

研究报告

# 现代建模与优化技术研究 ——在三江平原井灌水稻节水灌溉系统中的应用

付强<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学水电学院, 成都 610065; 2. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

**[摘要]** 将 SPAC 模型理论变相宏观应用于三江平原井灌水稻节水灌溉系统中, 将地下水、农用机井、晒水池、渠道、本田池、环境因子等纳入整体系统, 在各个子系统中综合运用现代建模与优化技术, 通过有关机理与理论研究, 建立相关的数学模型。对地下水、晒水池、渠道及水稻水分生产函数、水稻需水量、有效降雨等 6 个子系统进行建模与分析, 制定了非充分灌溉条件下优化灌溉制度。最后通过典型示范小区的优化设计, 将节水技术组装, 实现了增温 5~15℃, 节水 17.1%, 增产 700~1 000 kg/hm<sup>2</sup> 的目标。

**[关键词]** 建模; 优化; 三江平原; 井灌水稻; 节水灌溉; 系统

**[中图分类号]** S275.4 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1009-1742(2002)06-0044-12

## 1 引言

三江平原是我国重要的商品粮基地, 截至 1998 年底, 水稻面积近  $66.67 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 其中井灌约占 80%。随着水稻面积的扩大, 无节制、无计划超采地下水, 使地下水动态平衡遭到破坏, 每年出现大量的“吊泵”和“漏斗”现象。仅建三江管局 1996 年春就出现“吊泵”600 多个, 导致机井停止工作。地下水资源紧缺已成为今后发展的制约因素<sup>[1~3]</sup>。

运用系统工程与资源可持续利用的思想与研究方法, 创造性地将 SPAC (Soil-plant-atmosphere-continuum) 模型理论变相宏观应用于三江平原井灌水稻的节水灌溉生产系统实践中, 将地下水、农用机井、晒水池、渠道、本田池、环境因子纳入整体系统。试验研究选取富锦试区及建三江分局的创业农场作为试验基点, 以井灌水稻生产过程和水分运移分别作为时间和空间主线, 以各个子系统作为具体研究对象, 以现代建模与优化评价方法作为理论依据, 以节水、增温、增产、高效作为研究目标, 较系统地研究了该地区井灌水稻全生产过程的

系统运行。通过有关机理性分析, 理论与实践相结合, 建立各自相关的数学模型, 为该地区井灌水稻提供科学灌水的数量指标与理论依据。为今后三江平原发展井灌水稻和该地区农业及地下水资源的可持续发展提供科学依据<sup>[4]</sup>。

## 2 系统概述与建模

### 2.1 试区简况

富锦市位于三江平原腹地, 总面积为 8 277 km<sup>2</sup>, 占三江平原总面积的 7.6%, 平均海拔 60 m 左右, 区域内西南略高, 中部低洼平坦, 是一片广阔的冲积平原。课题组选定富锦市长安乡高家村作为主要试验基点, 试验区面积 666.67 hm<sup>2</sup>, 大部分为低湿耕地, 平均坡降 1/10 000~1/15 000。本研究以图 1、图 2 作为时空研究路线示意图, 逐一子系统进行研究。

### 2.2 地下水动态变化的人工神经网络模型 (BP-ANN)

研究地下水动态变化规律是研究工作的基础。本研究选用创业农场提供的 1985—2000 年月平均地下水埋深观测资料, 采用灰色系统理论 (年平均

**[收稿日期]** 2001-11-16; **修回日期** 2002-01-24

**[基金项目]** 中国博士后科学与四川青年基金资助项目 (432028)

**[作者简介]** 付强 (1973-), 男, 辽宁锦州市人, 博士后, 东北农业大学水利与建筑学院副教授

变化)<sup>[5,6]</sup>、随机理论 (月平均变化)<sup>[7~11]</sup>与人工神经网络理论, 分别建立该区地下水动态变化的预测模型。针对三江平原井灌水稻区地下水埋深信息零散, 缺乏系统性、实时性等问题, 更适合应用改进的 BP 网络进行地下水埋深预测。BP 模型计算步骤参见文献 [12~16]。

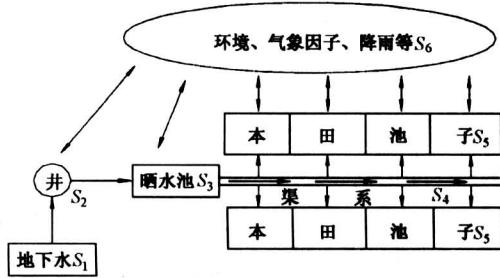


图 1 三江平原井灌水稻生产系统示意图

Fig.1 The sketch map of well irrigation rice system

应用自相关分析技术, 求解自相关函数 (式

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} x_t x_{t+k} - \frac{1}{n-k} \left( \sum_{t=1}^{n-k} x_t \right) \left( \sum_{t=1}^{n-k} x_{t+k} \right)}{\left[ \sum_{t=1}^{n-k} x_t^2 - \frac{1}{n-k} \left( \sum_{t=1}^{n-k} x_t \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \sum_{t=1}^{n-k} x_{t+k}^2 - \frac{1}{n-k} \left( \sum_{t=1}^{n-k} x_{t+k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$r_k (\alpha = 0.05) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad (2)$$

式中:  $r_k$ — $k$  阶自相关系数;  $n$ —样本数;  $x_t$ —地下水埋深/ $m$ ;  $x_{t+k}$ —延迟步数为  $k$  时的地下水埋深/ $m$ 。

表 1 创业农场地下水月份埋深预测数据表 (2001—2003 年)

Table 1 Forecasting the groundwater depth of Chuangye Farm (2001~2003)

年份	模 型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
2001	非平稳时序模型	7.779	7.662	7.414	8.039	10.772	13.889	14.339	13.411	11.781	10.082	8.764	8.304	10.19
	BP-ANN 模型	7.592	7.892	7.547	8.166	10.640	14.085	14.565	13.561	11.972	10.095	9.01	8.169	10.274
2002	非平稳时序模型	8.563	8.442	8.299	9.116	11.323	13.996	15.252	15.272	14.404	12.937	11.392	10.242	11.603
	BP-ANN 模型	8.674	8.742	8.416	9.245	11.650	14.163	15.121	15.374	14.316	12.859	11.462	10.304	11.694
2003	非平稳时序模型	9.554	8.952	8.746	9.637	11.632	14.031	15.705	16.531	16.639	16.014	14.779	13.155	12.95
	BP-ANN 模型	9.714	9.051	8.814	9.637	11.746	14.304	15.876	16.614	16.502	16.215	14.885	13.514	13.073

### 2.3 晒水池增温预测模型<sup>[17]</sup>

水稻生育的最低温度为 13℃, 最适宜温度为 25~30℃。适宜的灌溉水温是保证水稻高产、稳产的前提。抽出的井水温度一般为 5~6℃, 提高井水进田前的温度是关键。三江平原普遍采用的增温措施是修建晒水池。实践证明, 晒水池具有很好

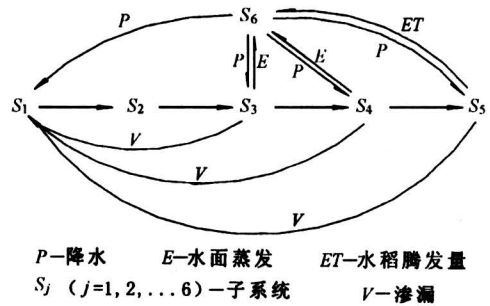


图 2 三江平原井灌水稻系统相互关联概化示意图

Fig.2 The relation among the well irrigation rice system

(1)), 达到显著水平 (-95% ~ +95% 容许限) (式 (2)), 得出每月的地下水埋深与前 1、4、9、12 个月的地下水埋深有关。为计算方便, 选取前 12 个月的地下水埋深资料作为输入, 当月资料作为输出。将 16 年资料的 192 个数据作为训练样本, 2000 年数据作为网络检测。

确定网络拓扑结构为 12:12:1, 当误差给定  $\epsilon=0.01$  时, 经 3 725 次训练, 网络精度达到要求。网络拟合精度相当高, 平均相对误差为 0.097%, 2000 年预测检验相对误差为 0.172%, 预测结果见表 1。

的增温功能, 基本能够保证水稻所需的人田水温。

从图 3 可知, 晒水池内井水温度的升高主要来自于太阳短波的有效净辐射, 而有效净辐射主要取决于空气中放热 (显热传导量)、蒸发的热损失 (潜热传导量)、用于水温增温的热量 (水层贮热量)、从池底传到地下的热量 (地中传导热)。计算

晒水池中水温上升度要知道平衡水温和温度上升率。温度上升率取决于两个要素（晒水池水深  $H$ 、饱和水蒸气压力温度曲线对气温的变化率  $\varphi$ ）和两个构造条件（晒水池的面积  $A$ 、流量  $q$ ）。

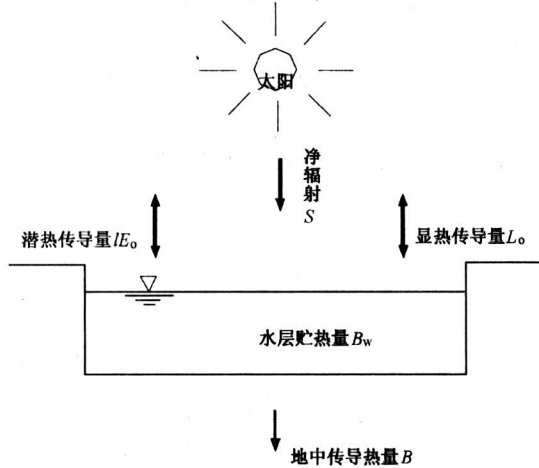


图3 作用在静态晒水池上的热平衡项

Fig.3 The heat balance item acting on sunning water pool in static state

晒水池内水温  $\theta_w$  预测模型是以某一段时间内（一般取 1 h），太阳的净辐射  $S$ 、气温  $\theta_a$ ，看成是一个不随时间  $t$  变化的量。这样，关于水温  $\theta_w$  随时间  $t$  变化通过求解微分方程，得到水温  $\theta_w$  随水深  $H$  和时间  $t$  变化的数学模型。

晒水池内水温的预测模型，即井水在晒水池内经过时间  $t$ ，从池中进入渠道的水的温度。

以水深为  $H$ 、底面积为单位面积的水柱为研究对象，则热平衡方程可用式（3）表示：

$$S = L_0 + lE_0 + B_w + B_s, \quad (3)$$

$$\text{平衡水温} \quad \theta_b = \theta_a + \frac{S - 2hd}{h(1 + 2\varphi)}, \quad (4)$$

令 
$$M = \frac{S - 2hd}{h(1 + 2\varphi)},$$

$$\text{则 } \theta_w = \theta_0 \cdot e^{\frac{h(1+2\varphi)}{c\rho H}t} + \theta_b \cdot (1 - e^{\frac{h(1+2\varphi)}{c\rho H}t}), \quad (5)$$

$$t = \frac{c\rho H}{h(1 + 2\varphi)} \cdot \ln \frac{\theta_0 - \theta_a - M}{\theta_w - \theta_a - M} = \frac{c\rho H}{h(1 + 2\varphi)} \cdot \ln \frac{\theta_0 - \theta_b}{\theta_w - \theta_b}, \quad (6)$$

水温上升度为

$$\theta_w - \theta_0 = (\theta_b - \theta_0)(1 - e^{\frac{h(1+2\varphi)}{c\rho H}t}), \quad (7)$$

井水注入池内的时间为  $t = \frac{AH}{q}$ ，则水温上升率模型为

$$\phi = (1 - e^{-\frac{h(1+2\varphi) \cdot A}{c\rho q}}). \quad (8)$$

式（8）右边项是晒水池性能的重要参数。它表示晒水池内水温上升程度的上升率  $\phi$  和水深无关，取决于  $A/q$ —单位流入量的水面面积。

式（3~8）中： $S$ —净辐射量（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $L_0$ —显热传导量（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $lE_0$ —潜热传导量（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $E_0$ —水面蒸发量（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $l$ —蒸发潜热（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $B_w$ —水层贮热量（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $B_s$ —地中传导量（ $J/m^2 \cdot s$ ）； $\theta_b$ —平衡水温（ $^{\circ}C$ ）； $\theta_a$ —气温（ $^{\circ}C$ ）； $d$ —饱和水蒸气压力差（ $mmHg$ ）； $\varphi$ —饱和水蒸气压力温度曲线对气温的变化率； $h$ —显热传导系数（ $J/m^2 \cdot ^{\circ}C \cdot s$ ）； $c\rho$ —水的容积热容量（ $J/^{\circ}C \cdot m^3$ ）； $A$ —晒水池的面积（ $m^2$ ）； $q$ —流量（ $m^3/s$ ）。

晒水池内温度上升度计算实例。富锦试区7月份气象资料及基本参数：气温为  $23.6^{\circ}C$ ；相对湿度为 0.89；云量为 0.47；风速为  $3.0 m/s$ ；晒水池面积为  $20\,000 m^2$ ；流量为  $0.1 m^3/s$ ；井水初始水温为  $6.0^{\circ}C$

先求出平衡水温为  $\theta_b = 24.13^{\circ}C$ ，然后将上述参数代入式（7）与（8）得：

$$\theta_w - \theta_0 = (24.13 - 6.0) \cdot$$

$$\left[ 1 - e^{-\frac{7.30 \times (1+2 \times 1.23) \cdot 2 \times 10^4}{1 \times 10^6 \cdot 0.1}} \right] = 7.07^{\circ}C.$$

晒水池内平均水温大约上升  $7.07^{\circ}C$ 。知道平衡水温就可以较容易求出晒水池内井水水温上升度。

以上计算适合于  $1 m$  深的晒水池水温上升的预测，对于水深  $>1 m$  的晒水池效果不佳。这是因为在深水晒水池中形成较强的水温分布层，不满足所使用的假设条件。深水晒水池中水温上升度确定的方法目前还没有成型的计算公式与数学模型。

### 2.4 输水渠系增温效果研究<sup>[2]</sup>

据文献 [2] 试验研究表明，晒水池增温效果一般提高水温  $2 \sim 6^{\circ}C$ 。若井水温度为  $6^{\circ}C$ ，经晒水池晒水后流入渠道的水温可达  $8 \sim 12^{\circ}C$ 。而保证水稻生长发育的最低下限水温为  $12 \sim 13^{\circ}C$  左右，最适宜水温为  $20 \sim 30^{\circ}C$ 。因此，除了晒水池增温及本田池内自身增温外，输水渠系同样具有提高水温的作用。

试验时间：1999年7月3日；试验地点：富锦市高家村东北农业大学试验田。

选择一条长约  $500 m$  的输水渠，每间隔  $50 m$  安放温度计一个，水银感应部分放置在水层中部。序号  $1 \sim 10$ ， $1' \sim 10'$  分别代表地块，标号  $\text{①} \sim \text{⑩}$  分

别代表温度计标号，a~h 代表池口子（见图 4）。

试验结果表明，渠道增温与渠道长度、渠道内水的流速及气温条件密切相关。

渠道长度与增温关系模型：

$$\theta_L = 0.000\ 31L^{1.582} \quad (11)$$

相关系数  $R = 0.982$ ， $t = 29.06 > t_{0.017} = 3.499$ ， $\theta_L$  为增温度数（℃）， $L$  为渠道长度（m）。

渠道内水流速与增温关系模型：

$$\theta_u = 65.475u^2 - 27.062u + 4.1531 \quad (12)$$

相关系数： $R^2 = 0.9626$ ， $t = 14.05 > t_{0.017} = 3.499$ ， $u$  为渠道内水流速（m/s）。

气温与渠道内井水增温关系模型：

$$\theta_T = 0.3207 + 0.07\Delta T \quad (13)$$

$R = 0.9846$ ， $t = 16.035 > t_{0.018} = 3.355$ ，显著。式中： $\theta_T$  为渠道内水增温量（℃）； $\Delta T$  为气温增温量（℃）

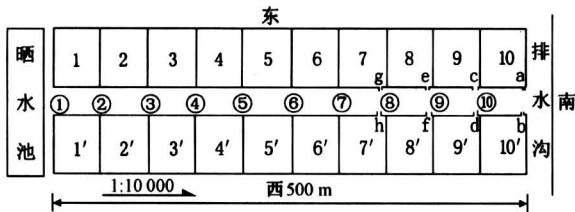


图 4 测试渠内水增温布置示意图

Fig.4 The sketch map of observing the water temperature

由于气温对渠道内水增温产生影响，渠道的长度、渠内水的流速、渠道的断面积对水增温均有影响，因此在确定渠内水增温时应全面加以考虑，才会得到较为满意的结果。

### 2.5 水分生产函数模型及敏感指数变化规律研究

在有限的水资源供给情况下，合理分配水稻各个生育阶段的灌水量，使作物达到相对最高产，即以最小的投入获得最大的产出。这是本文研究重点，即研究非充分灌溉下的井灌水稻的水分生产函数及优化灌溉制度。

2.5.1 常用的水分生产函数模型<sup>[18~20]</sup> 水稻水分生产函数（Water Production Function）是描述和揭示水稻产量与水分因子之间的因果关系。水稻水分生产函数的数学模型有动态模型和静态模型两大类<sup>[2]</sup>。通过试验研究，国际上曾提出过数十种作物水分生产函数的模型。通过对比分析，本研究选用 M.E. Jensen 模型（1968 年）：

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

式中： $\lambda_i$ —作物不同阶段缺水对产量的敏感指数（幂指数型）； $i$ —生育阶段划分序号； $Y_a$ —各试验条件下实际产量（kg/hm<sup>2</sup>）； $Y_m$ —常规灌溉下产量（kg/hm<sup>2</sup>）； $ET_a$ —各试验条件下实际蒸发蒸腾量（mm）； $ET_m$ —常规处理下蒸发蒸腾量（mm）； $n$ —模型的阶段总数。

2.5.2 敏感指数的计算<sup>[18,19]</sup> 不同地区、年份和作物的水分生产函数模型中的水分敏感指标是有差异的。为此，根据三江平原富锦试区 1998 年（丰水年）、1999 年（平水年）试验数据进行分析处理，按水稻生长的需水要求，选取分蘖、拔节孕穗、抽穗开花、乳熟四个生育阶段参与计算，由各试验不同阶段的实测蒸发蒸腾量及相应的产量，推求出 4 种模型中的敏感指数及敏感系数（见表 2）。

表 2 富锦试区井灌水稻 4 种水分生产函数模型中的敏感指数、系数

Table 2 The sensitivity index and coefficient of each well irrigation rice water production function about Fujin area

年 份	生育阶段	Jensen $\lambda_i$ 指数	Blank 模型 $A_i$ 系数	Stewart B <sub>i</sub> 模型	Singh 模型 C <sub>i</sub>
1998	①	0.167 4	-0.052	0.156 2	-0.896 3
	②	0.353 7	0.308 7	0.345 7	0.598 5
	③	0.605 9	0.564 1	0.514 6	1.352 4
	④	0.130 5	0.092	0.130 9	-1.057 2
	相关系数 R	0.986 2	-0.972 3	0.975 4	-0.902 5
1999	①	0.127 2	0.069 5	0.121 2	-1.051 6
	②	0.296 4	0.325 3	0.327 3	0.323 0
	③	0.468 0	0.512 3	0.457 9	1.803 4
	④	0.116 3	0.105 7	0.1330	-0.125 4
	相关系数 R	0.996 4	-0.998 7	0.972 0	-0.822 2

表 2 中，Jensen 模型中的  $\lambda$  值，均是第③阶段最高（其他 3 个模型亦如此），表明水稻在抽穗开花期对缺水最敏感。缺水后各阶段敏感顺序与水稻的水分生理特性以及灌溉的实践经验是一致的，而且模型的相关系数均在 0.98 以上。三江平原井灌水稻水分生产函数数学模型为：

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left( \frac{ET_{(1)}}{ET_{m(1)}} \right)^{0.1473} \cdot \left( \frac{ET_{(2)}}{ET_{m(2)}} \right)^{0.3251} \cdot \left( \frac{ET_{(3)}}{ET_{m(3)}} \right)^{0.5370} \cdot \left( \frac{ET_{(4)}}{ET_{m(4)}} \right)^{0.1234} \quad (14)$$

式中： $ET_{(i)}$ —各试验条件下，第  $i$  生育阶段水稻实际蒸发蒸腾量 (mm)； $ET_{m(i)}$ —常规处理条件下的水稻蒸发蒸腾量 (mm)； $i=1, 2, 3, 4$ 。

2.5.3 Jensen 模型敏感指数在全生育期内变化规律 在水稻的返青、分蘖、拔节孕穗、抽穗开花、乳熟、黄熟 6 个生育阶段中，返青期泡田余水已经充足够用，黄熟期全期干旱也可以高产；其余四个阶段，会因为缺水造成减产，并且各阶段缺水对减产敏感程度不同。对于三江平原地区， $\lambda$  值高峰出现在抽穗开花期，此阶段为产量对缺水的敏感期，其次为拔节孕穗期，再次为分蘖期，乳熟期为最不敏感期，结果是合理的。对于三江平原井灌水稻，抽穗开花阶段的气温、 $ET_m$  强度 (1999 年分别为  $25.77^\circ\text{C}$ 、 $12.64 \text{ mm/d}$ ) 高于拔节孕穗阶段 (1999 年分别为  $20.44^\circ\text{C}$ 、 $8.91 \text{ mm/d}$ )， $ET_m$  强度大，在  $ET_a/ET_m$  相同的条件下， $ET_m - ET_a$  的差值大，即亏水的绝对值高，因而气象条件对减产的影响较大，因此  $\lambda$  值高峰出现在抽穗开花期。另外最低值在乳熟期而不在分蘖期，是因为其乳熟期气温、 $ET_m$  强度显著低于分蘖期的缘故。绘制  $\lambda$  在全生育期内变化过程线，以便可以用来计算任何时间的  $\lambda$  值。见图 5。可以通过图 5 进行插值求得所需要的敏感指数  $\lambda$  值。同时，也可以建立  $\lambda$  的平均值  $\bar{\lambda}$  与插秧后历时的关系，根据具体情况建立数学模型为：

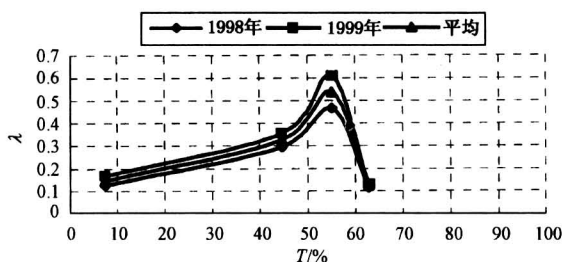


图 5 1998、1999 年三江平原富锦试区井灌水稻  $\lambda$  值在全生育期变化过程线

注：T 为插秧后天数占本田全生育期天数的百分比 (%)

Fig.5 The varied curve of  $\lambda$  during the whole phase of well irrigation rice in Fujin Area in Sanjiang Plain (1998, 1999)

$$\begin{cases} \bar{\lambda} = 0.0048T + 0.1117 & 7.45 \leq T \leq 44.7 \\ \bar{\lambda} = -0.0042T^2 + 0.4351T - 10.83 & 44.7 \leq T \leq 62.8 \\ \bar{\lambda} = 0.1234 & 62.8 \leq T \leq 84 \end{cases}$$

## 2.6 降雨预测的季节性时序模型<sup>[21,22]</sup>

降水 (主要指雨水) 是补充水稻需水的重要方面。降水资料选自富锦市气象台观测资料。(国际气象网站点) 资料年限为 1981—1999 年的月平均降雨资料。

通过对实际数据分析，月平均降雨序列具有明显的以年 (12 个月) 为周期的周期变化规律，而没有其他明显的趋势项，故可以对原序列进行季节差分： $W_t = \nabla Y_t = Y_t - Y_{t-12} = (1 - B^{12}) Y_t$ 。 $Y_t$ —降水时间序列 (mm)； $W_t$ —差分后的降水时间序列 (mm)； $Y_{t-12}$ —前一年同一月份的降水 (mm)。

得出差分后的序列  $W_t$ ，对序列  $W_t$  进行标准化处理。 $x_t = (W_t - \bar{W}_t) / \sigma_w$  ( $\bar{W}_t = -1.2101$ ， $\sigma_w = 53.33$ )。得出  $x_t$  序列的降雨预测模型为： $x_t = a_t - \theta_{12} a_{t-12} = a_t - 0.7157 a_{t-12}$ 。经过 AIC 检验得知， $AIC(0, 11) > AIC(0, 13) > AIC(12)$ 。故模型为 MA (12) (12 阶滑动平均模型) 是合理的。计算统计量  $Q = 27.3136 < x_{0.05}^2 = 28.869$ ，故残差序列  $a_t$  通过独立性检验。残差序列  $a_t$  的均值  $\bar{a}_t = 0.0196$ ，方差  $\sigma^2(a_t) = 0.6084$ ，则降雨预测模型为：

$$(1 - B^{12}) Y_t = Y_t - Y_{t-12} = W_t = x_t \cdot \sigma_w + \bar{W} = -1.2101 \times (a_t - 0.7157 a_{t-12}) + 53.53 \quad (15)$$

预测 2000 年富锦试区月平均降雨及实测值比较见表 3。预测误差在  $\pm 10\%$  以内。平均相对误差为  $5.05\%$ ，精度满足要求。

## 2.7 三江平原井灌水稻需水量建模与分析

2.7.1 基于偏最小二乘回归的水稻需水量建模与分析<sup>[23,24]</sup> 利用传统的最小二乘法建立起来的需水量与气象因子多元回归方程，经常出现模型误差较大、稳健性差<sup>[23]</sup>。为此，本文采用一种新的回归技术——偏最小二乘回归 (Partial least-squares regression, PLS)，以提高模型精度与稳健性。

设井灌水稻不同生育期阶段日平均的腾发量  $ET(y)$ 、气温  $T(x_1)$ 、日照时数  $h(x_2)$ 、风速  $u(x_3)$ 、水面蒸发  $E(x_4)$ 、饱和差  $d(x_5)$ 。

表 3 降雨季节性时序模型月份预测值与实测值比较表

Table 3 The contrast table between practice value and forecasting value based on rainfall time series model

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
实测值/mm·d <sup>-1</sup>	4.35	0.3	7.26	28.52	53.25	43.28	105.46	130.23	99.67	33.60	6.70	3.52
预测值/mm·d <sup>-1</sup>	4.174	0.316	7.091	26.518	50.628	44.698	108.531	136.149	95.292	35.646	6.198	3.224
相对误差/%	-3.91	+5.3	-2.2	-7.0	-4.92	+3.28	+2.91	+4.55	-4.39	+6.1	-7.46	-8.52

通过提取第一个成分  $t_1 = 0.4865E_{01} + 0.4378E_{02} + 0.2138E_{03} + 0.5132E_{04} + 0.4587E_{05}$  及提取第二个成分  $t_2 = 0.41E_{01} - 0.3996E_{02} - 0.7398E_{03} + 0.3478E_{04} + 0.0621E_{05}$ ;  $E_{0,i} = 1, 2, \dots, 5$ —自变量的标准化序列, 得到回归模型为

$$\hat{y} = 0.2949x_1 + 0.2677x_2 + 0.2390x_3 + 0.3195x_4 + 0.2830x_5 - 5.5782. \quad (16)$$

2.7.2 井灌水稻需水量预测模型 基本资料: 富锦试区 1985—1999 年共计 15 年同期水稻需水量及气象观测资料。

井灌水稻需水量预测模型选用自激励门限自回归 SETAR 模型 (Self-Exciting Threshold Auto-Regressive Model)<sup>[25,26]</sup>。利用 SETAR (1,  $d$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ) 模型能够描述具有极限点和极限环的非线性系统及刻画幅频相依等非线性现象的特点。对三江平原井灌水稻各生育阶段需水量的长系列资料进行了分析, 建立了 SETAR (2, 6, 3, 3) 模型 (见式 (17)), 采用 9 个参数有效地描述了水稻需水量各个生育期在多种气象及其他影响因子的作用下的周期变化的非线性复杂系统。各参数优化值见表 4, 模型拟合见图 6。

$$x(t) = \begin{cases} arer1 + \varphi(1,1)(x(t-1) - arer1) + \varphi(1,2)(x(t-2) - arer1) + \varphi(1,3)(x(t-3) - arer1)x(t-6) \leq r \\ arer2 + \varphi(2,1)(x(t-1) - arer2) + \varphi(2,2)(x(t-2) - arer2) + \varphi(2,3)(x(t-3) - arer2)x(t-6) > r \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $aver1$ : AR( $n_1$ ) 模型的均值;  $arer2$ : AR ( $n_2$ ) 模型的均值;  $\varphi(1, 1)$ ,  $\varphi(1, 2)$ ,  $\varphi(1, 3)$  分别为 AR ( $n_1$ ) 模型自回归系数;  $\varphi(2, 1)$ ,  $\varphi(2, 2)$ ,  $\varphi(2, 3)$  分别为 AR ( $n_2$ ) 模型自回归系数;  $r$  门限值  $r = 7.55$ 。

自激励门限自回归模型通过优化模型参数 (门限值、门限区间、延迟步数、自回归系数等), 建立起各生育阶段日平均需水量的门限自回归模型。利用需水量的延迟 1 步, 2 步与 3 步的相依特征信息, 由于门限的控制作用, 可以有效地描述井灌水

表 4 加速遗传算法优化 SETAR 模型参数表 ( $r = 7.55$ ,  $d = 6$ ,  $l = 2$ )

Table 4 The optimum parameters of SETAR model based on RAGA. ( $r = 7.55$ ,  $d = 6$ ,  $l = 2$ )

	$\varphi(1, 1)$	$\varphi(1, 2)$	$\varphi(1, 3)$	$arer1$
AR ( $n_1$ )	-0.365 7	-0.526 8	0.290 6	5.646 6
	$\varphi(2, 1)$	$\varphi(2, 2)$	$\varphi(2, 3)$	$aver2$
AR ( $n_2$ )	-0.373 6	-0.278 6	0.175 8	10.092 2

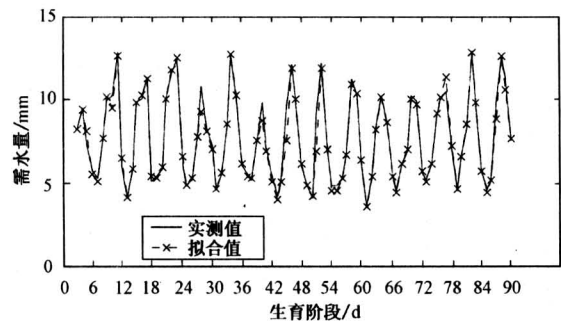


图 6 门限自回归模型拟合需水量曲线图

Fig.6 The water requirement curve fitted by SETAR model

稻需水量各个生育阶段日平均需水量的非线性动态系统。预测精度较高 (表 5), 表明 SETAR 模型的性能是稳健的, 可以在灌区用水决策中应用。

### 2.8 三江平原井灌水稻非充分灌溉下灌溉制度优化的遗传动态规划

非充分灌溉下推求最优灌溉制度, 即一定的总灌溉水量在生长期内的最优分配问题。也就是在一定的总灌溉水量控制条件下, 确定灌水次数、灌水日期、灌水定额及土壤水分的最优组合。

表5 井灌水稻需水量2000年预测值与实测值对比表

Table 5 The contrast table of water requirement of well irrigation rice between practice value and forecast value in 2000

模型		插秧期	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	灌浆成熟期	平均值
多维自回归模型 ARV	实测值/mm·d <sup>-1</sup>	4.85	5.98	9.72	10.15	11.04	6.12	
	预测值/mm·d <sup>-1</sup>	4.715 9	5.635 1	8.639 0	10.580 9	10.496 1	6.465 8	
	相对误差/%	-2.76	-5.76	-11.12	+4.25	-4.93	+5.65	5.75
SETAR	预测值/mm·d <sup>-1</sup>	4.82	6.17	9.85	9.75	10.46	5.96	
	相对误差/%	-0.62	+3.18	+1.34	-3.94	-5.25	-2.61	2.82
BP-ANN	预测值/mm·d <sup>-1</sup>	4.79	5.77	10.25	10.72	11.56	5.88	
	相对误差/%	-1.24	-3.51	+5.45	+5.62	+4.71	-3.92	4.08

非充分灌溉下节水灌溉制度优化设计一般采用动态规划法。本文采用实码加速遗传算法 (Real coding based accelerating genetic algorithm, RAGA) 与动态规划 (Dynamic planning, DP) 相结合。

2.8.1 建立动态规划模型<sup>[18,19,27]</sup> 有关资料见表6。表6中生育阶段编号为: ①返青与分蘖期; ②拔节孕穗期; ③抽穗开花期; ④乳熟期。黄熟期由于不需灌水, 故可以不参加计算。

表6 富锦试区井灌水稻非充分灌溉下  
优化灌溉制度求解原始数据

Table 6 The original data of calculating the optimum irrigation scheduling under non-sufficient irrigation in Fujin area.

年份	项目	生育阶段			
		①	②	③	④
1998 (丰水年)	$D_i/d$	45	13	7	18
	$(ET_m)_i/mm$	316.35	108.68	43.05	110.34
	$P_i/mm$	97	106.5	49.5	52.6
	$\bar{K}_i/mm$	3.56	3.81	3.06	3.15
	$\overline{ET}_i/mm$	6.76	8.17	6.01	5.94
	$D_i/d$	42	10	7	20
1999 (平水年)	$(ET_m)_i/mm$	283.5	81.0	44.78	117.5
	$P_i/mm$	49	84.8	37.4	35.7
	$\bar{K}_i/mm$	3.33	3.70	3.10	3.30
	$ET_i/mm$	6.52	6.59	5.37	4.36
	$(H_{max})_i/mm$	40	50	50	40
	$(H_{min})_i/mm$	-30	-50	-60	-65
$K_0=0.15 \quad \alpha=200 \quad H=0.4 \text{ m}$					

确定目标函数: 采用 Jensen 提出的在供水不

足条件下, 水量和农作物实际产量的连乘模型, 目标函数为单位面积的实际产量  $Y_a$  与最高产量  $Y_m$  的比值最大, 即:

$$F = \max \left( \frac{Y_a}{Y_m} \right) = \max \prod_{i=1}^N \left( \frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} = \left( \frac{ET_{(1)}}{ET_{m(1)}} \right)^{0.1473} \cdot \left( \frac{ET_{(2)}}{ET_{m(2)}} \right)^{0.3251} \cdot \left( \frac{ET_{(3)}}{ET_{m(3)}} \right)^{0.5370} \cdot \left( \frac{ET_{(4)}}{ET_{m(4)}} \right)^{0.1234} \quad (18)$$

阶段变量: 根据水稻生长过程, 将其全生育期划分  $N$  个不等长的生长阶段, 阶段变量为  $n=1, 2, \dots, N$ , 其编号与阶段初编号一致。

决策变量: 决策变量为各生长阶段的实际灌水量  $m_i$  及实际腾发量  $(ET_a)_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ 。

状态变量: 状态变量为各阶段初可用于分配的灌溉水量  $q_i$  及初始田面蓄水深度  $h_i$ 。

系统方程: 第一是水量分配方程, 若对第  $i$  个生长阶段采用决策  $m_i$  时, 可表示为:

$$q_{i+1} = q_i - m_i, \quad (19)$$

式中:  $q_i$ ,  $q_{i+1}$ —分别为第  $i$  及第  $i+1$  阶段初系统可用于分配的水量 (mm) (换算成单位面积的水深, 下同);  $m_i$ —第  $i$  阶段的灌水量 (mm)。

第二是田间水量平衡方程, 即

$$h_{i+1} = h_i + P_i + m_i - (ET_a)_i - C_i - K_i, \quad (20)$$

式中:  $h_i$ ,  $h_{i+1}$ —分别为第  $i$  及第  $i+1$  阶段初田面土层深度 (mm);  $C_i$ —第  $i$  阶段排水量 (mm);  $K_i$ —第  $i$  阶段稻田渗漏量 (mm)。

约束条件: a. 决策约束  $0 \leq m_i \leq q_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $\sum_{i=1}^N m_i = Q$   $(ET_{min})_i \leq (ET_a)_i \leq$

$(ET_m)_i, i=1, 2, \dots, N$ 。Q—全生长期单位面积上可供分配的水量 (mm);  $(ET_m)$ 、 $(ET_{min})_i$ —分别为第  $i$  阶段的最大及最小蒸发蒸腾量 (mm);  
**b.** 田面水层  $h_i$  的约束  $(H_{min})_i \leq h_i \leq (H_{max})_i$ ,  $(H_{max})_i$ 、 $(H_{min})_i$ —第  $i$  阶段田面水深的上下限 (mm)。

初始条件：**a.** 初始田面水深  $h_1 = h_0$ ，式中： $h_0$ —插秧后稻田保持的水深，一般取 20 mm；**b.** 第一阶段可用于分配的水量为水稻全生长期可用于分配的水量，即： $q_1 = Q$

2.8.2 RAGA 参数寻优

$a_k$ —采用 MATLAB5.3 编程中各个参数的统一表达。 $k=1, 2, \dots, M$ ， $M$  为待优化的参数数目。令：

$$\begin{cases} q_2 = a_1 \\ q_3 = a_2 \\ q_4 = a_3 \end{cases} \begin{cases} m_1 = a_4 \\ m_2 = a_5 \\ m_3 = a_6 \\ m_4 = a_7 \end{cases} \begin{cases} (ET_a)_1 = a_8 \\ (ET_a)_2 = a_9 \\ (ET_a)_3 = a_{10} \\ (ET_a)_4 = a_{11} \end{cases} \begin{cases} h_2 = a_{12} \\ h_3 = a_{13} \\ h_4 = a_{14} \\ h_5 = a_{15} \end{cases}$$

Q—总供水量 (mm)， $d_i$ —各生育阶段灌溉天数 (d)， $z$ —加速寻优次数。

确定待优化参数的初始取值区间，见表 7。

表 7 RAGA 寻优时待优化参数的初始取值区间

Table 7 The originally varied section of each parameter based on RAGA

参数	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
下限	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-50	-60	-65	-65
上限	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	283.5	81.0	44.78	117.5	50	50	40	40

选定父代初始种群规模为  $n=400$ ，交叉概率  $p_c=0.80$ ，变异概率  $p_m=0.80$ ，优秀个体数目选定为 20 个， $\alpha=0.05$ ，加速运行，得出在不同供

水量下目标函数 (相对产量) 的最优值及其相应的参数取值。详见表 8。灌水量与相对产量关系见图 7。

表 8 RAGA-DP 寻优计算结果表

Table 8 The result of seeking optimization based on RAGA-DP

年份	Q	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	mm
1998	370	100.81	61.30	50.12	269.19	39.52	11.17	50.12	298.96	108.68	43.05	110.34	-49.88	
1999	440	150.08	102.35	83.28	289.92	47.73	19.06	83.28	283.5	81.00	44.78	117.50	-49.68	
	F	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$z$	
1998	1.00	-43.24	-31.90	-65.00	37	8	2	8	137.11	30.69	6.28	25.48	13	
1999	1.00	-28.49	-26.43	-64.99	36	8	3	12	124.74	29.69	9.46	39.82	30	

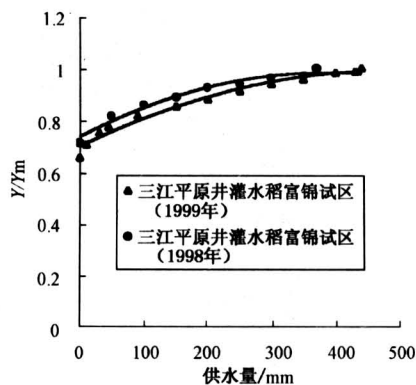


图 7 每公顷供水量与相对产量 ( $Y/Y_m$ ) 的关系图  
 Fig.7 The relation between water supply per  $hm^2$  and relatively yield ( $Y/Y_m$ )

灌溉制度优化不仅提供了水稻产量随供水量而变化的过程，也指出了某种年型条件下为达到丰产而需要的灌溉定额，从而避免水量浪费。1999 年 (平水年) 三江平原富锦试区井灌水稻本田期净灌溉定额只需要  $4\ 400\ m^3/hm^2$ 。

由于优化灌溉制度按各阶段水量对产量的综合影响确定，能以较小的灌溉定额取得高产。例如 1999 年富锦试区生育期内有效降雨量为  $2\ 069\ m^3/hm^2$ ，满足丰产基本要求时需净灌溉定额为  $4\ 400\ m^3/hm^2$ ，有效降雨与灌溉合计稻田供水量为  $6\ 469\ m^3/hm^2$ 。而当地节水灌溉经验 (浅、湿、干结合间歇灌溉) 丰产时田间供水量约为  $7\ 800\ m^3/hm^2$ 。可见，优化灌溉可以节水  $1\ 331\ m^3/hm^2$ ，即节水



17.1%。三江平原传统的灌溉方式灌溉定额高者可达  $15\,000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，低者为  $7\,500\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，平均  $11\,250\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。由于近年来推广节水灌溉（充分灌溉条件下），采用水稻间歇灌溉、浅-湿-干-晒田相结合等控制水层等节水灌溉措施，使灌溉定额大大降低，平均节水 30.7%。而采用非充分灌溉比充分灌溉基础上还节水 17.1%，可见节水效率及相应的经济效益是可观的。确定三江平原井灌水稻非充分灌溉下优化灌溉制度见表 9。

表 9 三江平原井灌水稻非充分灌溉优化制度表  
Table 9 The optimum irrigation scheduling under non-sufficient irrigation of well irrigation rice in Sanjiang Plain

年份	可供水量 /mm	各生育阶段灌水量 /mm				相对产量
		①	②	③	④	
0						0.7143
50		5.61	22.68	4.89	16.83	0.8160
100		30.21	16.03	23.98	29.79	0.8583
150		60.47	29.76	28.04	31.73	0.8878
1998	200	103.59	17.77	37.45	41.19	0.9264
	250	134.32	43.01	55.67	17.00	0.9377
	300	194.09	35.79	31.31	38.80	0.9640
	350	241.44	61.05	26.90	20.62	0.9690
	370	269.19	39.52	11.17	50.12	1.0000
0						0.6528
45		15.17	12.61	9.76	7.46	0.7741
90		31.34	8.57	19.24	30.86	0.8169
150		61.70	26.69	22.88	38.74	0.8521
1999	200	81.50	26.42	41.16	50.92	0.8810
	250	100.25	59.27	13.98	76.50	0.9121
	300	141.47	47.55	38.89	72.09	0.9378
	350	210.47	19.25	61.78	58.49	0.9556
	400	238.41	42.41	54.47	64.70	0.9806
	440	289.92	47.73	19.06	83.28	1.0000

近年来，随着井灌水稻面积的盲目扩大，三江平原地下水资源出现供水紧张，优化灌溉制度的指导意义更加突出。当水量不足时，大多是凭经验办事，灌“关键水”，优化灌溉则可以指导在不同的缺水程度下如何在时间上定量分配水量，以使相对产量最大，减产损失最小，并且可以直接估计减产损失。在干旱年份，优化灌溉制度的节水效果更佳。根据优化灌溉制度，可对三江平原适宜发展井灌水稻规模做出匡算，三江平原地下水储量总计  $54.3 \times 10^8\text{ m}^3$ ，若使灌溉水利用系数达到 0.9，同

时采用非充分灌溉，最大可发展水田面积为  $(93.3 \sim 95) \times 10^4\text{ hm}^2$ 。若三江平原井灌水稻面积按稳定在  $60 \times 10^4\text{ hm}^2$  计算，可以节约地下水资源  $(19.38 \sim 20.37) \times 10^8\text{ m}^3$ ，综合效益相当显著。

### 3 基于 RAGA 的水稻优化灌溉量的参数投影寻踪评价模型

实践证明，不同的灌溉水量，对水稻的产量、节水效果是不同的。要追求综合效益最好，须要对不同灌溉方式进行综合评价，以确定综合最优灌溉模式。本文提出了基于 RAGA 的投影寻踪评价模型 (PPE)，通过优化水稻生育阶段的状态变量指标的最佳投影方向，得到各样本的投影值，从而对各灌溉模式进行评价，克服了二阶模糊综合评判中权重赋值的人为干扰，取得满意效果。

#### 3.1 投影寻踪评价模型 (PPE)<sup>[28,29]</sup>

投影寻踪分类模型 (Projection pursuit evaluation model, PPE)，是一种新兴的高维降维技术。其通过构造投影指标函数  $Q(a)$ ，把  $p$  维数据按照投影方向，转化成低维子空间的投影值  $z(i)$ ：

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i,j) (i = 1 \sim n),$$

然后根据  $\{z(i) | i = 1 \sim n\}$  的一维散布图进行分类与评价。投影指标函数可以表达成： $Q(a) = S_z D_z$ ，式中， $S_z$  为投影值  $z(i)$  的标准差， $D_z$  为投影值  $z(i)$  的局部密度。当各指标值的样本集给定时，投影指标函数  $Q(a)$  只随着投影方向  $a$  的变化而变化，因此可以通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向，即： $\max: Q(a) = S_z \cdot D_z$ ，约束条件： $s. t: \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$ 。

这是一个以  $\{a(j) | j = 1 \sim p\}$  为优化变量的复杂非线性优化问题，用传统的优化方法处理较难。本文应用基于 RAGA 来解决其高维全局寻优问题。通过最佳投影方向  $a^*$  求得各样本点的投影值  $z^*(i)$ 。若按  $z^*(i)$  值从大到小排序，则可以将样本从优到劣进行排序。

#### 3.2 应用实例

借助文献 [20] 的数据，见表 10。水分对水稻生育产生重大影响的主要时期是分蘖到幼穗分化和灌浆成熟（乳熟前后期）两个阶段。本文主要对分蘖到幼穗分化期生育特征进行分析。

试验品种为黄金光，5月27日插秧，行穴距为  $30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。土壤为中等肥力条件的轻度盐

渍化草甸土，氮肥用量为每亩硫酸铵 55 kg，前后比例为 8：2，藁肥分三次施入<sup>[20]</sup>。

表 10 分蘖——幼穗分化期的状态变量<sup>[20]</sup>

Table 10 The state parameters  $x_i$  during tillering stage to seeding differentiation stage

生物量 (g/m <sup>2</sup> )	根活跃面积 (m <sup>2</sup> /穴)	生长量 [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	相对生长率 [g/(g·d)]	净同化率 [g/(m <sup>2</sup> ·d)]
A 245.50	1.572	11.730	0.0313	4.509
B 387.40	1.694	20.410	0.0914	6.500
C 478.50	1.927	21.966	0.0873	6.645
D 321.77	2.462	13.776	0.0609	4.054

叶面积 指数	有效分蘖率 (%)	有效茎数 (株/穴)	光能利用率 (%)	消光系数
A 3.07	81.0	14.1	0.742	-0.779
B 3.94	84.5	15.8	1.291	-0.730
C 5.11	82.7	16.7	1.390	-0.557
D 3.85	78.7	14.4	0.871	-0.750

表 (10) 中：A 灌溉模式表示水稻各生育阶段都得到充分供水的淹灌；B、C、D 均为浅湿间歇灌溉（非充分灌溉）。生产实践证明，C 灌溉模式单产为 9 103.5 kg/hm<sup>2</sup>，比其他模式高，按需水量计算的生产效率也较高，为 14.58 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。而 D 模式为 14.45 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)，B 模式为 13.11 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)，A 模式为 12.12 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)<sup>[1][2]</sup>。经生产实践证明，通过基于 RAGA 建立的 PPE 模型准确地衡量出最优的灌溉模式。为了综合评价 A、B、C、D 四种灌溉模式的优劣，选定了 10 个变量指标 ( $x_1 \sim x_{10}$ )，即使投影指标

函数  $Q(a)$  为最大，有 10 个需要同时优化的参数。实质上属于多维参数寻优的问题。寻优 20 次得出最大投影指标值为：0.657 8，各个状态变量的最佳投影方向  $a^* = (0.320 3, 0.016 2, 0.377 9, 0.330 6, 0.377 3, 0.284 3, 0.240 2, 0.363 2, 0.379 5, 0.297 0)$ ，求得各种灌溉模式的投影值  $z^*(j) = (0.161 5, 2.190 5, 2.879 7, 0.624 4)$ 。将  $z^*(j)$  从大到小排列，可得各种灌溉模式的优劣排序，即 C 模式 > B 模式 > D 模式 > A 模式。与生产实践所测试的结果相一致。

#### 4 综合优化节水系统典型小区设计

通过前面的研究，可以将各个子系统联合起来，形成综合大系统，即建立系统节水增温综合优化小区，为今后的进一步深入研究提供理论依据。并期望能解决生产实际问题，达到节约地下水资源，有效提高井水温度，增加粮食产量的目标。根据前述理论分析，设计晒水池，并在晒水池内设置阻水物，在出水口处设计组合式晒水方案，以充分提高水温，见图 8、图 9。

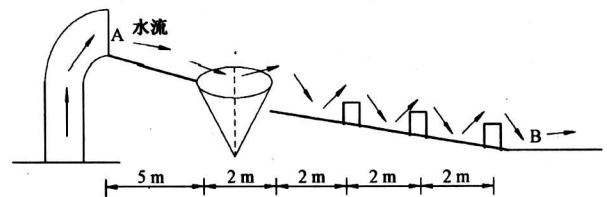


图 8 组合式增温示意图

Fig.8 The sketch map of assembled form to increasing the water temperature

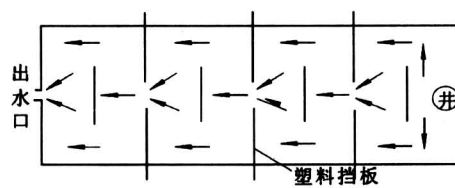
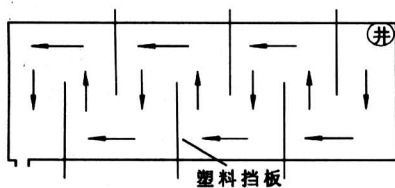


图 9 晒水池设置阻水物的方式示意图

Fig.9 The sketch map of setting an object to hold up water in sunning water pool

本研究拟设定典型试验小区，小区内包含各个子系统，将各种优化措施有机结合与组装，并对其与其他试验区对照，进行分析与评价，从而实现系统小区优化，见图 10，正常田采用正常灌水方法，

晒水池无增温措施，渠道无防渗措施。而典型区采用组合式增温措施，渠道铺设塑料薄膜，并采用迂回灌溉，对比二者水温差异。典型区灌溉流程如图 10。

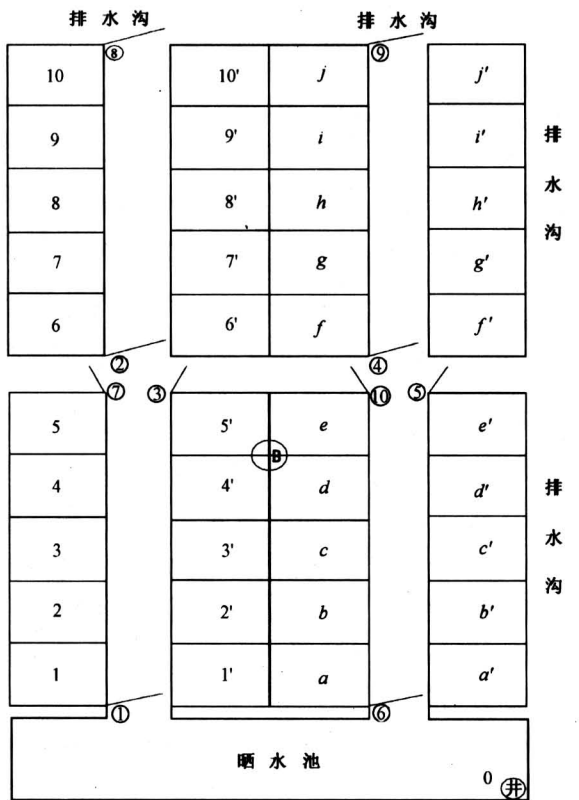


图 10 富锦试区井灌水稻节水系统综合优化典型小区平面布置示意图

Fig. 10 The sketch map of typical section plan which is optimized system about well irrigation rice

I : 0

1 (开) → 2 (开)  $\xrightarrow{3, 7 \text{ 关闭}}$  8 (关闭) → 依次灌 10、10'、9、9'、8、8'、7、7'、6、6' 池子。  
 6 (开) → 4 (开)  $\xrightarrow{5, 10 \text{ 关闭}}$  9 (关闭) 依次灌 j、j'、i、i'、h、h'、g、g'、f、f' 池子。

II : 0 → 1 (开)  $\xrightarrow{2, 7 \text{ 关闭}}$  3 (开)  $\xrightarrow{4.5 \text{ 关闭}}$  10 (开) → 6 (关闭) → 依次灌 a、a'、b、b'、c、c'、d、d'、e、e' 池子。

III : 0 → 6 (开)  $\xrightarrow{4.5 \text{ 关闭}}$  10 (开)  $\xrightarrow{2, 7 \text{ 关闭}}$  3 (开) → 1 (关闭) → 依次灌 1、1'、2、2'、3'、4、4'、5、5' 池子。

铺设防渗塑料薄膜需要一次性投入资金。由于防渗措施，可省水 260 1.6 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，每年节省燃料费 103 4.22 元。本试验区渠道长度总计 1 900 m，需铺设塑料薄膜 3 857 m<sup>2</sup>，一次性总投资为 8 525 元。塑料薄膜预计使用 15 年，平均年投资 568.33 元。由于防渗，提高了水温，平均增温 10

℃，促进了水稻的生长，增产 800 kg/hm<sup>2</sup>。水稻价格按 1.3 元/kg 计算，增收 10 400 元，则总计获得效益 11 434.22 元，大于总投资 8 525 元。因此一年即可收回投资成本，效益显著，从而实现节水、增温、增产的目标。

### 5 结语

人工神经网络模型预测 2001~2003 年地下水埋深动态变化规律表明，三江平原井灌水稻区地下水水位如果仍然按照目前地下水开采规模继续下去，地下水水位将逐年持续下降，降幅为年均 1.5 m。这势必造成地下水动态平衡的更加严重破坏，制约农业的发展。发展节水灌溉成为必然。通过对晒水池增温机理研究，建立了平衡水温模型及其水温预测模型，找出影响井水增温的主要因素，确定了适宜的晒水池规模，为保证适温灌溉提供了理论依据，同时确定了晒水池及渠道的渗漏规律，为合理的水资源利用模式及确定节水型灌溉制度提供数量指标。通过本田子系统研究，建立了降雨、水稻需水量及水分生产函数模型，推求出在设计典型年的水稻优化灌溉制度，并对不同灌水方式做以评价。最后通过节水典型小区的设计实现节水、增温、增产的目标。

致谢：本研究得到四川大学水电学院梁川教授、东北农业大学工程学院杨广林教授的指导与帮助，在此表示衷心感谢！

### 参考文献

- [1] 付强. 三江平原井灌水稻田间生产过程节水技术组装与综合优化研究[D]. 哈尔滨, 东北农业大学, 2000
- [2] 付强, 王志良, 梁川. 井灌水稻区渠道增温效果与其影响因素关系试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 13~16
- [3] 付强, 杨广林. 三江平原井灌水稻节水技术组装与综合优化研究(一)[A]. 2000 年中国博士后学术大会论文集(土木与建筑分册)[C]. 北京: 科学出版社, 2000: 400~405.
- [4] 付强. 三江平原井灌水稻节水技术组装与综合优化研究[N]. 科学时报, 2001-10-11: (2)
- [5] 付强, 王立坤, 梁川. GM(1,1) 灰色模型在预测地下水水位动态变化中的应用[J]. 农机化研究, 2001, (4): 79~82
- [6] 傅丽. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992. 32~36

- [7] 李杰. 开采区地下水位随机模型预测[J]. 水文水资源, 1999, 20(4): 12, 7~9
- [8] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988
- [9] 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用(上册)[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- [10] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理[M]. 北京: 气象出版社, 1998. 32~37
- [11] 杜金观, 项静怡, 戴后华. 时间序列分析——建模与预报[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1991
- [12] 刘国东, 丁晶. 运用BP网络预测地下水位[J]. 西安地质学院学报, 1997, 19(2): 52~57
- [13] 金菊良, 丁晶. 遗传算法及其在水科学中的应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000. 77~84, 148
- [14] 王伟. 神经网络原理——入门与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995. 62~67
- [15] 周继成. 人工神经网络——第六代计算机的实现[M]. 北京: 科学普及出版社, 1993. 47~51
- [16] 闻新, 周露, 王丹力. MATLAB神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 208~224
- [17] 门宝辉. 井灌水稻防御冷水管的增温机理研究[D]. 哈尔滨, 东北农业大学, 2001. 12~22
- [18] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 81~99
- [19] 郭元裕, 李寿声. 灌排工程最优规划与管理[M]. 北京: 水力电力出版社, 1994, 263~269
- [20] 朱庭芸. 水稻灌溉的理论与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 70~71
- [21] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988
- [22] 王振龙. 时间序列分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000
- [23] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用.[M] 北京: 国防工业出版社, 2000. 1~3, 78~82, 200~234
- [24] 任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析——理论、方法、实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 149~158
- [25] 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用(下册)[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- [26] 金菊良, 丁晶. 基于遗传算法的门限自回归模型在浅层地下水位预测中的应用.[J] 水利学报, 1999, (6): 51~55
- [27] 崔远来. 非充分灌溉优化配水技术研究综述[J], 灌溉排水. 2000, 19(1): 66~70
- [28] Friedman J H, Turkey J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Trans. On Computer, 1974, 23(9): 881~890
- [29] 金菊良, 魏一鸣, 付强. 农业生产力综合评价的投影寻踪模型[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 1~3

## Study on the Modern Building Models & Optimum Technique

### ——Application of Water Saving System for Well

#### Irrigation Rice in Sanjiang Plain

Fu Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Si chuan University, Chengdu 610065, China;

2. Nothreast Agricultural University, Harbin 150030, China)

[Abstract] The author applies covertly and macroscopically the SPAC theory model to the water saving system of well irrigation rice in Sanjiang Plain. Several sub-systems have been taken as a whole large system, such as groundwater, machine well, sunning water pool, channel, field, environment and so on. Through applying modern building models and optimization technique, the author analyzes the mechanism and theory of each subsystem, some mathematical models about groundwater, sunning water pool, channel, water production function, water requirement and available rainfall have been built. At last, through designing the typical demonstration area, the author combines several water-saving techniques into a whole system. Thus, the goal of raising water temperature 5~15℃, saving water 17.1% and increasing yield 700~1000 kg/hm<sup>2</sup> can be reached.

[Key words] building models; optimization; Sanjiang Plain; well irrigation rice; system