

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.026

# 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优

张忠学<sup>1,2</sup> 张世伟<sup>1</sup> 郭丹丹<sup>1</sup> 谭智湘<sup>1</sup> 陈选<sup>1</sup> 梁乾平<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 利用四元二次回归分析建立了氮肥、磷肥、钾肥、灌水量对玉米光合速率的回归模型, 分析了各因素对玉米光合速率的单因素效应、边际效应与耦合效应。各因素对玉米光合速率的影响程度由大到小依次为: 灌水量、氮肥、钾肥、磷肥, 光合速率随各因素的增加均呈现先增加后减小的趋势。水氮、磷钾、水钾耦合效应显著, 其余因素耦合效应不显著。水氮、磷钾耦合对玉米光合速率存在负交互作用, 水钾耦合存在正交互作用。建立了玉米光合速率、产量与水分利用效率的多目标优化模型, 利用遗传算法对该模型进行模拟寻优, 得到的最优水肥组合为: 氮肥 270.00 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥 60.26 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥 60.02 kg/hm<sup>2</sup>、灌水量 700.00 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 该组合下得到的最优玉米光合速率为 13.54 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 产量为 24 520.10 kg/hm<sup>2</sup>, 水分利用效率为 5.14 kg/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 玉米; 产量; 光合速率; 遗传算法; 水分利用效率; 多目标优化

中图分类号: S513; S311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0206-09

## Coupling Effects of Different Water and Fertilizer Conditions and Optimization of Water and Fertilizer Schemes on Maize

ZHANG Zhongxue<sup>1,2</sup> ZHANG Shiwei<sup>1</sup> GUO Dandan<sup>1</sup> TAN Zhixiang<sup>1</sup> CHEN Xuan<sup>1</sup> LIANG Qianping<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The reasonable ratio of water and fertilizer for maize planting has been an important subject in agricultural research. However, previous studies only pay more attention to the one of the factors of yield, water use efficiency and photosynthetic rate, etc. to make the scheme of water and fertilizer coupling. The purpose was to reveal the coupling effects of fertilizer and water on photosynthetic rate, yield and WUE. A scheme of water and fertilizer combination was made based on the multi-objective genetic algorithm (MOGA), aiming to achieve an overall optimization of the above three factors. The D-416 saturation optimum design with 16 treatments and three replicates was used in the experiment. There were four levels of irrigation amount (400.0 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 473.7 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 604.1 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and 700.0 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), five levels of N supply (180.0 kg/hm<sup>2</sup>, 198.3 kg/hm<sup>2</sup>, 225.0 kg/hm<sup>2</sup>, 251.7 kg/hm<sup>2</sup> and 270.0 kg/hm<sup>2</sup>), and five levels for both of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O (60.0 kg/hm<sup>2</sup>, 72.2 kg/hm<sup>2</sup>, 90.0 kg/hm<sup>2</sup>, 107.8 kg/hm<sup>2</sup> and 120.0 kg/hm<sup>2</sup>). The design of each block was 10.4 m × 10 m with 702 plants and 23 cm in spacing. Maize variety of Longdan 9 was selected to seed on April 25, 2016. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O were supplied as base fertilizer before seeding. Half of N was used as base fertilizer and the remaining half was applied at elongation stage. Each treatment was irrigated respectively at elongation stage and tasseling stage with the same amount of water. The photosynthetic rate of the fourth leaf from the top to the bottom of maize was measured by the LI-6400 (LI-COR Biosciences Company, USA) during 09:00—11:00 on August 9, 2016. The yields for each block were recorded on September 21, 2016. The regression model of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O and irrigation water amount on maize photosynthesis rate was established by four-factor quadric regression analysis, and the coefficient of determination was 0.99. Sorting from large to small, the effect of various factors on the photosynthesis rate of maize was irrigation water amount, N, K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The photosynthetic rate appeared the trend of increasing first and then declining with the increase of each factor. Coupling effects between irrigation water amount and N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O, irrigation water

收稿日期: 2016-12-10 修回日期: 2017-03-09

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)

作者简介: 张忠学(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

amount and  $K_2O$  were significant while the coupling effects between the rest factors were not significant. The medium irrigation and medium fertilizer were favorable for maize photosynthesis. Increasing yield was beneficial to improve WUE. A multi-objective optimization model of photosynthetic rate, yield and WUE of maize was established. The genetic algorithm was used to optimize this model. The most suitable combination of irrigation water amount and fertilizer was as follows: irrigation amount was  $700\text{ m}^3/\text{hm}^2$ , and the fertilizer was  $270\text{ kg}/\text{hm}^2$  of N,  $60.26\text{ kg}/\text{hm}^2$  of  $P_2O_5$ ,  $60.02\text{ kg}/\text{hm}^2$  of  $K_2O$  and the corresponding optimum maize photosynthetic rate, yield and WUE were  $13.54\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,  $24\ 520.10\text{ kg}/\text{hm}^2$  and  $5.14\text{ kg}/\text{m}^3$ , respectively. The results had a guiding role in maize production.

**Key words:** maize; yield; photosynthetic rate; genetic algorithm; water use efficiency; multi-objective optimization

## 引言

玉米在我国粮食生产中具有十分重要的地位,肥料与灌水量的合理配施是改善水分利用效率、提高肥料利用率和产量的关键<sup>[1]</sup>。关于玉米水肥耦合前人已进行了大量研究<sup>[2-5]</sup>。左仁辉等<sup>[2]</sup>研究得出,施用氮肥可以增强玉米的光合作用进而提高产量,但是氮肥过多则会抑制玉米的光合作用,最终导致减产;王帅等<sup>[3]</sup>认为,随着施肥量的增加,净光合速率、叶绿素含量和可溶性蛋白含量均表现出先提高到一定程度后再降低的趋势,氮、磷、钾养分缺乏或过量均会使玉米光合能力降低;李艳等<sup>[4]</sup>利用RZWQM模型对冬小麦-夏玉米轮作种植区水氮管理进行了研究,表明增加灌水频率和减少灌水定额能够有效减少水分渗漏与氮素损失,从而提高作物产量;NURUDEEN等<sup>[5]</sup>在加纳的苏丹草原农业生态区进行氮肥、磷肥、钾肥对玉米产量及肥料利用率的研究,结果表明氮肥施用比例影响玉米产量与收益,而磷肥与钾肥在玉米产量及总回报率方面没有显著影响。然而,前人的研究大多局限于分析氮、磷、钾、水4个因素对玉米产量的耦合效应,而关于上述4个因素对玉米光合速率耦合效应的分析研究较少。且前人提出的最优水肥组合往往仅能满足单一指标,基于光合速率、产量、水分利用效率等多目标的水肥配施方案的制定方法较为少见。本文通过田间试验对玉米光合速率、产量和水分利用效率进行综合研究,并利用多目标遗传算法以以上3个指标综合最优为目标制定最佳水肥组合方案,以期对玉米水肥配施与灌溉制度的制定提供理论支持。

## 1 材料与方

### 1.1 试验区概况

试验在黑龙江省大庆市肇州县水利科学试验站内进行。试验地区地处 $45^{\circ}17'N$ 、 $125^{\circ}35'E$ ,平均海拔高度 $150\text{ m}$ ,属大陆性温寒带气候;年平均降水量 $400\sim 500\text{ mm}$ ,平均蒸发量 $1\ 733\text{ mm}$ ,大于 $10^{\circ}\text{C}$ 有效

积温 $2\ 845^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 $138\text{ d}$ ,属于第一积温带,试验土壤为碳酸盐黑钙土,其基础肥力见表1。

表1 供试土壤基础肥力

Tab.1 Soil basic fertility g/kg

| 成分 | 有机质   | 全氮   | 全磷   | 全钾    | 碱解氮  | 速效磷  | 速效钾  |
|----|-------|------|------|-------|------|------|------|
| 含量 | 28.20 | 1.41 | 0.88 | 19.86 | 0.13 | 0.04 | 0.21 |

试验采用D-416饱和最优设计,试验玉米品种为陇单9号。试验因素分别为:氮肥、磷肥、钾肥和灌水量。其中,氮肥、磷肥、钾肥3个因素分别设置5个水平,灌水量因素设置4个水平。试验共计16个处理,3次重复,48个小区。各小区采用随机区组排列,每个小区面积为 $104\text{ m}^2$ ( $10.4\text{ m}\times 10\text{ m}$ ),试验小区总面积为 $0.70\text{ hm}^2$ 。试验小区每公顷保苗 $67\ 500$ 株,每小区16条垄,垄宽 $65\text{ cm}$ ,株距 $23\text{ cm}$ 。保护区宽度为 $5\text{ m}$ ,保护行宽度为 $1\text{ m}$ ,隔离带宽度为 $1.3\text{ m}$ 。试验所用的氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(N的质量分数为 $46\%$ )、磷酸二铵(N的质量分数为 $18\%$ ;  $P_2O_5$ 的质量分数为 $46\%$ )和硫酸钾( $K_2O$ 的质量分数为 $54\%$ )。各试验因素编码见表2。

### 1.2 试验方法

试验于2016年4月25日播种,5月1日进行保苗水的喷灌。生育期内灌水2次,分别在拔节期及抽雄期灌水,2次灌水量比例为 $1:1$ 。磷肥和钾肥全部作基肥施入,氮肥 $1/2$ 随底肥施入,剩余 $1/2$ 在拔节期施入,随后进行灌水。总用肥量:尿素 $137.3\text{ kg}$ 、磷酸二铵 $67.0\text{ kg}$ 、硫酸钾 $56.0\text{ kg}$ 。于2016年8月9日晴天 $09:00\text{--}11:00$ 利用美国LI-COR公司生产的LI-6400型光合仪在每个小区随机选取5株玉米对其从上至下第4片叶进行光合速率测定。2016年9月21日进行测产与考种,每个小区随机选取5点(中心点与对角点),每点连续选取5株玉米测其单株穗长、穗粗、穗质量、百粒鲜质量及秃尖长。然后将籽粒放入干燥箱并保持 $(80\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 干燥 $8\text{ h}$ ,冷却后利用电子天平称其质量,再次放入干燥箱中直至质量恒定,得到玉米百粒干质量。各试验

表2 试验因素编码与试验设计

Tab.2 Level of test factor and coding value

| 处理<br>序号 | 因素编码值      |            |            |           | 氮肥用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 磷肥用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 钾肥用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 灌水量/<br>(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) |
|----------|------------|------------|------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|
|          | 氮肥用量 $x_1$ | 磷肥用量 $x_2$ | 钾肥用量 $x_3$ | 灌水量 $x_4$ |                                 |                                 |                                 |   |
| 1        | 0          | 0          | 0          | 1.784     | 225.0                           | 90.0                            | 90.0                            | 700.0                                       |
| 2        | 0          | 0          | 0          | -1.494    | 225.0                           | 90.0                            | 90.0                            | 400.0                                       |
| 3        | -1         | -1         | -1         | 0.644     | 198.3                           | 72.2                            | 72.2                            | 604.1                                       |
| 4        | 1          | -1         | -1         | 0.644     | 251.7                           | 72.2                            | 72.2                            | 604.1                                       |
| 5        | -1         | 1          | -1         | 0.644     | 198.3                           | 107.8                           | 72.2                            | 604.1                                       |
| 6        | 1          | 1          | -1         | 0.644     | 251.7                           | 107.8                           | 72.2                            | 604.1                                       |
| 7        | -1         | -1         | 1          | 0.644     | 198.3                           | 72.2                            | 107.8                           | 604.1                                       |
| 8        | 1          | -1         | 1          | 0.644     | 251.7                           | 72.2                            | 107.8                           | 604.1                                       |
| 9        | -1         | 1          | 1          | 0.644     | 198.3                           | 107.8                           | 107.8                           | 604.1                                       |
| 10       | 1          | 1          | 1          | 0.644     | 251.7                           | 107.8                           | 107.8                           | 604.1                                       |
| 11       | 1.685      | 0          | 0          | -0.908    | 270.0                           | 90.0                            | 90.0                            | 473.7                                       |
| 12       | -1.685     | 0          | 0          | -0.908    | 180.0                           | 90.0                            | 90.0                            | 473.7                                       |
| 13       | 0          | 1.685      | 0          | -0.908    | 225.0                           | 120.0                           | 90.0                            | 473.7                                       |
| 14       | 0          | -1.685     | 0          | -0.908    | 225.0                           | 60.0                            | 90.0                            | 473.7                                       |
| 15       | 0          | 0          | 1.685      | -0.908    | 225.0                           | 90.0                            | 120.0                           | 473.7                                       |
| 16       | 0          | 0          | -1.685     | -0.908    | 225.0                           | 90.0                            | 60.0                            | 473.7                                       |

小区玉米产量计算公式为

$$T = (W_1/W_2)W_3N \quad (1)$$

式中  $T$ ——各小区玉米产量,kg

$W_1$ ——玉米百粒干质量,kg

$W_2$ ——玉米百粒鲜质量,kg

$W_3$ ——玉米穗质量,kg

$N$ ——玉米株数

自玉米苗期(2016年5月23日)开始,利用土钻每隔10 d取一次土壤样本,每个试验小区取2个测点,测点间距为100 cm,利用烘干法测量每个小区土壤含水率,土壤剖面取样深度分别为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm,各阶段玉米田间耗水量计算公式为

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P \quad (2)$$

式中  $ET_{1-2}$ ——玉米阶段耗水量,mm

$i$ ——土壤层次号数

$n$ ——土层总数目

$\gamma_i$ ——第  $i$  层土壤干容重, g/cm<sup>3</sup>

$H_i$ ——第  $i$  层土壤厚度,cm

$W_{i1}$ ——第  $i$  层土壤在时段初质量含水率,%

$W_{i2}$ ——第  $i$  层土壤在时段末质量含水率,%

$M$ ——时段内灌水量,mm

$P$ ——时段内降水量,mm

玉米水分利用效率( $WUE$ )计算公式为

$$WUE = Y_c/ET \quad (3)$$

式中  $Y_c$ ——玉米产量,kg/hm<sup>2</sup>

$ET$ ——玉米全生育期耗水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

### 1.3 基于遗传算法的多目标优化模型

在农业生产中,往往不是寻求单一目标最优化,而是全面考虑经济效益、生态环境的综合效益,这种多于一种目标最优化的问题即为多目标优化问题<sup>[6]</sup>。多目标优化问题的一般数学模型可描述为

$$\begin{cases} V - \max \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})) \\ \text{s. t. } \mathbf{x} \in X \\ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^m \end{cases} \quad (4)$$

式中  $V - \max$ ——向量极大化

遗传算法(Genetic algorithm, GA)是一种以随机理论为基础模仿生物进化的搜索方法。近年来,遗传算法在各个科学领域得到广泛运用,在求解一些复杂优化问题时已显示出强大能力,具有广泛的适应性<sup>[7]</sup>。目前已有多位学者运用遗传算法解决了研究领域内的多目标优化问题<sup>[8-11]</sup>。然而,关于多目标遗传算法用于玉米合理水肥配比的研究鲜有报道。本文将多目标遗传算法引入水肥合理配比研究中,以验证其应用于制定多目标最优水肥组合的可行性。关于遗传算法求解多目标函数的 Pareto 解的方法主要有权重系数变换法、并列选择法和排列选择法等。本文采用并列选择法,其原理如图1所示。即将群体中的所有个体均等分为多个子群体,子群体数目等于目标函数的数目,然后将各个子群体分配给每个目标函数并进行独立运算,每个群体各自选出适应度高的个体组成新的子群体并与其余各目标函数新的子群体合并,进行交叉和变异运算,从而生成下一代完整群体,不断进行循环迭代,最终可得

到多目标问题的 Pareto 解。关于遗传算法的具体原理详见文献[6]。

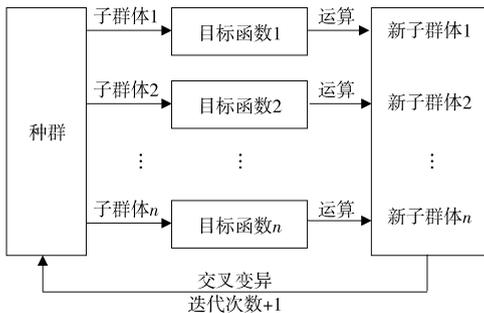


图 1 并列选择法原理图

Fig. 1 Schematic of parallel selection method

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥条件下玉米光合速率效应分析

利用本次试验数据进行四元二次回归拟合,得到抽雄期玉米光合速率 ( $Y$ ) 与氮肥施用量编码值 ( $x_1$ )、磷肥施用量编码值 ( $x_2$ )、钾肥施用量编码值 ( $x_3$ )、灌水量编码值 ( $x_4$ ) 的回归模型为

$$Y = 32.285 + 1.019x_1 + 0.768x_2 + 0.980x_3 + 1.756x_4 - 1.226x_1^2 - 1.347x_2^2 - 1.191x_3^2 - 2.930x_4^2 - 0.057x_1x_2 - 0.330x_1x_3 - 0.142x_1x_4 - 0.134x_2x_3 - 0.055x_2x_4 + 0.763x_3x_4 \quad (5)$$

对式(5)进行显著性检验,其决定系数  $R^2 = 0.99$ ,表明预测光合速率与实际光合速率有很好的拟合度。 $F = 4\ 228.584, P = 0.004$ ,回归关系达到极显著水平。其回归系数检验如表 3 所示。由表 3 可知,氮肥、磷肥、钾肥和灌水量对玉米光合速率均有显著影响。交互项中,氮磷、氮钾、磷水交互项较不显著,其余交互项均达到显著水平。需要去掉不显著因素,重新拟合方程并进行检验。

表 3 光合速率模型回归系数检验

Tab. 3 Test of regression coefficient of photosynthetic rate model

| 因素      | $t$      | $P$   | 因素       | $t$      | $P$   |
|---------|----------|-------|----------|----------|-------|
| $x_1$   | 287.977  | 0.002 | $x_4^2$  | -193.414 | 0.003 |
| $x_2$   | 217.053  | 0.003 | $x_1x_2$ | -12.405  | 0.051 |
| $x_3$   | 277.069  | 0.002 | $x_1x_3$ | -7.108   | 0.089 |
| $x_4$   | 496.399  | 0.001 | $x_1x_4$ | -30.621  | 0.021 |
| $x_1^2$ | -102.994 | 0.006 | $x_2x_3$ | -29.000  | 0.022 |
| $x_2^2$ | -113.204 | 0.006 | $x_2x_4$ | -11.784  | 0.054 |
| $x_3^2$ | -100.050 | 0.006 | $x_3x_4$ | 164.887  | 0.004 |

消除不显著的交互项后,得到的回归方程为

$$Y = 32.285 + 1.019x_1 + 0.768x_2 + 0.980x_3 + 1.756x_4 - 1.226x_1^2 - 1.347x_2^2 - 1.191x_3^2 - 2.930x_4^2 - 0.142x_1x_4 - 0.134x_2x_3 + 0.763x_3x_4 \quad (6)$$

对式(6)进行显著性检验,其决定系数  $R^2 = 0.99, F = 624.870, P < 0.0001$ ,回归关系达到极显著水平,回归系数检验如表 4 所示。由表 4 可知,各因素及其交互作用均达到显著与极显著水平,氮水、磷钾耦合对光合速率存在显著的负交互效应,钾水耦合对光合速率存在显著的正交互效应。

表 4 消除不显著因素后光合速率模型回归系数检验

Tab. 4 Test for regression coefficient of photosynthetic rate model after eliminating non-significant factors

| 因素      | $t$     | $P$    | 因素       | $t$     | $P$    |
|---------|---------|--------|----------|---------|--------|
| $x_1$   | 31.041  | <0.001 | $x_3^2$  | -10.784 | <0.001 |
| $x_2$   | 23.397  | <0.001 | $x_4^2$  | -20.848 | <0.001 |
| $x_3$   | 29.865  | <0.001 | $x_1x_4$ | -3.301  | 0.030  |
| $x_4$   | 53.507  | <0.001 | $x_2x_3$ | -3.126  | 0.035  |
| $x_1^2$ | -11.102 | <0.001 | $x_3x_4$ | 17.773  | <0.001 |
| $x_2^2$ | -12.202 | <0.001 |          |         |        |

回归方程一次项系数的绝对值是判断各因素对玉米净光合速率影响程度的依据,系数的正负表示因素的作用方向。由式(6)可知,氮肥、磷肥、钾肥和灌水量的一次项系数分别为 1.019、0.768、0.980 和 1.756。说明各因素对玉米光合速率的影响程度由大到小依次为:灌水量、氮肥、钾肥、磷肥,且 4 个因素对玉米光合速率均具有显著的正效应。

#### 2.1.1 单因素效应分析

单因素效应分析的原理是将待分析因素之外的其余因素控制在零水平,仅考虑单一因素对因变量的影响,由式(6)得氮肥 ( $Y_N$ )、磷肥 ( $Y_P$ )、钾肥 ( $Y_K$ )、灌水量 ( $Y_W$ ) 的单因素效应函数为

$$Y_N = 32.285 + 1.019x_1 - 1.226x_1^2 \quad (7)$$

$$Y_P = 32.285 + 0.768x_2 - 1.347x_2^2 \quad (8)$$

$$Y_K = 32.285 + 0.980x_3 - 1.191x_3^2 \quad (9)$$

$$Y_W = 32.285 + 1.756x_4 - 2.930x_4^2 \quad (10)$$

各因素的光合速率效应如图 2 所示。由图 2 可知,在其余因素为零水平时,玉米光合速率随着氮肥、磷肥、钾肥和灌水量的变化曲线均为开口向下的抛物线,符合报酬递减规律,存在光合速率最大值。当氮肥编码值为 0.416 时,光合速率达到最大值,为  $32.497 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当编码值在  $-1.685 \sim 0.416$  之间时,光合速率随氮肥施用量的增加而增加,当编码值大于 0.416 时,光合速率随氮肥施用量增加而降低。当磷肥施用量编码值为 0.285 时,光合速率达到最大值,为  $32.394 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当编码值在  $-1.685 \sim 0.285$  之间时,光合速率随磷肥施用量的增加而快速增加,当编码值大于 0.285 时,光合速率随磷肥施用量增加而降低。当钾肥施用量编码值为 0.411 时,光合速率达到最大值,为

32.487  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。编码值超过或不足 0.411 时,光合速率均呈下降趋势。当灌水量编码值为 0.300 时,光合速率达到最大值,为 32.548  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,其变化趋势与 3 种肥料变化趋势相同。各曲线变化规律说明,在一定范围内灌水量与施肥量的增加有利于提高玉米的光合速率,过度灌水施肥或灌水施肥过少均会抑制玉米光合作用。

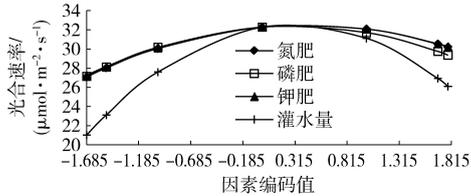


图2 单因素对光合速率影响的效应曲线

Fig. 2 Effect curves of single factor on photosynthetic rate

### 2.1.2 单因素边际效应分析

边际光合速率可得出各因素最佳投入量以及各因素投入量变化对光合速率的影响。通过对单因素效应函数进行求导,得到抽雄期光合速率随氮肥、磷肥、钾肥施用量以及灌水量的边际函数分别为

$$\frac{dY_N}{dx_1} = 1.019 - 2.452x_1 \quad (11)$$

$$\frac{dY_P}{dx_2} = 0.768 - 2.694x_2 \quad (12)$$

$$\frac{dY_K}{dx_3} = 0.980 - 2.382x_3 \quad (13)$$

$$\frac{dY_W}{dx_4} = 1.756 - 5.860x_4 \quad (14)$$

根据各因素边际函数绘制氮肥、磷肥、钾肥施用量和灌水量对光合速率的边际效应如图 3 所示。从图 3 中可以看出,随着氮肥、磷肥、钾肥施用量以及灌水量的增加,边际光合速率效应均呈现递减趋势。图 3 中纵坐标大于零表示因素促进边际光合速率,纵坐标小于零则会抑制边际光合速率。当氮肥编码值在  $-1.685 \sim 0.416$  之间时,会促进边际光合速率的增强,当编码值大于 0.416 时则会对边际光合速率产生抑制作用。当磷肥编码值在  $-1.685 \sim 0.285$  之间时,对边际光合速率具有正效应,超过该范围后会抑制边际光合速率。当钾肥编码值在  $-1.685 \sim 0.411$  之间时,有利于边际光合速率的增强,超过该范围则会抑制边际光合速率。灌水量编码值小于 0.300 时会促进边际光合速率的增强,超过 0.300 则会对边际光合速率产生抑制作用。

### 2.1.3 各因素耦合效应分析

叶片的光合速率受环境多因子的影响,这些因子并不是孤立存在的,它们之间必然存在某种相互促进或相互抑制的关系<sup>[11]</sup>。固定其中 2 个因素编

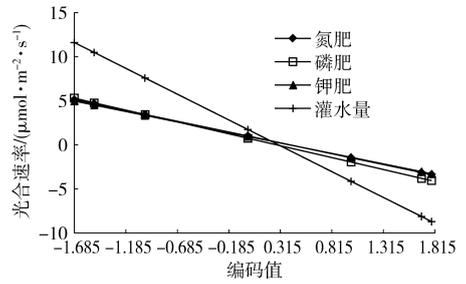


图3 光合速率边际效应分析

码值为 0,得到氮水 ( $Y_{NW}$ )、磷钾 ( $Y_{PK}$ )、钾水 ( $Y_{KW}$ ) 耦合效应方程为

$$Y_{NW} = 32.285 + 1.019x_1 + 1.756x_4 - 1.226x_1^2 - 2.930x_4^2 - 0.142x_1x_4 \quad (15)$$

$$Y_{PK} = 32.285 + 0.768x_2 + 0.980x_3 - 1.347x_2^2 - 1.191x_3^2 - 0.134x_2x_3 \quad (16)$$

$$Y_{KW} = 32.285 + 0.980x_3 + 1.756x_4 - 1.191x_3^2 - 2.930x_4^2 + 0.763x_3x_4 \quad (17)$$

由系数检验结果可知,氮磷、氮钾、磷水交互项系数不显著,故不作分析。图 4a 反映了氮肥施用量与灌水量的交互作用。可以看出,当灌水量为定值时,光合速率随氮肥施用量增加呈现先上升后下降的趋势,当氮肥编码值为 0.392,灌水量编码值为 0.294 时,光合速率达到最大值,为 32.743  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当氮肥施用量为定值时,光合速率随灌水量的增加同样呈现先上升后下降的趋势,灌水量对光合速率的影响程度大于氮肥施用量。当氮肥、钾肥施用量同时处于最低水平时,光合速率达到最小值。由图 4b 可知,磷肥与钾肥施用量的交互作用对光合速率的影响曲面为正凸面曲线,且磷肥与钾肥施用量对光合速率的影响程度大体一致,均呈现先增大后减小的趋势。当磷肥编码值为 0.255,钾肥编码值为 0.392 时,光合速率达到最大值,为 32.581  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当磷肥与钾肥施用量处于最低水平时,光合速率最小。图 4c 反映了钾肥施用量与灌水量的交互作用。当钾肥编码值为 0.528,灌水量编码值为 0.360 时,光合速率达到最大值,为 32.868  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 2.2 水肥耦合对玉米产量和水分利用效率的影响

各处理产量与水分利用效率如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,处理 11 产量最高。其次是处理 6 和处理 4,处理 16 产量最低。同时处理 11 也是水分利用效率最高的处理,其次是处理 4 和处理 13,处理 16 的水分利用效率也是最低的。由处理 11 与处理 16 对比可知,当灌水量处于同一水平时,增施适量的肥料能够显著提高玉米产量与水分利用效率;由处理 1 与处理 2 对比可知,当施肥量处于同

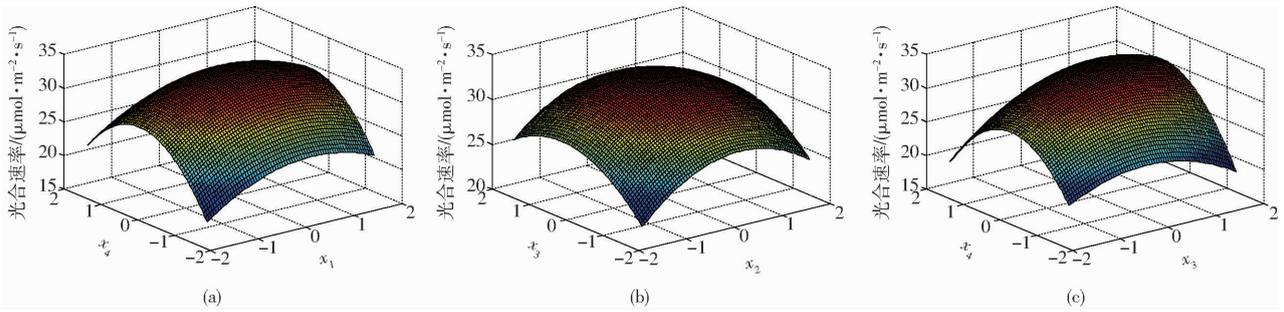


图4 各因素对光合速率的交互效应

Fig. 4 Effects of various factors on photosynthetic rate

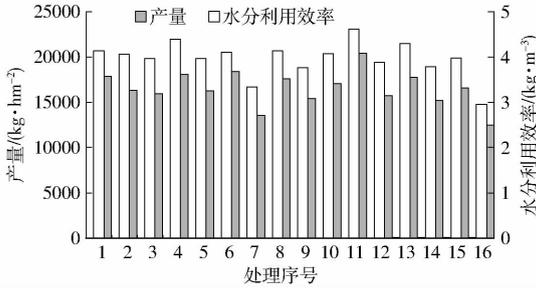


图5 各处理产量与水分利用效率

Fig. 5 Yield and water use efficiency of each treatment

一水平时,适当增加灌水量有利于产量与水分利用效率的提高。通过比较处理8与处理10可知,在灌水量不变的前提下,施肥过量不利于玉米生长,产量与水分利用效率反而会降低。因此,合理的水肥配比是作物获得高产的重要因素,灌水量和施肥量过高或过低均会降低玉米的产量与水分利用效率。

### 2.3 基于遗传算法的光合速率、产量及水分利用效率组合寻优

利用本次试验结果分别对玉米产量和水分利用效率进行四元二次回归分析,得到玉米产量( $Y_C$ )以及水分利用效率( $Y_E$ )与氮肥施用量编码值( $x_1$ )、磷肥施用量编码值( $x_2$ )、钾肥施用量编码值( $x_3$ )、灌水量编码值( $x_4$ )的回归模型

$$Y_C = 15\,148.11 + 1\,306.28x_1 + 456.05x_2 + 137.63x_3 + 253.92x_4 + 905.01x_1^2 + 354.33x_2^2 - 328.57x_3^2 + 707.11x_4^2 - 299.97x_1x_2 + 177.75x_1x_3 - 93.36x_1x_4 + 85.38x_2x_3 - 324.04x_2x_4 - 1\,187.32x_3x_4 \quad (18)$$

$$Y_E = 4.16 + 0.21x_1 + 0.07x_2 + 0.04x_3 + 0.03x_4 + 0.05x_1^2 - 0.02x_2^2 - 0.23x_3^2 - 0.02x_4^2 - 0.10x_1x_2 + 0.07x_1x_3 - 0.01x_1x_4 + 0.08x_2x_3 - 0.09x_2x_4 - 0.28x_3x_4 \quad (19)$$

经检验,上述2个回归方程的决定系数 $R^2$ 分别为0.986与0.998,回归关系显著。利用模型(6)、(18)、(19)建立多目标优化问题模型

$$\begin{cases} \max Y = 32.285 + 1.019x_1 + 0.768x_2 + 0.980x_3 + 1.756x_4 - 1.226x_1^2 - 1.347x_2^2 - 1.191x_3^2 - 2.930x_4^2 - 0.142x_1x_4 - 0.134x_2x_3 + 0.763x_3x_4 \\ \max Y_C = 15\,148.11 + 1\,306.28x_1 + 456.05x_2 + 137.63x_3 + 253.92x_4 + 905.01x_1^2 + 354.33x_2^2 - 328.57x_3^2 + 707.11x_4^2 - 299.97x_1x_2 + 177.75x_1x_3 - 93.36x_1x_4 + 85.38x_2x_3 - 324.04x_2x_4 - 1\,187.32x_3x_4 \\ \max Y_E = 4.16 + 0.21x_1 + 0.07x_2 + 0.04x_3 + 0.03x_4 + 0.05x_1^2 - 0.02x_2^2 - 0.23x_3^2 - 0.02x_4^2 - 0.10x_1x_2 + 0.07x_1x_3 - 0.01x_1x_4 + 0.08x_2x_3 - 0.09x_2x_4 - 0.28x_3x_4 \\ (-1.685 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1.685, -1.494 \leq x_4 \leq 1.784) \end{cases} \quad (20)$$

利用遗传算法中的并列选择法计算上述多目标优化问题的 Pareto 解,设定初始个体数目为1200,最大遗传代数数为60,变量的二进制数目取20,交叉概率取0.7,代沟取0.9,分别得到 $Y$ 、 $Y_C$ 、 $Y_E$ 以及整体模型随迭代次数的变化曲线如图6所示。

从图6中可以看出,各曲线在迭代次数较少时变幅较大,光合速率以及整体模型曲线在迭代初期目标函数值迅速下降,在迭代次数达到一定值后趋于稳定;产量与水分利用效率曲线呈现上下波动的趋势,产量曲线比水分利用效率曲线稳定。最终得到最优化光合速率为 $13.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,最优化产量为 $24\,520.20 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,最优化水分利用效率为 $5.14 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,取得最优解时的氮肥编码值为1.685,磷肥编码值为-1.671,钾肥编码值为-1.684,灌水量编码值为1.784,转化为实际值分别为:氮肥施用量 $270.00 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、磷肥施用量 $60.26 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、钾肥施用量 $60.02 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、灌水量 $700.00 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

### 3 讨论

不同水肥条件对玉米光合速率有重要影响。适量施用氮肥可提高作物叶片光合机构活性,增加干物质积累量,增强植物对干旱的适应能力<sup>[13]</sup>;磷参

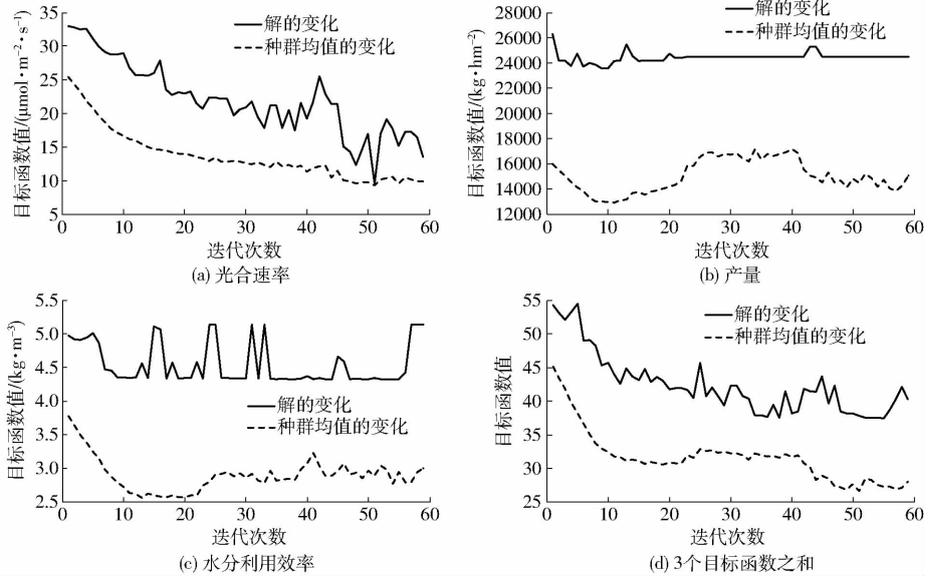


图6 经过60次迭代后光合速率、产量、水分利用效率以及整体模型最优解及性能跟踪

Fig.6 Optimization of photosynthetic rate, yield, water use efficiency and global model after 60 iterations and performance tracking

与光合进程及光合产物的运输与代谢,增施磷肥有利于提高作物的净光合速率,产生较多的碳水化合物运输到新叶<sup>[14]</sup>;适量施钾能够增强作物叶片的生理活性,有利于延缓叶片衰老<sup>[15]</sup>。水分是作物光合作用的原料,直接影响作物光合速率。DIMITRIS等<sup>[16]</sup>研究表明,氮、磷的缺乏会抑制玉米的水分运输,从而降低玉米的光合速率,并且氮对玉米光合速率的影响高于磷。由本次试验得出的光合速率回归模型可知,氮肥与磷肥对玉米光合速率均具有正效应,氮肥对光合速率的影响程度高于磷肥,与文献<sup>[16]</sup>研究结果一致。这可能是由于增施氮肥提高了玉米单位面积叶片叶绿素的相对含量(SPAD值),从而增强了玉米的光合作用<sup>[17]</sup>。本次试验单因素边际效应分析结果显示,氮肥、磷肥、钾肥施用量与灌水量在中等水平附近时,光合速率达到最大值,高肥处理下玉米的光合速率大于低肥处理。李严坤等<sup>[18]</sup>认为,中水处理下叶片净光合速率大于高水、低水处理下的叶片净光合速率,各处理中净光合速率由大到小表现为:中肥、高肥、低肥,与本次试验结论一致。而李建明等<sup>[12]</sup>则认为,当施肥量处于中间水平时,光合速率随着灌溉上限的上升呈现出逐步上升的趋势,与本次试验结论不一致。这可能是由于作物种类及灌水上下限选取的不同导致结果出现差异。此外,由光合速率各因素耦合效应分析可知,并非全部的水肥因素都具有显著的耦合效应,水氮、磷钾、水钾具有显著的耦合效应,其余因素耦合效应均不显著。由交互项系数正负可知,水氮耦合与磷钾耦合存在负交互作用,水钾耦合存在正交互作用,可能是由于水氮耦合效应与磷钾耦合效应抑制了叶绿素的增加,从而影响玉米光合速率。各耦

合效应影响程度由大到小表现为:水氮耦合、磷钾耦合、水钾耦合。由上述结论可知,合理的水肥配比是实现玉米光合速率最大化的重要措施。

水肥的合理使用是提高作物产量、品质和水肥利用率的关键因素<sup>[19]</sup>。吴立峰等<sup>[20]</sup>认为增加产量、适宜灌水量和适宜的施氮量均可以增加作物水分利用效率,本研究中,处理11产量最高,同时水分利用效率也达到最大值,与其研究结果一致。夏玉米产量与施氮水平关系密切,适宜的施氮量有利于玉米生长及最终产量的形成<sup>[21]</sup>。由产量回归方程可知,水肥对玉米产量影响程度由大到小表现为:氮肥、磷肥、水、钾肥,多位学者也得出了相同的结论<sup>[22-24]</sup>。王栋等<sup>[25]</sup>研究表明,当灌水量为 $1\ 061.0\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量为 $282.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施磷量为 $134.4\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,玉米最优产量为 $15\ 853\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。本次试验结果表明,当灌水量为 $700.00\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量为 $270.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施磷量为 $60.26\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施钾量为 $60.02\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,最优产量为 $24\ 520.20\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,最优水分利用效率为 $5.14\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,最优光合速率为 $13.54\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,达到了提高水分利用效率、节约肥料、获得高产的目标,同时也验证了多目标遗传算法运用于制定玉米最优水肥组合方案的合理性。

## 4 结论

(1)建立了玉米光合速率与氮肥、磷肥、钾肥施用量和灌水量的四元二次回归模型,并进行了系数检验,通过系数检验排除了氮磷、氮钾、磷水交互项对玉米光合速率的影响,重新建立的模型回归方程达到极显著水平。

(2)对玉米光合速率回归模型分别进行单因素

效应分析、单因素边际效应分析以及各因素耦合效应分析,得到4个因素对玉米光合速率的影响程度由大到小为:灌水量、氮肥施用量、钾肥施用量、磷肥施用量。4个因素对光合速率的影响均随编码值的增加呈现先增大后减小的趋势。水氮、磷钾、水钾具有显著的耦合效应,其余因素耦合效应均不显著。各耦合效应影响程度由大到小为:水氮耦合、磷钾耦合、水钾耦合,其中,水氮和磷钾存在负交互作用,水

钾存在正交互作用。

(3)建立了玉米光合速率、产量、水分利用效率的多目标优化模型,利用遗传算法对模型进行寻优,得到最佳水肥组合:氮肥施用量 270.00 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥施用量 60.26 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量 60.02 kg/hm<sup>2</sup>、灌水量 700.00 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,该组合下得到的最优玉米光合速率为 13.54 μmol/(m<sup>2</sup>·s),产量为 24 520.10 kg/hm<sup>2</sup>,水分利用效率为 5.14 kg/m<sup>3</sup>。

#### 参 考 文 献

- 1 FIXEN P, BRENTRUP F, BRUULSEMA T W, et al. Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends[M] // DRECHSEL P. Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2015: 8-37.
- 2 左仁辉, 韩晓日, 战秀梅, 等. 不同施肥条件下玉米光合特性和产量的研究[J]. 杂粮作物, 2010, 30(3): 190-194.  
ZUO Renhui, HAN Xiaori, ZHAN Xiumei, et al. The study on maize photosynthetic characteristics and yield under different fertilization[J]. Rain Fed Crops, 2010, 30(3): 190-194. (in Chinese)
- 3 王帅, 杨劲峰, 韩晓日, 等. 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(6): 23-27.  
WANG Shuai, YANG Jinfeng, HAN Xiaori, et al. Effect of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(6): 23-27. (in Chinese)
- 4 李艳, 刘海军, 黄冠华. 基于RZWQM模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 111-120. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150617&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150617&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.017.  
LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Evaluation of nitrogen and water management in winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain using RZWQM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 111-120. (in Chinese)
- 5 NURUDEEN A R, TETTEH F M, FOSU M, et al. Improving maize yield on Ferric Lixisol by NPK fertilizer use[J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 7(12): 233-237.
- 6 雷英杰. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 30-33.
- 7 游进军, 纪昌明, 付湘. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水利学报, 2003, 34(7): 64-69.  
YOU Jinjun, JI Changming, FU Xiang. New method for solving multi-objective problem based on genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7): 64-69. (in Chinese)
- 8 陈南祥, 李跃鹏, 徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 308-313.  
CHEN Nanxiang, LI Yuepeng, XU Chenguang. Optimal deployment of water resources based on multi objective genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 308-313. (in Chinese)
- 9 刘攀, 郭生练, 李玮, 等. 用多目标遗传算法优化设计水库分期汛限水位[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4): 81-90.  
LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei, et al. Optimal design of reservoir seasonal flood control level by using multi-objective genetic algorithm[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007, 27(4): 81-90. (in Chinese)
- 10 王宏伟, 张鑫, 邱俊楠, 等. 基于多目标遗传算法的西宁市水资源优化配置研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 150-153.  
WANG Hongwei, ZHANG Xin, QIU Junnan, et al. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm in Xining City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 150-153. (in Chinese)
- 11 朱大林, 詹腾, 张屹, 等. 多邻域结构多目标遗传算法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 309-315. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150446&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150446&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.046.  
ZHU Dalin, ZHAN Teng, ZHANG Yi, et al. Multi-neighborhood structure based multi-objective genetic algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 309-315. (in Chinese)
- 12 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.  
LI Jianming, PAN Tonghua, WANG Linghui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 82-90. (in Chinese)
- 13 杨永辉, 武继承, 潘晓莹, 等. 不同N、P、K配比对小麦、玉米光合生理及周年水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 54-59.  
YANG Yonghui, WU Jicheng, PAN Xiaoying, et al. Photosynthetic parameters and water use efficiency of wheat and maize under different rates of N, P and K[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 54-59. (in Chinese)
- 14 周振江, 牛晓丽, 李瑞, 等. 番茄叶片光合作用对水肥耦合的响应[J]. 节水灌溉, 2012(2): 28-32, 37.

- ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al. Coupling effects of irrigation and fertilizers on photosynthetic rate of tomato leaves[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(2):28-32,37. (in Chinese)
- 15 郭英, 孙学振, 宋宪亮, 等. 钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3):363-368.  
GUO Ying, SUN Xuezheng, SONG Xianliang, et al. Effects of potassium nutrition on growth and leaf physiological characteristics at seedling stage of cotton[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3):363-368. (in Chinese)
- 16 DIMITRIS L B, STYLIANI N C, ALEXANDROS D, et al. Comparison of the S-, N- or P-deprivations' impacts on stomatal conductance, transpiration and photosynthetic rate of young maize leaves[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, 3(8):1058-1065.
- 17 TAJUL M I, ALAM M M, HOSSAIN S M M, et al. Influence of plant population and nitrogen-fertilizer at various levels on growth and growth efficiency of maize[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 1:1-9.
- 18 李严坤, 张忠学, 仲爽, 等. 水肥处理对玉米叶片水分利用效率及其光合特性的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2008, 39(10):15-19.  
LI Yankun, ZHANG Zhongxue, ZHONG Shuang, et al. Effect of water-fertilizer on maize's water use efficiency and photosynthesis characteristic[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(10):15-19. (in Chinese)
- 19 周罕觅, 张富仓, ROGER K, 等. 水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12):173-183. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151224&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151224&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.024.  
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER K, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of young apple tree[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12):173-183. (in Chinese)
- 20 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12):164-172. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151223&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151223&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.023.  
WU Lifeng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of water and fertilizer coupling on cotton yield, net benefits and water use efficiency[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12):164-172. (in Chinese)
- 21 银敏华, 李援农, 谷晓博, 等. 氮肥运筹对夏玉米氮素盈亏与利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10):167-176. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150617&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150617&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.022.  
YIN Minhua, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen surplus and nitrogen use efficiency of summer maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10):167-176. (in Chinese)
- 22 张忠学, 聂堂哲, 王栋. 黑龙江省西部半干旱区玉米膜下滴灌水、氮、磷耦合效应分析[J]. *中国农村水利水电*, 2016(2):1-4.  
ZHANG Zhongxue, NIE Tangzhe, WANG Dong. The coupling effect of water, N and P with drip irrigation under plastic film on maize yield in semi-arid region of western Heilongjiang Province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(2):1-4. (in Chinese)
- 23 郜书静. 氮磷钾配施对饲用玉米产量和品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- 24 唐碧芳, 周晓舟, 蒋益敏. 氮磷钾对南方秋玉米产量及经济性状的影响[J]. *园艺与种苗*, 2012(5):63-65,74.  
TANG Bifang, ZHOU Xiaozhou, JIANG Yimin. Effects of nitrogen-phosphorus-potassium on yield and economic traits of southern autumn maize[J]. *Horticulture & Seed*, 2012(5):63-65,74. (in Chinese)
- 25 王栋, 张忠学, 梁乾平, 等. 黑龙江省半干旱区玉米喷灌水肥耦合效应试验研究[J]. *节水灌溉*, 2016(6):14-18.  
WANG Dong, ZHANG Zhongxue, LIANG Qianping, et al. Coupling effect of water and fertilizer with spray irrigation on maize yield in semi-arid region of Heilongjiang Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(6):14-18. (in Chinese)