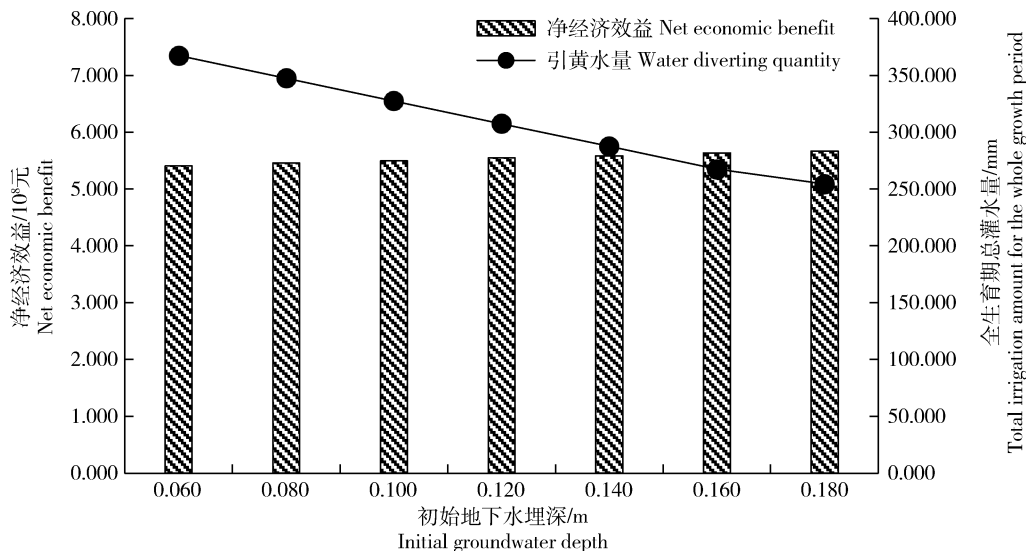


图6 全生育期引黄水量及系统净经济效益随不同初始土壤含水量的变化

Fig. 6 The net economic benefit and total water diverting quantity with different initial soil water content

表3 解放闸灌域玉米各月份作物需水量与灌溉水量对比值

Table 3 The comparison value of crop water demand and irrigation water demand in each month in the irrigation area of Jiefangzha area

月份 Month	作物需水量/mm Crop water requirement		灌溉水量/mm Irrigation water amount		灌域引水量/10 ⁸ m ³ Water diversion in irrigation area
	Li的研究 Li's research	本研究 This research	Li的研究 Li's research	本研究 This research	
	4月 April	21	25	0	
5月 May	65	63	80	0	2.27
6月 June	170	114	90	65	1.39
7月 July	230	181	140	162	1.88
8月 August	133	161	70	80	0.86
9月 September	43	45	0	0	0.72
合计 Total	662	589	380	307	7.50

增加1100元经济效益。因此,通过本研究的方法所获得得到的优化结果有更高的单方水效益,用水效率更高。

灌区内的灌溉水资源配置通常需要同时考虑多种作物,但由于资料所限,本研究只针对解放闸灌域的玉米进行研究,今后将尝试收集更多基础数据,以本研究所构建模型为框架,同时对更多作物进行优化配水研究。此外,本研究对于不确定性信息的考虑较少,未来研究中将尝试对配置系统中的不确定

性信息进行描述与表征,并引入不确定性方法进一步丰富模型,使研究结果更具实际意义。

5 结论

本研究构建了基于土壤水平衡的水资源优化配置模型并将其应用于河套灌区解放闸灌域,得到了14种情景下的优化配水方案。结果表明,初始地下水埋深越浅,所需引黄灌溉水量越少,系统净经济效益越大;初始土壤含水量越小,引黄灌溉水量越大,

得到的系统净经济效益越小。此外,当地下水埋深为 2.0~2.5 m,土壤含水量为 0.12~0.16 时得到的配水方案较优,达到 $[5.50, 5.59] \times 10^8$ 元净经济效益基础,节约引黄水量约 $5.34 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。本研究验证了模型在灌区尺度进行单一粮食作物水资源优化配置的可行性,将为类似地区解决有限水资源配置问题提供配置思路与模型基础。在实际的区域农业水资源配置中往往有多种作物,因此在未来的研究中将考虑基于本研究模型框架建立多作物优化配水模型来指导实际水资源配置。

参考文献 References

- [1] 陆圣女. 基于 GIS 解放闸灌域土壤墒情变化规律及预报模型研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2008
- Lu S N. Study on social moisture change rules and prediction models base on GIS in Jiefangzhan irrigation district[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [2] 高晓瑜. 地下水浅埋区农田水分生产力模型与模拟[D]. 北京:中国农业大学, 2017
- Gao X Y. Modeling agricultural water productively in shallow groundwater area[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [3] 任东阳. 灌区多尺度农业与生态水文过程模拟[D]. 北京:中国农业大学, 2018
- Ren D Y. Multi-scale modeling of the agro-eco-hydrological processes in irrigation district[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [4] 刘红亮. 灌区水资源优化配置与可持续发展评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2002
- Liu H L. Study on optimal water resources allocation and sustainable development evaluation of irrigation district[D]. Nanjing: Hehai University, 2008 (in Chinese)
- [5] 邱俊楠, 张鑫, 王宏伟, 孙天青. 基于水资源利用的红寺堡灌区作物种植优化[J]. 人民黄河, 2012, 34(3): 79-81
- Qiu J N, Zhang X, Wang H W, Sun T Q. Optimization of crop planting in Hongsibu irrigation area based on water resource utilization[J]. *Yellow River*, 2012, 34(3): 79-81 (in Chinese)
- [6] Guo P, Chen X H, Tong L, Li J B, Li M. An optimization model for a crop deficit irrigation system under uncertainty[J]. *Optical Engineering* 2014, 46(1): 1-14
- [7] 吕伟. 井渠结合灌区农业水资源优化调配耦合模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016
- Lv W. Coupling model of agricultural water resources allocation in well and canal irrigation areas[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016 (in Chinese)
- [8] Shi B, Lu H W, Ren L X, He L. A fuzzy inexact two-phase programming approach to solving optimal allocation problems in water resources management [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(23): 5502-5514
- [9] Li M, Guo P. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(19-20): 4897-4911
- [10] Li X M, Huo Z L, Xu B. Optimal allocation method of irrigation water from river and lake by considering the field water cycle process[J]. *Water*, 2017, 9(12): 911
- [11] 张志杰, 杨树青, 史海滨, 李瑞平, 韩文光, 张武军. 内蒙古河套灌区灌溉入渗对地下水的补给规律及补给系数[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 61-66
- Zhang Z J, Yang S Q, Shi H B, Li R P, Han W G, Zhang W J. Irrigation infiltration and recharge coefficient in Hetao irrigation district in Inner Mongolia [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 61-66 (in Chinese)
- [12] 孙小平, 荣丰涛. 作物优化灌溉制度的研究[J]. 山西水利科技, 2004(2): 39-41
- Sun X P, Rong F T. The research on the optimal irrigation schedule of crop [J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2004(2): 39-41 (in Chinese)
- [13] 巴彦淖尔市统计局, 国家统计局巴彦淖尔调查队. 巴彦淖尔统计年鉴 2017[M]. 巴彦淖尔: 巴彦淖尔市统计局, 2015
- Bayannur Statistics Bureau, National Bureau of Statistics Bayannur Investigation Team. *Bayannur Statistical Year Book 2017* [M]. Bayannur: Bayannur Statistics Bureau (in Chinese)
- [14] Tsakiris G P. A method for applying crop sensitivity factors in irrigation scheduling [J]. *Agricultural Water Management*, 1982, 5(4): 335-343
- [15] Wang Y R, Lei Z D, Yang S X. Cumulative function of sensitive index for winter wheat [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997, 5(12): 29-36
- [16] Hu S J, Zhao R F, Tian C Y, Song Y D. Empirical models of calculating phreatic evaporation from bare soil in Tarim river basin, Xinjiang [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59(3): 663-668
- [17] Hao F H, Qu Y W, Yue W. Analysis of water cycle characteristics and soil water movement in the agricultural

- irrigation area in Inner Mongolia[J]. *Acta Science Circumst*, 2008, 5(3): 825-831
- [18] 徐万林, 粟晓玲. 基于作物种植结构优化的农业节水潜力分析:以武威市凉州区为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(5): 161-165
- Xu W L, Su X L. Agricultural water-saving potential analysis based on crop planting structure optimization: A case study of Liangzhou[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5): 161-165 (in Chinese)
- [19] Chen D L, Gao G, Xu C Y, Guo J, Ren G Y. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China[J]. *Climate Research* 2005, 28(2): 123-132
- [20] 薛景元. 干旱地下水浅埋区基于水盐过程的多尺度农业水分生产力模型与模拟[D]. 北京:中国农业大学, 2018
- Xue J Y. Modeling agricultural water productivity at Mutiscales based on water and salt processes in arid area with shallow groundwater[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [21] 管孝艳, 王少丽, 高占义. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1202-1210
- Guan X Y, Wang S L, Gao Z Y. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1202-1210 (in Chinese)
- [22] 徐英, 葛洲, 王娟, 李伟, 冯绍元. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化与地下水埋深关系研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 131-138
- Xu Y, Ge Z, Wang J, Li W, Feng S Y. Study on relationship between soil salinization and groundwater table depth based on indicator Kriging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1): 131-138 (in Chinese)
- [23] 张义强, 高云, 魏占民. 河套灌区地下水埋深变化对葵花生长影响试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(3): 90-92
- Zhang Y Q, Gao Y, Wei Z M. Effect of different groundwater depths on growth of sunflower at Hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(3): 90-92 (in Chinese)
- [24] 杨会峰, 张发旺, 王贵玲, 刘春雷. 河套平原次生盐渍化地区地下水动态调控模拟研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(3): 63-67
- Yang H F, Zhang F W, Wang G L, Liu C L. Simulation study on dynamic regulation of groundwater depth in soil secondary salinization area, Hetao plain, Inner Mongolia[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(3):63-67 (in Chinese)
- [25] 杜云皓. 基于地下水位埋深预测的灌域非充分灌溉制度优化研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019
- Du Y H. Optimization of deficit irrigation schedule in irrigation district based on groundwater level depth prediction [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东