

文章编号:0559-9350(2021)09-1070-12

## 基于贝叶斯模式平均与区间二型模糊集的分区灌溉方法

邵东国<sup>1</sup>, 邹亮峰<sup>1</sup>, 顾文权<sup>1</sup>, 农翕智<sup>1</sup>, 王鹤<sup>1</sup>, 王柏<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为解决松嫩平原水稻灌溉水需求不断增长与地下水资源可持续利用之间的矛盾,实现节水控采目标,本文以松嫩平原北部和平灌区水稻种植区为例,通过2017—2019年降雨-地下水-产量动态监测试验,揭示灌域尺度地下水时空变化规律;采用聚类分析与空间叠加分析提出了基于地下水埋深的分区方法,确定研究区的地下水埋深分区界限;根据地下水埋深分区结果,采用贝叶斯模式平均(Bayesian Model Averaging, BMA)方法,融合AquaCrop、Jensen模型,进行平、枯水年各分区灌溉情景的产量模拟,提高了地下水埋深分区条件下的产量模拟精度。引入风险偏好因子刻画决策者的风险态度,基于区间二型模糊集(IT2FS)理论对各地地下水埋深区域的灌溉制度进行综合评价,利用有序加权平均算子(Ordered Weighted Averaging, OWA)集结综合评价值,提出了不同地下水埋深区域水稻种植的优化灌溉制度。结果表明:研究区地下水埋深分区界限为1.5 m;采用BMA方法有利于提高地下水埋深分区条件下的产量模拟精度,与实测产量相关性系数超过0.95;分区灌溉模式下各区产量-灌水量响应规律存在差异,但与现行灌溉制度相比,分区灌溉能减少稻田灌水量15%~37.6%,减少地下水开采量12%以上。

**关键词:**灌溉制度优化;地下水动态;分区灌溉;区间二型模糊集;贝叶斯模式平均;风险态度

**中图分类号:** S274.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20210603

## 1 研究背景

松嫩平原是我国重要的粮食产区,受气候变化与粮食市场的影响,松嫩平原水稻种植面积不断扩大<sup>[1-2]</sup>,水田灌溉用水占农业用水80%以上<sup>[3]</sup>,局部地区出现地下水超采现象,对当地河湖湿地生态系统构成严重威胁<sup>[4]</sup>。因此,合理优化水稻灌溉制度,推行节水控采,缓解地下水超采现象,对保护当地粮食生产与河湖湿地生态系统稳定具有重要意义。

作物灌水量与地下水埋深之间存在一定相关性<sup>[5-6]</sup>。在干湿交替稻田中,地下水通过毛管上升成为可供水稻根系吸收利用的土壤水,从而影响根区土壤水分分布<sup>[7-9]</sup>。地下水埋深的变化将改变稻田地表水-土壤水-地下水之间的转化运动规律,进而影响稻田渗漏与作物需水量<sup>[10]</sup>。现有水稻灌溉制度优化研究,大多基于作物耗水与田面水层等试验监测数据,通过多目标遗传算法与水分生产函数、水量平衡等模型耦合,忽略了稻田地下水埋深对灌水量的影响<sup>[11-14]</sup>。实际上,随着东北等地大规模集约化水稻生产的推进和降雨、地下水开采等非均匀分布影响,水稻种植区存在明显的地下水埋深时空变化<sup>[15-17]</sup>。因此,需要根据水稻种植区不同地下水埋深对稻田渗漏与水稻作物需水等的影响差异,通过不同区域地下水埋深差异分区来进一步优化水稻灌溉制度,最大限度地提高毛管水的利用率,减少稻田深层渗漏量,实现大规模集约化水稻种植区域的高效节水灌溉。

收稿日期:2021-07-02;网络首发时间:2021-09-03

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210903.1121.001.html>

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400101);国家自然科学基金重点项目(51439006)

作者简介:邵东国(1964-),教授,博士生导师,主要从事水资源高效利用与生态环境效应研究。E-mail: dgshao@whu.edu.cn

通讯作者:邹亮峰(1998-),硕士生,主要从事水资源高效利用与环境保护研究。E-mail: leonfzou@whu.edu.cn

灌溉制度优化研究中,产量模拟的精度决定了优化结果的可靠性<sup>[18]</sup>。AquaCrop作物模型内置地下水模块<sup>[19]</sup>,能模拟动态地下水埋深条件,所需参数少且便于多情景模拟,但产量模拟精度较差<sup>[20-22]</sup>。作物水分生产函数模型根据当地田间试验数据确定,在产量模拟方面更具针对性,模拟精度更高,但缺少对田间地下水影响的考虑<sup>[23]</sup>。因此,需要深入研究地下水埋深动态变化条件下,提高作物产量模拟精度的有效方法。

考虑到现有灌溉管理决策常凭经验或用水计划,忽略了农业生产中气候、灌溉等农业活动的随机性,以及决策者的风险偏好与判断模糊性,导致灌溉制度优化结果过于理想化,而经验性灌溉制度又常发生灌溉退水现象,造成灌溉水资源浪费<sup>[24-26]</sup>。如何综合考虑农业集约化生产过程中灌溉决策的不确定性,结合决策者主观风险倾向进行灌溉制度优化决策,是提高灌溉制度优化结果实用性与有效性的重要途径。

本文以松嫩平原北部和平灌区水稻种植区2017-2019年降雨-地下水-产量监测试验为基础,通过分析地下水埋深变化规律,基于空间拓扑关系聚类分析与空间叠加分析确定研究区地下水埋深的分区界限;设定AquaCrop模型<sup>[19,22]</sup>中不同区域地下水埋深模块,运用AquaCrop和Jensen模型<sup>[23]</sup>对平、枯水年各区不同灌溉情景进行产量模拟,并用贝叶斯模式平均方法(BMA)<sup>[27-29]</sup>融合两个模型的产量模拟系列,基于区间二型模糊集理论<sup>[30-32]</sup>从节水、增产与地下水稳定三个属性对灌溉情景进行模糊综合评价,结合决策者风险偏好,采用有序加权算术平均算子(OWA)集结各典型年不同分区所有灌溉情景评价值,实现灌溉制度模糊综合优化决策,以期水稻规模化种植区提供基于地下水埋深动态的分区节水控采新方法。

## 2 灌溉区域地下水埋深动态分区

### 2.1 地下水动态监测试验及分区方法

2.1.1 地下水埋深监测试验 试验于2017—2019年在松嫩平原北部(黑龙江省庆安县)和平灌区水稻灌溉试验站开展,该区域为平原区,地势平坦,属于北温带大陆性季风气候,多年平均降雨量558 mm,多年平均蒸发量764.5 mm,多年平均气温2.5℃,年内气温变幅较大,夏季极端最高气温36.7℃,冬季极端最低气温-44.9℃,无霜期128 d。试验区位于寒地黑土核心区,土壤种类为白浆型水稻土,土壤容重为1.02 g/cm<sup>3</sup>,土壤基本理化性质为:pH值6.40,全氮15.10 g/kg,全磷15.21 g/kg,全钾20.09 g/kg,有机质41.5 g/kg。区域内设有7眼地下水观测井,根据试验区地形条件,均匀分布在主要排水口附近,在生育期内采用地下水监测系统逐日观测地下水埋深(Groundwater depth, GD),具体分布如图1所示。

2.1.2 分区方法 采用线性函数归一化方法,对生育期内地下水埋深监测数据进行归一化处理。基于K-Means聚类算法对归一化后的埋深数据进行聚类分析,确定灌溉区域根据地下水埋深分区的节点。K-Means聚类算法的思路为,使样本空间所有的非中心点到各自所属簇的中心点的距离的平方和最小,目标函数 $F$ 为:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (1)$$

$$F = \min_{(C_1, C_2, \dots, C_k)} \sum_{i=1}^n d^2(X_i, C(X_i)) \quad (2)$$

式中: $X_{\text{norm}}$ 为归一化后数据; $X$ 为原始数据; $X_{\text{max}}$ 、 $X_{\text{min}}$ 分别为原始数据集的最大值与最小值; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\dots$ 、 $C_k$ 分别是 $k$ 个簇的中心点; $C(X_i)$ 为 $X_i$ 点所属的簇的中心点; $d^2(X_i, C(X_i))$ 为求两点的距离平方。

根据聚类分析结果,基于ArcGIS平台采用Kriging插值方法进行多次插值,通过分析地理实体的拓扑关系,对插值结果进行空间叠加分析,最终实现区域分区。

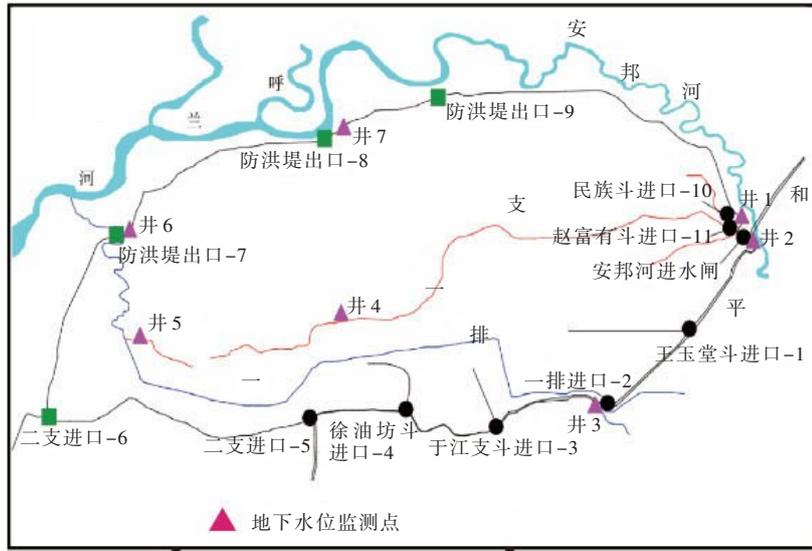


图1 地下水监测井分布

## 2.2 地下水动态分析及分区结果

2.2.1 地下水埋深动态分析 根据2017、2018年地下水监测数据，计算生育期平均地下水埋深(Average groundwater depth, AGD)，结果见图2。从图2可以看出，2017年AGD在1.25 ~ 2.12 m之间变化，变幅为0.87 m；2018年AGD在0.65 ~ 2.03 m之间变化，变幅为1.38 m；2018年为特丰水年，降雨量较大，因此地下水埋深波动更加剧烈，2018年AGD变幅相比2017年增加了58.6%。

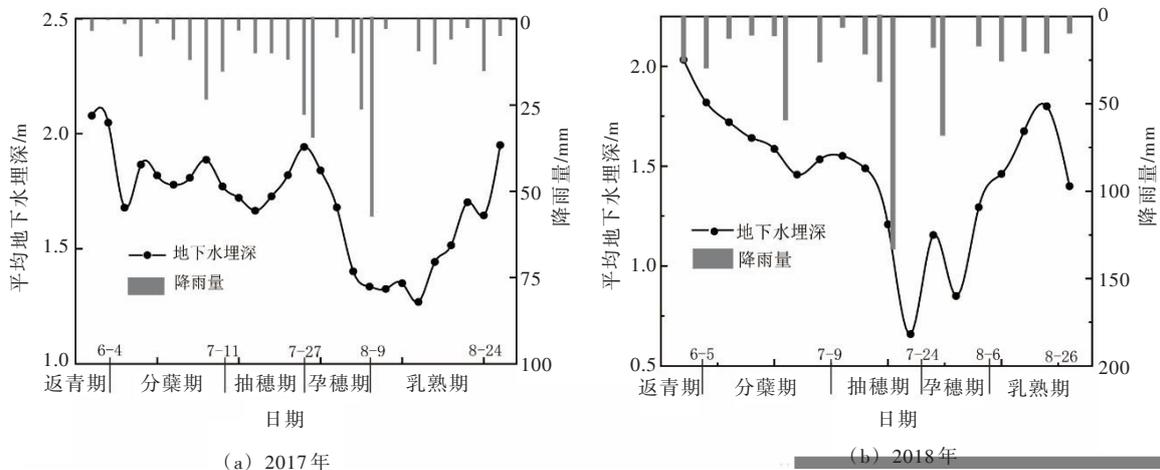


图2 生育期区域平均地下水埋深与降雨量关系

受降雨、灌溉等因素影响，水稻不同生育期内地下水埋深不同。分蘖期以灌溉为主，降雨量少，GD在1.55 ~ 2.03 m之间；孕穗期、抽穗期降雨丰富且集中，因此GD逐渐减小，2017、2018年GD分别为1.32 ~ 1.76 m和0.65 ~ 1.49 m；乳熟期降雨、灌溉减少，使得区域GD增加，GD在1.52 ~ 1.85 m之间。

2.2.2 地下水埋深分区结果 根据2017年、2018年监测数据对地下水埋深进行频数分布统计，其结果如图3所示，GD近似满足正态分布。调用R

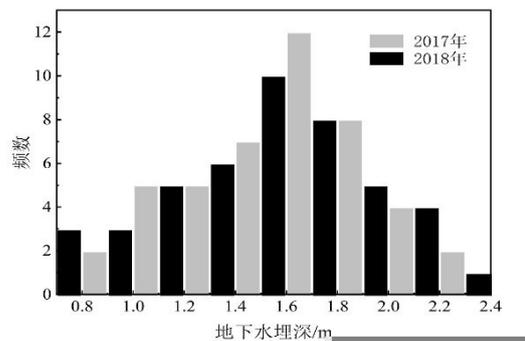


图3 地下水埋深监测数据频数分布直方图

语言中 kmeans() 函数, 设置类别数  $k=2$ , 分别对 2017 年、2018 年  $GD$  数据(一维数据)进行聚类分析, 结果如表 1 所示, 将  $GD$  监测数据分为两簇后, 簇 1 以 1.8 m 左右为数据中心, 簇 2 以 1.48 ~ 1.17 m 为数据中心。

土壤水-地下水垂向运动规律研究表明, 地下水埋深增加将导致稻田渗漏量增大, 作物对地下水的利用率降低<sup>[33]</sup>。 $GD>2.8$  m 后, 垂向运动以深层渗漏为主, 地下水无法补给作物需水<sup>[9]</sup>;  $GD<0.7$  m 时, 地下水蒸发量较大, 易发生土壤盐渍化, 阻碍作物生长及其根系发育<sup>[11]</sup>; 埋深 1.5 m 介于两簇质心之间, 与聚类分析结果相契合, 以此为分区界限可以兼顾深层渗漏与毛管上升对稻田灌水量的影响。基于  $GD$  聚类分析结果, 结合土壤水-地下水垂向运动规律, 最终确定分区灌溉的地下水埋深分区界限为 1.5 m。

以埋深 1.5 m 为界限, 结合 2017、2018 年水稻不同生育期区域地下水埋深的多次 Kriging 插值结果, 对研究区进行初步分区。根据地理实体的拓扑关系, 采用空间叠加分析方法对初步分区结果进行相交分析, 最终分区结果如图 4 所示(I 区表示  $GD\leq 1.5$  m 的区域, II 区为  $GD>1.5$  m 的区域), 为确定不同地下水埋深区域的水稻最优灌溉模式、保证地下水可持续利用奠定了基础。

### 3 基于贝叶斯模式平均方法的分区产量模拟模型

**3.1 产量模拟模型** 为深入揭示灌区地下水埋深动态对水稻产量的影响, 利用 AquaCrop 模型地下水模块<sup>[19]</sup>模拟不同地下水埋深分区的作物灌水与产量关系, 但产量模拟精度次于水分生产函数模型。因此, 为提高产量模拟精度, 以 AquaCrop 模型中各区地下水动态埋深为控制条件, 将该模型模拟所得水稻蒸发量结果作为 Jensen 水分生产函数模型<sup>[23]</sup>的输入, 得到不同地下水埋深区域的产量模拟值, 通过贝叶斯模式平均(BMA)方法<sup>[29]</sup>将 AquaCrop 与 Jensen 模型产量模拟结果融合, 得到精度更高的整合产量系列。

**3.1.1 AquaCrop 作物模型** AquaCrop 模型是基于水分驱动的日尺度作物生长模拟模型, 主要根据实际蒸腾量与归一化水分生产率计算生物量, 利用收获指数和生物量的乘积确定最终产量。计算公式为:

$$B = WP^* \sum T_r \quad (3)$$

$$Y = BHI \quad (4)$$

式中:  $B$  为生物量,  $t/hm^2$ ;  $T_r$  为实际蒸腾量,  $mm$ ;  $WP^*$  为归一化水分生产率;  $HI$  为收获指数, %;  $Y$  为产量,  $t/hm^2$ 。

模型运行需要输入: 气象参数、作物参数、田间管理参数、土壤参数<sup>[19]</sup>。AquaCrop 模型地下水模块中设定不同地下水埋深调节土壤水分胁迫程度。

**3.1.2 水分生产函数模型** 选取 Jensen 水分生产函数模型描述水稻不同生育期水分-产量关系, 可表示为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i} \quad (5)$$

表 1 地下水埋深数据聚类分析后各簇数据质心结果

	2017 年		2018 年	
	簇 1	簇 2	簇 1	簇 2
归一化	0.66	0.27	0.71	0.27
还原后/m	1.83	1.48	1.86	1.17

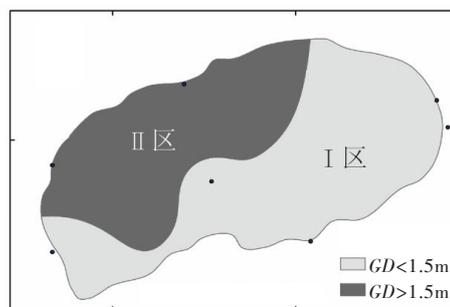


图 4 结合聚类分析、多次 Kriging 插值与相交分析对灌域地下水埋深分区结果

式中： $Y_a$ 、 $Y_m$ 分别为作物全生育期内的实际产量和最大产量， $\text{kg}/\text{hm}^2$ ； $ET_a$ 、 $ET_m$ 分别为全生育期作物实际腾发量和最大腾发量， $\text{mm}$ ； $\lambda_i$ 为*i*生育阶段缺水对作物产量影响的敏感性指数，即水分敏感指数； $n$ 为生育阶段数。

将其转化为多元线性方程，采用多元线性回归分析方法求解各系数，得到适合研究区的 Jensen 模型<sup>[24]</sup>为：

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_1^{0.088} \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_2^{0.12} \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_3^{0.085} \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_4^{0.244} \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_5^{0.252} \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_6^{0.105} \quad (6)$$

式中下标 1、2、3、4、5、6 分别代表分蘖前中后期、拔节期、抽穗期与乳熟期。

3.1.3 贝叶斯模式平均(BMA)方法 BMA 方法<sup>[28]</sup>是一种集合不同模型模拟值，得到更可靠的综合模拟值的统计后处理方法。假设  $S$  为产量模拟量， $R=[X, Y]$  为输入数据(其中  $X$  代表各模型模拟产量， $Y$  代表实测产量)， $f = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$  是  $K$  个模型模拟的集合，基于贝叶斯全概率公式可得模拟量  $S$  的概率密度函数为：

$$p(S|R) = \sum_{k=1}^K p(f_k/R) p_k(S|f_k, R) \quad (7)$$

式中： $p_k(S|f_k, R)$  为第  $k$  个模型在给定的数据条件下模拟值的概率密度函数； $p(f_k/R)$  为给定训练数据时第  $k$  个模型的后验概率密度函数，反映该模型模拟结果的优劣。

BMA 方法采用后验概率作为权重，对各模型模拟值进行加权平均，最终输出综合模拟结果，精度较高的模型权重值更大。若单个模型模拟值与实测值均符合正态分布，可用 BMA 方法的校正公式：

$$E(S|R) = \sum_{k=1}^K p(f_k/R) E[g(S|f_k, \sigma_k^2)] = \sum_{k=1}^K \omega_k f_k \quad (8)$$

式中： $g(S|f_k, \sigma_k^2)$  为均值  $f_k$ 、方差  $\sigma_k^2$  的正态分布； $E$  为期望函数值； $\omega_k$  为第  $k$  个模型的权重。

BMA 待求参数可表示为  $\theta = \{\omega_k, \sigma_k^2, k=1, 2, \dots, K\}$ ，通过 Box-Cox 函数将各模型产量模拟系列进行正态转换，采用期望最大化(EM)算法求解  $\theta = \{\omega_k, \sigma_k^2, k=1, 2, \dots, K\}$  的数值解<sup>[28]</sup>。

3.2 灌溉情景设定 根据庆安气象站历史数据，采用优化适线法选取 Pearson-III 型曲线进行拟合。选取 1992 年( $P=50\%$ )为典型平水年，2007 年( $P=85\%$ )为典型枯水年，各典型年份生育期累计降雨量分别为 426 和 274  $\text{mm}$ 。

根据灌区地下水埋深分区结果(I 区、II 区 GD 数值)设定 AquaCrop 地下水模块动态 GD 情景。通过增加或减少灌水次数、加大或降低灌溉定额的方式，基于解空间动态缩减策略<sup>[34]</sup>共组合生成 576 种灌溉模拟情景，组合方式见表 2。

表 2 灌溉情景设定

	返青期	分蘖期	孕穗期	抽穗期	乳熟期
灌水定额/ $\text{mm}$	25	35	35	25	25
灌水次数	4	6	6	2	2

采用 AquaCrop 模型对各典型年不同分区所有灌溉情景进行蒸发量-产量模拟，同时基于模拟所得蒸发量计算各灌溉情景下 Jensen 模型产量值。

## 4 基于区间二型模糊集的灌溉制度风险决策模型

4.1 基于 IT2FS 的模糊决策模型 在灌溉制度优选中，受管理者主观因素影响，常存在一定模糊性。为提高优选结果的合理性，本文基于区间二型模糊集(IT2FS)<sup>[32]</sup>建立了灌溉制度模糊决策模型，主要采用效用函数( $U(A)$ )度量 IT2FS 的优劣性，以区间二型模糊集熵( $E(A)$ )度量 IT2FS 自身的

不确定性<sup>[31]</sup>。同时引入风险偏好因子( $\theta$ )刻画不同决策者的风险态度,各属性权重由 $E(A)$ 和 $\theta$ 共同确定。采用有序加权算术平均算子( $OWA$ )集结各方案属性权重与效用函数得到综合效用值。

对于有 $n$ 个方案集 $x_i(0 < i < n)$ , $m$ 个属性 $C_j(0 < j < m)$ 的决策问题,完整决策步骤如下<sup>[31]</sup>。

(1)对各方案的所有属性进行模糊评价,得到原始决策矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times m}$ ( $a_{ij}$ 均是IT2FS,表示决策者对某方案的评价结果)对其进行规范化得到规范化决策矩阵 $D(d_{ij})_{n \times m}$ 。

(2)计算 $D$ 矩阵的效用函数 $U(d_{ij})_{n \times m}$ 和区间二型模糊集熵 $E(d_{ij})_{n \times m}$ 。

$$U(d_{ij})_{n \times m} = \frac{MH(A^U)}{a_4^U - a_1^U} \int_{a_1^U}^{a_4^U} \bar{u}_A(x)(1+x)dx + \frac{NH(A^L)}{a_4^L - a_1^L} \int_{a_1^L}^{a_4^L} \underline{u}_A(y)(1+y)dy \quad (9)$$

$$E(d_{ij})_{n \times m} = -\frac{1}{3\ln 2} \left\{ \begin{aligned} &\rho_A \ln \rho_A + (1-\rho_A) \ln(1-\rho_A) + \vartheta_A \ln \vartheta_A + (1-\vartheta_A) \ln(1-\vartheta_A) + \\ &\frac{\psi_A}{2} \ln \frac{\psi_A}{2} + \left(1 - \frac{\psi_A}{2}\right) \ln \left(1 - \frac{\psi_A}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $A^u = \{(a_1^u), (a_2^u), (a_3^u), (a_4^u); H(A^u)\}$ 代表IT2FS的上界; $A^L = \{(a_1^L), (a_2^L), (a_3^L), (a_4^L); H(A^L)\}$ 代表IT2FS的下界; $M = \frac{a_1^u + a_2^u + a_3^u + a_4^u}{4}$ ;  $N = \frac{a_1^L + a_2^L + a_3^L + a_4^L}{4}$ ;  $\bar{u}_A(x)$ 和 $\underline{u}_A(y)$ 分别为上下隶属度函数; $H(A^u)$ 、 $H(A^L)$ 分别为上下隶属度中中间参数的隶属度值; $\rho_A$ 为模糊度量; $\vartheta_A$ 为犹豫性度量; $\psi_A$ 表示区间性度量。

(3)计算不同决策风险偏好时各属性权重。

$$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^n (U(d_{ij}) + \theta E(d_{ij}))}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (U(d_{ij}) + \theta E(d_{ij}))} \quad (11)$$

式中: $U(d_{ij})$ 为效用函数; $E(d_{ij})$ 为区间二型模糊集熵; $\theta$ 为风险偏好因子。风险偏好型 $\theta=1$ ;风险中性型 $\theta=0$ ;风险规避型 $\theta=-1$ ;  $1 \leq i \leq n$ ;  $1 \leq j \leq m$ 。

(4)根据属性权重与效用函数,利用有序加权平均算子集结不同风险偏好下各方案综合效用值 $U$ :

$$U = \sum_{j=1}^m \omega_j b_j \quad (12)$$

式中: $b_j$ 为 $U(d_{ij})$ 第 $j$ 行元素中第 $j$ 大的元素; $\omega_j$ 为第 $j$ 个属性的权重。

**4.2 决策模型属性与标准设定** 根据产量模拟结果,从节水效益( $C_1$ )、增产效果( $C_2$ )和地下水埋深的稳定性( $C_3$ )三个属性对各典型年不同地下水埋深区域所有灌溉情景进行评估。评估结果用语言进行标度,各语言标度对应的区间二型模糊集如表3所示。

表3 语言标度及其对应的区间二型模糊集

语言标度	区间二型模糊集
极低(VL)	{(0,0,0,0.1;1),(0,0,0,0.05;0.9)}
低(L)	{(0,0.1,0.1,0.3;1),(0.05,0.1,0.1,0.2;0.9)}
较低(ML)	{(0.1,0.3,0.3,0.5;1),(0.2,0.3,0.3,0.4;0.9)}
中等(M)	{(0.3,0.5,0.5,0.7;1),(0.4,0.5,0.5,0.6;0.9)}
较高(MH)	{(0.5,0.7,0.7,0.9;1),(0.6,0.7,0.7,0.8;0.9)}
高(H)	{(0.7,0.9,0.9,1;1),(0.8,0.9,0.9,0.95;0.9)}
极高(VH)	{(0.9,1,1,1;1),(0.95,1,1,1;0.9)}

## 5 结果与分析

**5.1 产量模拟模型率定验证结果** 根据2017、2018年田间实验数据<sup>[23,33]</sup>对AquaCrop模型、BMA法参数进行率定、求解。选取体积差 $D_V$ <sup>[35-36]</sup>、纳什系数 $NSE$ 和决定系数 $R^2$ 评价模型模拟精度。

**5.1.1 AquaCrop模型率定验证结果** 选取土壤含水率指标检验AquaCrop模型适用性,以2017年控灌(T1)、浅晒浅灌(T2)、淹灌(T3)处理数据率定模型,调整作物参数,率定后部分参数见表4。以2018年为验证期,模拟得到土壤含水率与实测数据比较见图5,精度评价结果见表5。对比土壤含

水率实测值和模拟值，实测点均落在模拟含水率曲线附近，模拟值正负体积差  $D_v$  不超过 3.8%， $R^2$  与  $NSE$  均在 0.8 以上，说明土壤含水率模拟值与实测值之间一致性强，AquaCrop 模型适用性高。

表 4 率定后的模型输入参数

参数	定义	取值
$CC_0$	初始冠层覆盖度/%	3.57
$CGC$	冠层增长率/%	10.9
$CDC$	冠层衰老率/%	7.9
$CC_L$	最大冠层覆盖度/%	95
$K_{cr}$	冠层覆盖衰老前的作物系数	1.1
$WP^*$	归一化水分生产率/( $g \cdot m^{-2}$ )	19
$HI_0$	参考收获指数/%	49
$RD_{max}$	最大有效根深/m	0.6
$RD_{min}$	最小有效根深/m	0.3
$T_{min}$	最低有效积温/ $^{\circ}C$	10
$IHI$	HI 的最大允许增长率/%	15

表 5 含水率模拟评价指标

	$D_v$ /%	$NSE$	$R^2$
率定	T1	3.347	0.912
	T2	1.471	0.879
	T3	1.957	0.851
验证	T1	-3.728	0.901
	T2	-1.524	0.823
	T3	3.184	0.847

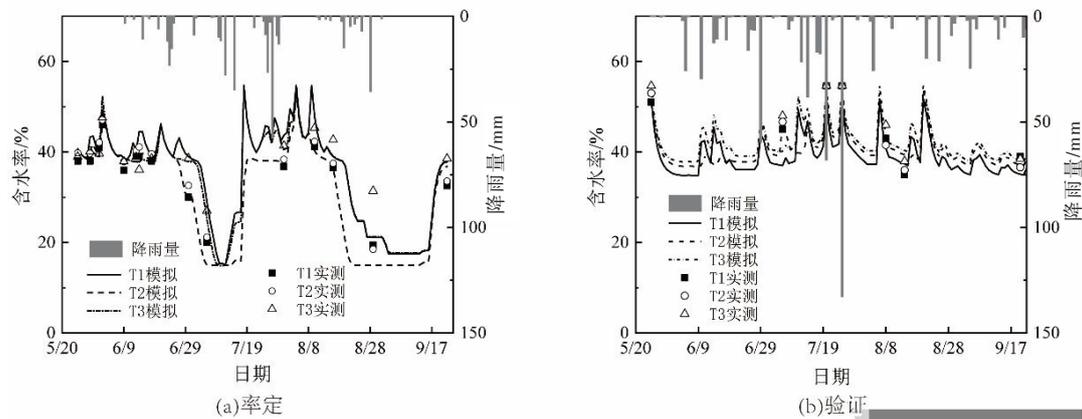


图 5 土壤含水率实测值与模拟值对比

5.1.2 BMA 参数估计与产量模拟精度结果 基于 2017、2018 年实测产量系列<sup>[23]</sup>、AquaCrop<sup>[19]</sup>与 Jensen 模型<sup>[23]</sup>模拟产量系列，采用期望最大化(EM)<sup>[27]</sup>算法并结合 R 语言 BMS 包求解 BMA 方法中各模型所占权重。结果显示，AquaCrop 模型所占权重为 0.402，Jensen 模型权重为 0.598，表明 Jensen 模型产量模拟精度更高。

表 6 BMA 方法与单一模型产量模拟精度评价结果

		$D_v$ /%	$NSE$	$R^2$
率定	AquaCrop	-3.689	0.69	0.887
	Jensen	2.127	0.73	0.957
	BMA	1.814	0.76	0.967
验证	AquaCrop	-4.804	0.70	0.877
	Jensen	2.841	0.75	0.948
	BMA	1.146	0.79	0.955

表 6 为贝叶斯模式平均(BMA)方法<sup>[29]</sup>及其 2 个模型产量模拟精度评价结果。从表 6 可知，AquaCrop 模型高估产量( $D_v < 0$ )，Jensen 模型低估产量( $D_v > 0$ )，采用 BMA 方法可以调和两个产量模拟系列；BMA 方法的确定性系数( $R^2$ )均在 95% 以上，大于任一单个模型的  $R^2$ ；BMA 方法的纳什效率系数  $NSE$  最大，表明经过 BMA 方法融合后的产量模拟精度比单一模型的模拟精度高。

2017、2018 年实测产量与模拟产量对比图 6。从图 6 可以发现，BAM 方法产量模拟效果最优，产

量的相关系数超过 0.95, AquaCrop 模型效果最差。因此,在动态地下水埋深条件下,采用 BMA 方法<sup>[29]</sup>融合 AquaCrop、Jensen 模型的模拟产量能够提高和平灌区产量模拟精度。

**5.2 分区灌溉模拟结果** 各典型年不同地下水埋深区域所有灌溉情景产量模拟结果见图 7(I 区表示  $GD \leq 1.5$  m 的区域, II 区表示  $GD > 1.5$  m 的区域)。采用 Mann-Kendall 趋势检验法,对各年型不同区域所有灌溉情景的产量进行趋势检验,结果见表 7。结果显示,不同年型各区域产量趋势检验值均小于 -2.58(显著性水平 0.01),随着灌水量增加,产量总体呈显著下降趋势,但枯水年产量变化趋势与总体变化趋势存在差异。

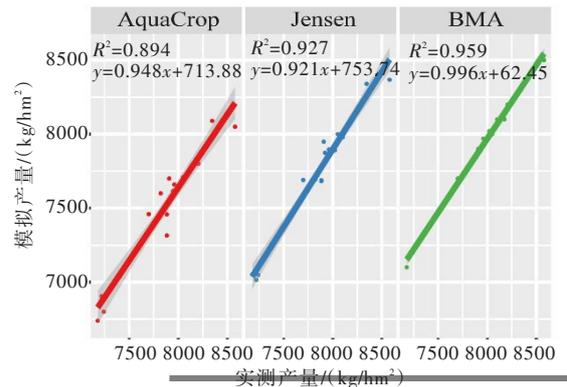


图 6 模拟产量与实测产量对比

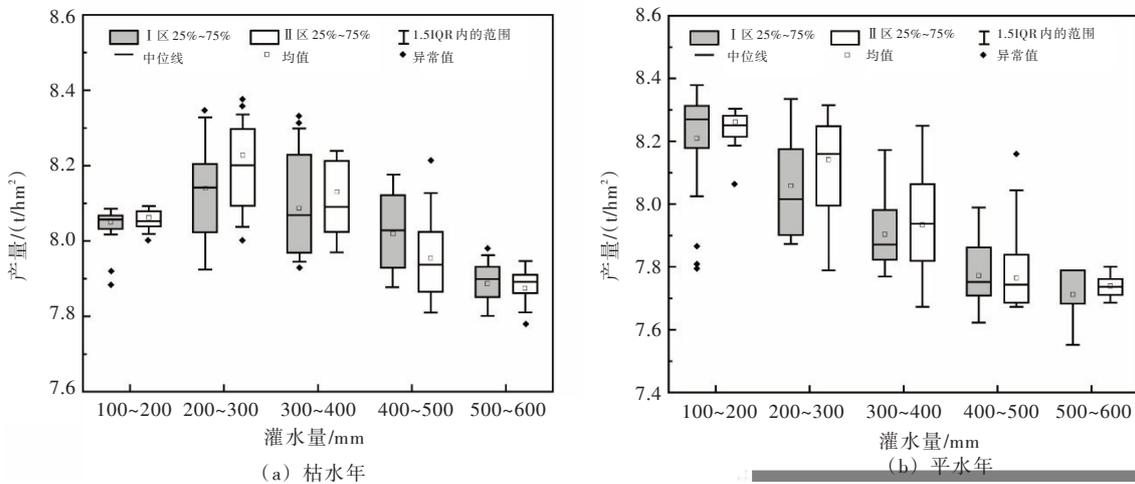


图 7 I 区、II 区不同灌溉情景产量-灌水量关系

表 7 产量 Mann-Kendall 趋势检验值

	平水年 ( $P=50\%$ )	枯水年 ( $P=85\%$ )
I 区	-17.984 <sup>1)</sup>	-12.612 <sup>1)</sup>
II 区	-13.491 <sup>1)</sup>	-17.649 <sup>1)</sup>

注: 1)表示 0.01 显著水平。

筛选相同灌水量下各典型年不同区域产量最大的灌溉情景,拟合产量-灌水量关系曲线,结果如图 8、表 8 所示。结果表明,水稻产量-灌水量响应规律呈非线性关系。灌水量较小时,土壤含水率较低,作物受到一定程度干旱胁迫,阻碍干物质累积与产量形成,此时增加灌水能够降低水分胁迫程度,促进产量形成;枯水年水分胁迫更严重,产量形成受到抑制,增加灌水能显著降低水分胁迫对产量形成的抑制作用。灌水量较大时,土壤常处于饱和状态,土壤含氧量和透气性低,导致水稻根系发育受阻,进而影响产量形成;灌水量越大,越容易产生深层渗漏,造成无效灌水。因此,随灌水量增加,水分胁迫逐渐消除,产量为增长趋势,而后影响根系呼吸进而降低产量,但产量整体仍然呈现随着灌水量增加而降低的趋势。

随着灌水量增加, I 区最早出现产量降低现象, II 区较晚出现。原因是地下水埋深小时,地下水可通过毛管水上升供给水稻需水,此时土壤水分垂向运动为毛管水上升过程,增加灌水量会更早影响根系呼吸作用,最终导致产量降低;埋深较大时,渗漏增强,因此产量降低现象出现较晚。综上所述,水稻产量与灌水量响应规律表现出高度非线性,且总体下降趋势明显,并随地下水埋深增大表现出滞后现象,能够为优化水稻分区灌溉制度提供理论依据。

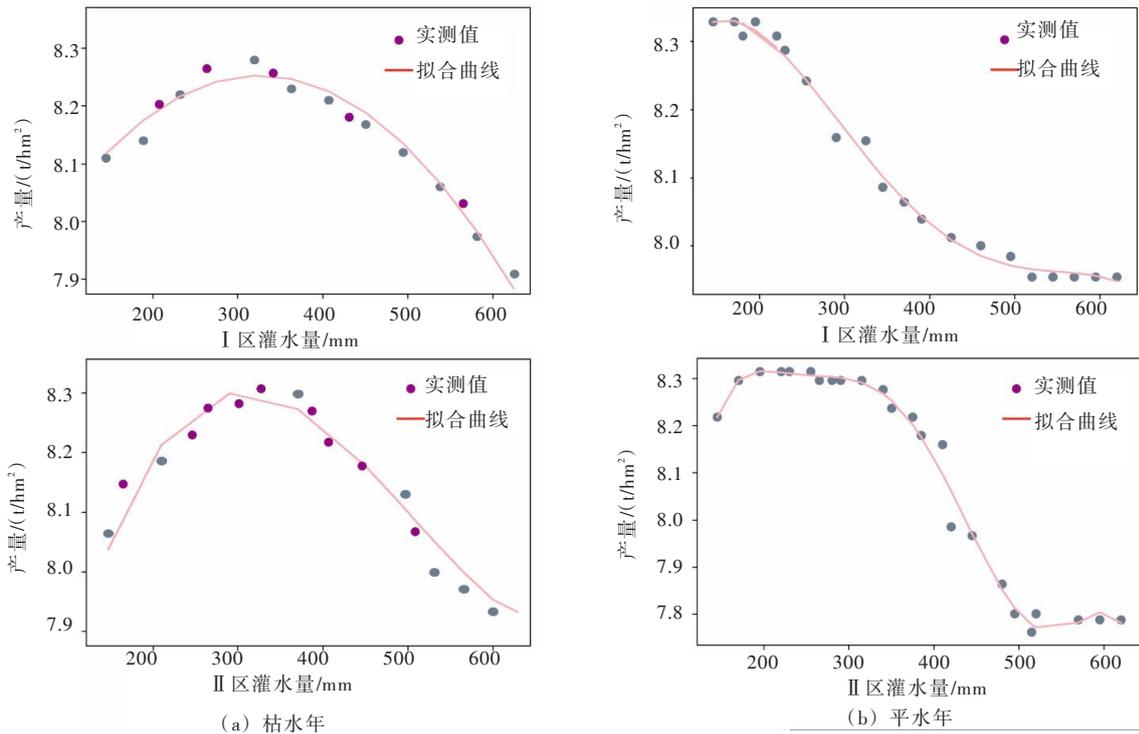


图8 产量与灌水量拟合曲线

表8 各年型不同区域产量-灌水量拟合曲线方程

		曲线方程	$R^2$
平水年 ( $P=50\%$ )	I 区	$0.000042x^2+0.009x+7.77$	0.976
	II 区	$0.000049x^3+0.001x^2-0.154x+0.541$	0.934
枯水年 ( $P=85\%$ )	I 区	$-0.000079x^2+0.0028x+7.785$	0.944
	II 区	$0.000022x^3-0.0031x^2+0.0118x+6.877$	0.928

**5.3 灌溉制度风险决策结果** 根据式(11)分别计算各年型不同区域不同决策风险偏好下节水效益( $C_1$ )、增产效果( $C_2$ )和地下水稳定性( $C_3$ )三个属性的权重值, 基于期望效用函数理论, 引入绝对风险回避系数 $A(W)$ 衡量风险回避程度,  $A(W) > 0$ 为风险规避型;  $A(W) = 0$ 为风险中性型;  $A(W) < 0$ 为风险偏好型, 计算结果如图9所示。结果显示, 属性权重未知时, 不同风险态度会影响各属性权重分布。随着风险态度逐渐转变为偏好型, 地下水埋深较浅区域(I区) $C_1$ 属性权重上升,  $C_2$ 属性权重下降,  $C_3$ 属性权重保持稳定; 埋深较深区域(II区) $C_1$ 属性权重降低,  $C_2$ 属性权重略微降低,  $C_3$ 权重上升。

根据各年型各分区不同风险态度的属性权重, 结合效用函数, 采用有序加权算术平均算子(OWA)对灌溉情景综合效用值进行集结, 选取综合效用值最大的灌溉情景为最优灌溉制度, 结果见表9。

优化后, 相比传统雨养种植, 平水年每增加100 mm灌水, 水稻产量提高1100 kg/hm<sup>2</sup>以上, 枯水年每增加100 mm灌水, 产量提高1000 kg/hm<sup>2</sup>以上, I区水稻增产效果更显著。

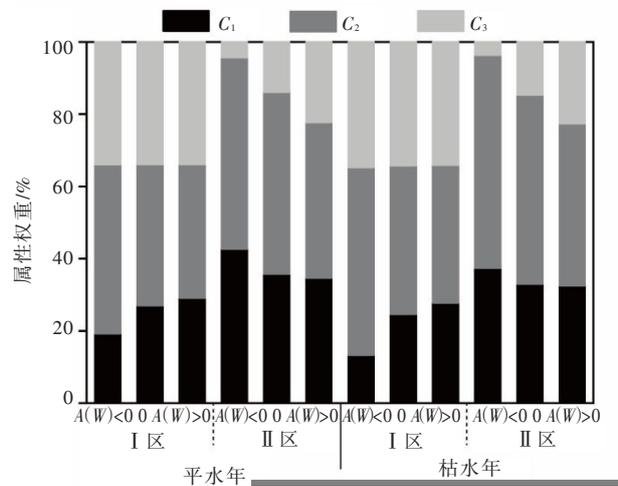


图9 各典型年不同区域内不同风险偏好下各属性权重分布

表9 各年型不同地下水埋深区域的优化灌溉制度

年型	区域	风险态度	综合效用值	灌水定额/mm	次数	产量/(t/hm <sup>2</sup> )
平水年 (P=50%)	I 区	$A(W)>0$	1.632	195	7	8.329
		$A(W)=0$	1.555	195	7	8.329
		$A(W)<0$	1.632	145	5	8.287
	II 区	$A(W)>0$	1.668	215	7	8.308
		$A(W)=0$	1.529	205	7	8.308
		$A(W)<0$	1.568	170	6	8.154
枯水年 (P=85%)	I 区	$A(W)>0$	1.398	275	9	8.305
		$A(W)=0$	1.402	230	9	8.305
		$A(W)<0$	1.496	215	7	8.112
	II 区	$A(W)>0$	1.596	285	9	8.286
		$A(W)=0$	1.502	285	9	8.286
		$A(W)<0$	1.395	250	8	8.016

著。通过灌溉措施可以缓解降雨时空分布不均导致的水稻水分亏缺，因此松嫩平原水稻分区灌溉模式具有较大灌水增产潜力，优化后的水稻灌溉制度能实现增产目标。相比传统淹灌<sup>[37]</sup>，优化后的灌溉制度考虑了稻田地下水的补给作用与田间深层渗漏的影响，平水年平均节水22%以上，枯水年平均节水30%以上，在浅埋区(I区)节水效果更显著，可节水37.6%以上。相较于灌区现行灌溉制度<sup>[37]</sup>，平水年可节水15%左右，枯水年可达20%。松嫩平原当前种植结构下<sup>[1]</sup>，采用优化后的水稻灌溉制度至少可节水8.3亿m<sup>3</sup>，减少地下水开采量12%以上。因此，考虑稻田地下水埋深进行分区优化后的水稻灌溉制度，在稳产的同时具有良好的节水控采效果，能有效缓解地下水超采现象，为当地河湖湿地生态系统安全提供保障。

## 6 结论

(1)通过2017—2019年松嫩平原北部和平灌区降雨-地下水-产量监测试验与统计分析，揭示了灌区地下水时空动态变化规律，提出了稻田动态地下水埋深条件下的水稻灌溉制度分区优化方法，采用K-Means算法与空间叠加分析方法，确定了和平灌区稻田地下水埋深的分区界限为1.5 m。

(2)采用贝叶斯模式平均(BMA)方法融合AquaCrop、Jensen模型产量模拟系列，提高了动态地下水埋深条件下的产量模拟精度，BMA产量模拟值与实测值的相关系数超过0.95。通过模拟不同水量分配情景，揭示了各典型年分区灌溉的水稻产量-灌水量差异性响应规律与灌溉增产潜力，为分区灌溉制度优化提供理论基础。

(3)为提高灌溉制度优化结果的合理性，构建了基于区间二型模糊集理论的灌溉制度模糊风险决策模型，引入风险偏好因子刻画决策者的风险态度，提出了适合不同决策者的灌域分区灌溉模式，该模式能够减少稻田灌水量15%~37.6%，减少地下水开采量12%以上。

(4)由于地下水埋深时空差异性大，点尺度历史地下水埋深数据存在局限性，地下水埋深分区结果的有效性受到挑战，因此构建区域地下水埋深实时模拟、预测模型，提高分区结果的有效性，获得更合理的水稻分区灌溉制度，是未来需要完善的重要内容。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 许迪,李益农,龚时宏,等.气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究[J].农业工程学报,2019,35(14):79-89.
- [ 2 ] 黄志刚,王小立,肖焯,等.气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):260-268.

- [ 3 ] 路中, 雷国平, 郭一洋, 等. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1894-1906.
- [ 4 ] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 202-210.
- [ 5 ] GAO X, BAI Y, HUO Z, et al. Deficit irrigation enhances contribution of shallow groundwater to crop water consumption in arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 185: 116-125.
- [ 6 ] XUE J, HUO Z, WANG F, et al. Untangling the effects of shallow groundwater and deficit irrigation on irrigation water productivity in arid region: New conceptual model[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 1170-1182.
- [ 7 ] 谭学志. 节水灌溉稻田水氮迁移转化机理及模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [ 8 ] 彭世彰, 艾丽坤, 和玉璞, 等. 稻田灌排耦合的水稻需水规律研究[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 320-325.
- [ 9 ] YI L, MARIOS S. Seasonal groundwater contribution to crop-water use assessed with lysimeter observations and model simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(3): 325-335.
- [ 10 ] YANG N, ZHOU P, WANG G, et al. Hydrochemical and isotopic interpretation of interactions between surface water and groundwater in Delingha, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598. doi:10.1016/J.JHY-DROL.2021.126243.
- [ 11 ] 孙景生, 康绍忠, 张寄阳, 等. 霍泉灌区冬小麦夏玉米高产节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 50-53.
- [ 12 ] 付强, 王立坤, 门宝辉, 等. 推求水稻非充分灌溉下优化灌溉制度的新方法——基于实码加速遗传算法的多维动态规划法[J]. 水利学报, 2003(1): 123-128.
- [ 13 ] 于芷婧, 尚松浩. 华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(9): 1188-1196.
- [ 14 ] 宋健, 李江, 杨奇鹤, 等. 基于 AquaCrop 和 NSGA-II 的灌溉制度多目标优化及其应用[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1284-1295.
- [ 15 ] 张光辉, 费宇红, 严明疆, 等. 灌溉农田节水增产对地下水开采量影响研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 350-355.
- [ 16 ] GAO X, HUO Z, XU X, et al. Shallow groundwater plays an important role in enhancing irrigation water productivity in an arid area: The perspective from a regional agricultural hydrology simulation[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 43-58.
- [ 17 ] AO C, ZENG W, WU L, et al. Time-delayed machine learning models for estimating groundwater depth in the Hetao Irrigation District, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255. doi:10.1016/J.GWAT.2021.107032.
- [ 18 ] LIU Y, SONG W. Modelling crop yield, water consumption, and water use efficiency for sustainable agroecosystem management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119940.
- [ 19 ] FAO. Reference manual chapter1-Aquacrop[Z]. FAO, 2009.
- [ 20 ] 邵东国, 乐志华, 徐保利, 等. 基于 AquaCrop 模型的有机稻灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 114-122.
- [ 21 ] 徐昆, 朱秀芳, 刘莹, 等. 采用 AquaCrop 作物生长模型研究中国玉米干旱脆弱性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 154-161.
- [ 22 ] XU J, BAI W, LI Y, et al. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 289-297.
- [ 23 ] 魏永霞, 汝晨, 刘慧, 等. 黑土区水稻耗需水过程与产量形成及水分利用的响应关系[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(1): 56-65.
- [ 24 ] 许迪, 龚时宏. 大型灌区节水改造技术支撑体系及研究重点[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 806-811.
- [ 25 ] 王卫光, 丁一民, 徐俊增, 等. 多模式集合模拟未来气候变化对水稻需水量及水分利用效率的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 715-723.
- [ 26 ] ZHANG X, GUO P, ZHANG F, et al. Optimal irrigation water allocation in Hetao Irrigation District considering decision makers' preference under uncertainties[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 246. doi:10.1016/J.AGWAT.2020.106670.

- [ 27 ] 尹家波, 郭生练, 王俊, 等. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1335-1346.
- [ 28 ] 董磊华, 熊立华, 万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1065-1074.
- [ 29 ] WANG X, MÜLLER C, ELLIOT J, et al. Global irrigation contribution to wheat and maize yield[J]. Nature communications, 2021, 12(1). doi: 10.1038/S41467-021-21498-5.
- [ 30 ] POURMAND E, MAHJOURI N, HOSSEINI M, et al. A Multi-Criteria Group Decision Making Methodology Using Interval Type-2 Fuzzy Sets: Application to Water Resources Management[J]. Water Resources Management, 2020, 34: 4067-4092.
- [ 31 ] 李茹霞, 扈文秀, 齐晓亮. 区间二型模糊集效用函数和熵在风险决策中的应用[J]. 运筹与管理, 2021, 30(5): 102-109.
- [ 32 ] 邓廷权, 王占江, 汪培培, 等. 二型模糊集的模糊熵研究[J]. 控制与决策, 2012, 27(3): 408-412.
- [ 33 ] 田旖旎, 邵东国, 李思明, 等. 东北寒区水稻需水对地下水埋深的响应及灌溉模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 68-77.
- [ 34 ] 李章洪, 梁晓磊, 田梦丹, 等. 求解排列组合问题的解空间动态缩减策略[J]. 计算机应用, 2020, 40(7): 2016-2020.
- [ 35 ] XIE S, DU J, ZHOU X, et al. A progressive segmented optimization algorithm for calibrating time-variant parameters of the Snowmelt Runoff Model (SRM)[J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 470-483.
- [ 36 ] ZHANG G, XIE H, YAO T, et al. Quantitative water resources assessment of Qinghai Lake basin using Snowmelt Runoff Model (SRM)[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 976-987.
- [ 37 ] 司振江, 孙雪梅, 吕纯波, 等. 黑龙江省2016年农田灌溉水有效利用系数测算分析与评价[J]. 黑龙江水利, 2017, 3(7): 1-6.

### Partition irrigation method based on BMA method and IT2FS theory

SHAO Dongguo<sup>1</sup>, ZOU Liangfeng<sup>1</sup>, GU Wenquan<sup>1</sup>, NONG Xizhi<sup>1</sup>, WANG He<sup>1</sup>, WANG Bai<sup>2</sup>  
 (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;  
 2. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The management of irrigation water in the Songnen Plain(SNP) is facing complex issues and challenges such as climate change, groundwater and wetland degradation. This study takes the Heping Irrigation District in the SNP as an example. Through the rainfall-groundwater dynamic monitoring field experiment from 2017 to 2019, the law of groundwater variations is revealed. Using the cluster analysis and spatial overlay analysis methods, the boundary of zoning irrigation based on groundwater depth is proposed. The Bayesian Model Averaging (BMA) method is applied to integrate the production simulation series of different irrigation scenarios with the AquaCrop and Jensen models, which improves the accuracy of the yield simulation under the conditions of subregional groundwater depth. Based on the Interval Type-2 Fuzzy Set (IT2FS) theory, while the risk preference factors are introduced to describe the risk attitude of decision-makers, and the district irrigation model suitable for different decision-makers risk preferences is proposed. The results show that the boundary of the groundwater depth in the study area is 1.5 m; the BMA method is beneficial to improve the accuracy of yield simulation, with the correlation coefficient between the simulated and measured yield exceeds 0.95. Additionally, compared with the current irrigation system, zoning irrigation can reduce the amount of irrigation by 15%-37.6%, and reduce the amount of groundwater extraction by more than 12%. This article provides a new basis and method for optimizing rice intensive production irrigation methods in shallow groundwater irrigation areas and protecting local river, lake and wetland ecosystems.

**Keywords:** groundwater dynamics; district irrigation; risk attitude; interval type-2 fuzzy set; Bayesian model averaging; optimization of irrigation scheduling

(责任编辑: 王冰伟)