

# 基于空间分析的宁夏沙土春玉米滴灌水氮管理模式研究

严富来<sup>1</sup> 张富仓<sup>1</sup> 范兴科<sup>2</sup> 王英<sup>1</sup> 李越鹏<sup>1</sup> 邹海洋<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 基于滴灌水肥一体化条件下研究水氮组合对宁夏沙土地区春玉米地上部干物质质量、产量、氮素积累量和水氮利用效率的影响, 并运用多元回归分析方法, 寻求高产高效的水氮施肥制度。设计灌水和施氮 2 因素、3 个灌水量水平 ( $W0.6: 0.6K_cET_0$ 、 $W0.8: 0.8K_cET_0$  和  $W1.0: 1.0K_cET_0$ , 其中  $K_c$  为作物系数,  $ET_0$  为潜在作物蒸发蒸腾量) 和 4 个施氮量水平 ( $N150: 150 \text{ kg/hm}^2$ ;  $N225: 225 \text{ kg/hm}^2$ ;  $N300: 300 \text{ kg/hm}^2$ ;  $N375: 375 \text{ kg/hm}^2$ ) 进行大田试验。结果表明: Logistic 函数对春玉米地上部干物质积累量具有较高的拟合度,  $W1.0$  灌水处理延后了地上部干物质快速积累期的起点; 灌水量和施氮量对产量、植株氮素积累量、水分利用效率 (WUE) 均有显著或极显著影响, 灌水量对氮肥偏生产力 (PFPN) 有极显著影响, 水氮耦合作用对氮收获指数有显著性影响; 相同灌水条件下, 地上部干物质积累量、产量、植株氮素积累量 ( $W0.8$  处理除外) 和 WUE 随施氮量的增加先增加、后减小。考虑试验区年降雨量分配不均, 基于产量、WUE、PFPN 和籽粒氮素积累量, 对水氮管理方案进行优化, 多元回归分析结果表明, 当灌水量与有效降雨量之和为 506 ~ 576 mm、施氮量为 230 ~ 335  $\text{kg/hm}^2$  时, 产量、WUE 和籽粒氮素积累量均能同时达到最大值的 95% 以上, 优化区间所得的 PFPN 约为最大值的 80%, 为适宜的水氮滴灌管理区间。研究成果可为当地沙土地区春玉米滴灌施肥过程中水氮科学管理提供指导依据。

**关键词:** 春玉米; 沙土地区; 滴灌施肥; 水氮; 空间分析

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)11-0219-10

## Optimal Irrigation and Nitrogen Management Model under Drip Fertigation System Based on Spatial Analysis of Spring Maize in Sandy Soil Area in Ningxia

YAN Fulai<sup>1</sup> ZHANG Fucang<sup>1</sup> FAN Xingke<sup>2</sup> WANG Ying<sup>1</sup> LI Yuepeng<sup>1</sup> ZOU Haiyang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Aiming to investigate the effects of different combinations of irrigation and nitrogen on shoot biomass, yield, total nitrogen accumulation, and water and nitrogen use efficiency of drip fertigated spring maize in sandy soil area in Ningxia. The multivariate regression analysis method was used to obtain the best combination of irrigation and nitrogen for maximum production, and the spatial analysis method was further used to comprehensively evaluate the yield, grain nitrogen accumulation, and water and nitrogen use efficiency to seek a high-yield and low-water fertigation system for the closest acceptable production of multiple targets. The plot experiments were conducted with two factors of irrigation and nitrogen. There were three irrigation levels ( $W0.6: 0.6K_cET_0$ ;  $W0.8: 0.8K_cET_0$  and  $W1.0: 1.0K_cET_0$ ,  $K_c$  was crop coefficients,  $ET_0$  was potential reference crops evapotranspiration) and four nitrogen levels ( $N150: 150 \text{ kg/hm}^2$ ;  $N225: 225 \text{ kg/hm}^2$ ;  $N300: 300 \text{ kg/hm}^2$  and  $N375: 375 \text{ kg/hm}^2$ ). The results showed that there was a high fitting degree of shoot biomass for spring maize with Logistic function and the  $W1.0$  irrigation treatment delayed the starting point of the rapid accumulation period of shoot biomass.

收稿日期: 2019-03-28 修回日期: 2019-05-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B05)、国家重点研发计划项目(2017YFC0403303)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)和教育部高等学校创新引智计划项目(B12007)

作者简介: 严富来(1995—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: 937429331@qq.com

通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

The single factor of irrigation and nitrogen application had significant or extremely significant effects on the yield, plant nitrogen accumulation and water use efficiency (WUE), and irrigation amount had significant effect on nitrogen partial factor productivity (PFPN). Both irrigation and nitrogen application amounts had significant or extremely significant effects on yield, plant nitrogen accumulation and WUE, while irrigation amount had extremely marked effects on PFPN, and irrigation and nitrogen had a notable coupling effect on the nitrogen harvest index. Under the same irrigation levels, the shoot biomass, yield, plant nitrogen accumulation (except for W0.8 treatment) and WUE were increased at first, and then decreased with the increase of the nitrogen application rate. Through the multivariate regression analysis and the spatial analysis methods, considering the uneven distribution of annual rainfall in Ningxia, the results suggested that when the sum of irrigation amount and effective rainfall was 506 ~ 576 mm and nitrogen application rate was 230 ~ 335 kg/hm<sup>2</sup>, the yield, WUE and grain nitrogen accumulation could reach more than 95% of the maximum yield, the PFPN under this combined treatment was about 80% of the maximum value at the same time. The research provided a guidance for scientific management of water and nitrogen application for spring maize under the local drip fertigated condition in sandy soil area in Ningxia.

**Key words:** spring maize; sandy soil area; drip fertigation; water and nitrogen; spatial analysis

## 0 引言

玉米是我国第一大粮食作物<sup>[1]</sup>,也是宁夏回族自治区(以下简称宁夏)的主要粮食作物之一。据报道,宁夏沙土面积占其耕地面积的22.3%,玉米生产在保障当地粮食安全和缓解能源危机等方面起到重要作用<sup>[2]</sup>。近年来,宁夏春玉米种植面积不断增加,但大水漫灌和过量施肥现象依然普遍。落后的灌溉方式及过量的灌水施肥量不仅会抑制作物产量的提高和养分的吸收<sup>[3]</sup>、造成水肥资源的浪费,还制约了当地农业的可持续发展,导致大量的肥料向深层土壤淋失,破坏农田土壤结构,增加地下水污染的几率<sup>[4-6]</sup>。因此,改善农田灌溉施肥方式、提高作物的水肥综合利用效率是保证该地区农业可持续发展、改善农田生态环境和作物高效增产的关键所在。

研究表明,灌水和施肥对作物产量的提高具有重要的保障作用<sup>[7]</sup>,并且灌水和施肥均能显著提高作物生物量、产量、水肥利用效率和氮素累积量<sup>[8-11]</sup>。目前,国内外学者在玉米水肥耦合方面已开展了诸多研究。TEIXEIRA等<sup>[12]</sup>研究表明,水氮亏缺对作物干物质累积量、产量、水氮利用效率和氮素吸收等有显著性影响。GHEYSARI等<sup>[13]</sup>研究表明,每个灌水水平都对应着一个最佳施氮量,最佳施氮量会随着灌水量的增加而增加。时隔几年,GHEYSARI等<sup>[14]</sup>又研究指出,对于每个氮肥处理进行水分亏缺均能提高作物水分利用效率,并且当氮肥施用量较高时能显著提高作物产量。另外,在研究作物最佳水肥管理方案时,部分学者采用多因素回归分析方法,如邢英英等<sup>[15]</sup>通过空间分析方法寻求番茄产量、水分利用效率(WUE)、品质和肥料偏

生产力(PFP)等指标可接受性(如大于等于85%最大值)的重叠区域,认为最佳滴灌灌水量为198~208 mm,施肥量为442~480 kg/hm<sup>2</sup>。WANG等<sup>[16]</sup>通过回归分析方法,对籽棉产量、WUE、经济效益和PFP等指标进行综合评价,得出各指标可接受区域(90%最大值)的近重叠区域,所对应的滴灌灌水量为362.3~462.5 mm,施氮量为215.5~367.5 kg/hm<sup>2</sup>,施磷量为85~147 kg/hm<sup>2</sup>,施钾量为42.5~73.5 kg/hm<sup>2</sup>。另外,WANG等<sup>[17]</sup>考虑了温室黄瓜产量、WUE、品质、维生素C和氮肥偏生产力(PFPN)等指标90%最大值的置信区间,得出最佳滴灌区间为124~151 mm,施氮区间为318~504 kg/hm<sup>2</sup>。

本文旨在对宁夏沙土地区滴灌施氮春玉米各指标进行多元回归分析的基础上,以高产、节水、节肥和提高养分吸收利用效率4重目标为出发点,运用空间分析方法<sup>[18]</sup>对春玉米各指标进行综合评价,提出最佳滴灌水氮管理模式,为当地沙土地区春玉米的滴灌水氮管理提供有效的指导依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2018年4—9月在宁夏回族自治区吴忠市盐池县冯记沟试验基地进行。试验地位于东经106°31′,北纬38°34′,海拔1204 m,属典型的温带大陆性季风气候。试验区年日照时数为2867 h,年平均气温8.5℃,大于等于10℃积温为2944.9℃,无霜期128 d;年平均降雨量290 mm,且年际变化大,多集中在7—9月,年蒸发量2179.8 mm。试验区土壤为沙土,土壤容重1.55 g/cm<sup>3</sup>,0~100 cm田间持水率为27.10%(体积含水率),pH值8.60,地下水

埋深 30 m 以上。基础肥力(质量比)为:有机质 4.13 g/kg,全氮 0.30 g/kg,全磷 0.34 g/kg,全钾 19.24 g/kg,速效磷 5.48 mg/kg,速效钾 78.33 mg/kg。试验区玉米生育期(4—9月)内有效降雨量为 204.6 mm。

供试春玉米品种为“先玉 1225”,为当地推广的密植品种。2018 年 4 月 20 日播种,2018 年 9 月 26 日收获,共 160 d,出苗率为 82.0%。滴灌所用肥料分别为尿素(N 质量分数 46.4%)、磷酸一铵(N 质量分数 12%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>质量分数 61%)和硫酸钾(K<sub>2</sub>O 质量分数 52%)。整个生育期共施肥 4 次,每次施肥量占总施肥量比例分别为苗期 20%、小喇叭口期 30%、抽雄期 30%和灌浆期 20%<sup>[19]</sup>。滴灌施肥系统主要由水泵、水表、过滤器、施肥罐、输配水管道系统和滴灌带等组成。

1.2 试验设计

试验小区长为 20 m,宽为 6.6 m,小区面积为 132 m<sup>2</sup>,小区随机区组排列,每个处理 3 次重复。玉米采用宽窄行播种(宽行间距为 70 cm,窄行间距为 40 cm)滴灌带布设在窄行玉米中间,采用一条滴灌带控制 2 行春玉米的灌水方式。滴灌带滴头间距为 30 cm,滴头流量 2 L/h,滴头工作压力 0.1 MPa。为确保灌水施肥的均匀性,试验区采用横向供水方式<sup>[20]</sup>。玉米株距为 20 cm,种植密度 90 900 株/hm<sup>2</sup>。

试验设施氮量和灌水量 2 因素。施氮量设置 4 个水平: N150、N225、N300、N375 (150、225、300、375 kg/hm<sup>2</sup>)。磷钾施用量均为 150 kg/hm<sup>2</sup>。将试验区 2000—2017 年春玉米生育期内潜在作物蒸发蒸腾量(ET<sub>0</sub>)和作物系数 K<sub>c</sub>相结合(图 1),K<sub>c</sub>根据作物生育阶段而定,苗期取 0.7、拔节—灌浆期取 1.2、乳熟—成熟期取 0.6<sup>[21]</sup>,进而推算出试验区春玉米生育期内潜在充分耗水量(1.0K<sub>c</sub>ET<sub>0</sub>)为 450 mm,记为 W1.0。以此为依据,设 3 个滴灌水量 W0.6

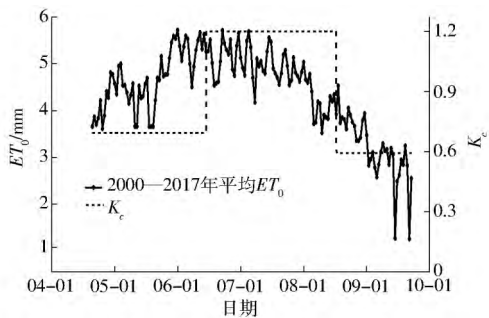


图 1 春玉米生育期内多年平均潜在作物蒸腾蒸发量与作物系数

Fig. 1 Multi-year average potential reference crops evapotranspiration during spring maize growth stage and crop coefficients

(0.6W<sub>1.0</sub>)、W0.8(0.8W<sub>1.0</sub>)和 W1.0,共 12 个处理,各处理 3 次重复。试验区为引黄(水库蓄水)灌区,需采取轮灌工作制度,因此采取 10 d 作为设计灌水间隔<sup>[19]</sup>。为了控制春玉米苗期生长过快,促进根系生长,该地区在生产中一般在玉米小苗末期才开始灌水,但该地区春季极易发生春旱,导致出苗率降低;另外根据该地区历史气象资料,试验区年际降雨量变化较大,且多集中在 7—9 月。因此,春玉米的灌溉制度需根据实际降雨情况进行灌水量和灌水日期的调整。2018 年春玉米生育期内的实际灌水量、有效降雨量和施肥比例见表 1。

表 1 春玉米滴灌灌水施肥试验方案  
Tab. 1 Irrigation and fertilization schedule of treatments for spring maize

| 日期    | 灌水次序   | 实际灌水量/mm |       |       | 有效降雨量/mm | 施肥比例/% |
|-------|--------|----------|-------|-------|----------|--------|
|       |        | W0.6     | W0.8  | W1.0  |          |        |
| 04-30 | 第 1 次  | 20.0     | 20.0  | 20.0  |          |        |
| 05-10 |        |          |       |       | 14.2     |        |
| 05-21 |        |          |       |       | 5.0      |        |
| 06-01 | 第 2 次  | 22.4     | 29.9  | 37.7  |          | 20     |
| 06-11 | 第 3 次  | 21.4     | 28.5  | 35.7  |          |        |
| 06-20 |        |          |       |       | 39.4     |        |
| 06-26 | 第 4 次  | 37.5     | 50.0  | 62.5  |          | 30     |
| 07-01 |        |          |       |       | 34.0     |        |
| 07-06 | 第 5 次  | 36.0     | 48.0  | 60.1  |          |        |
| 07-10 |        |          |       |       | 10.0     |        |
| 07-17 | 第 6 次  | 36.5     | 48.1  | 61.0  |          | 30     |
| 07-19 |        |          |       |       | 6.6      |        |
| 07-20 |        |          |       |       | 11.0     |        |
| 07-23 |        |          |       |       | 16.0     |        |
| 07-29 | 第 7 次  | 24.6     | 29.2  | 41.0  |          |        |
| 08-08 | 第 8 次  | 28.8     | 38.4  | 48.0  |          | 20     |
| 08-18 | 第 9 次  | 14.0     | 18.6  | 23.3  |          |        |
| 08-19 |        |          |       |       | 9.8      |        |
| 08-21 |        |          |       |       | 17.0     |        |
| 08-28 | 第 10 次 | 12.0     | 15.9  | 19.9  |          |        |
| 08-30 |        |          |       |       | 7.4      |        |
| 08-31 |        |          |       |       | 8.2      |        |
| 09-01 |        |          |       |       | 14.0     |        |
| 09-25 |        |          |       |       | 12.0     |        |
| 总计    |        | 253.2    | 326.6 | 409.2 | 204.6    | 100    |

1.3 测定内容和方法

1.3.1 地上部干物质量

分别在春玉米播种后 51、70、85、113、160 d 取样,每个小区选取有代表性的植株 3 株,从茎基部与地上部分离,去除表面污垢后各器官分离,放入干燥箱在 105℃ 杀青 0.5 h,75℃ 下干燥至恒定质量,采用电子天平称量并计算单株地上干物质量,最后换

算成群体生物量( kg/hm<sup>2</sup> )。

采用 Logistic 函数对玉米地上部干物质进行非线性回归拟合, Logistic 函数表达式为<sup>[22]</sup>

$$y = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \quad (1)$$

式中  $y$ ——地上部干物质累积量 kg/hm<sup>2</sup>

$k$ ——相应的潜在最大值 kg/hm<sup>2</sup>

$a$ ——与干物质有关的阻滞系数

$b$ ——干物质的增长率

$t$ ——生长时间 d

### 1.3.2 植株氮素累积量和产量

在春玉米收获期取样,按茎、叶片、苞叶、穗轴和籽粒 5 部分分别干燥装样。样品放入干燥箱在 105℃ 杀青 0.5 h, 75℃ 下干燥至恒定质量,称取干物质质量后磨碎,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,用于养分测定,采用连续流动分析仪( Auto Analyzer-III 型,德国 Bran Luebbe 公司)测定植物样品全氮含量。

在玉米收获后测定产量及其构成要素,随机选取小区 1 条滴灌带控制的 2 行玉米,连续取 20 株,每个小区 3 次重复。风干后测定穗长、穗粗、行粒数和秃尖长,脱粒测定总质量及其百粒质量,最终折算成含水率为 14% 的籽粒产量<sup>[23]</sup>。

### 1.3.3 水分利用效率、灌溉水利用效率及氮肥偏生产力

水分利用效率( WUE) 的计算公式为<sup>[24-25]</sup>

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

其中  $ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W$  (3)

式中  $Y$ ——产量 kg/hm<sup>2</sup>

$ET$ ——作物耗水量 mm

$P_r$ ——有效降雨量 mm

$U$ ——地下水补给量 mm

$I$ ——灌水量 mm

$D$ ——深层渗漏量 mm

$R$ ——径流量 mm

$\Delta W$ ——试验初期和试验末期土壤水分的变化量 mm

在春玉米播前和收获后,在每个小区内取土,距滴灌带 0、20、40 cm 3 个位置点取样,每 20 cm 取 1 次,土壤剖面范围分别为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm,采用干燥法测定土壤含水率,取其平均值作为该小区的土壤含水率(%)。因试验区地势平坦,地下水埋藏较深,根据实测,生育期内 1 m 深土壤含水率变化不大,且滴灌湿润程度较浅, $U$ 、 $R$  和  $D$  均可忽略不计。则可将式(3)简化为

$$ET = P_r + I - \Delta W \quad (4)$$

灌溉水利用效率( IWUE) 的计算公式为<sup>[26]</sup>

$$I_{WUE} = Y/I \quad (5)$$

式中  $I_{WUE}$ ——灌溉水利用效率 kg/m<sup>3</sup>

氮肥偏生产力( PFPN) 的计算公式为<sup>[27]</sup>

$$L_{PFPN} = Y/F_N \quad (6)$$

式中  $L_{PFPN}$ ——氮肥偏生产力 kg/kg

$F_N$ ——施氮量 kg/hm<sup>2</sup>

### 1.3.4 相关指标计算

植株氮素累积量( kg/hm<sup>2</sup>) 为植株氮素含量(%) 与干物质质量( kg/hm<sup>2</sup>) 的乘积,氮收获指数为籽粒氮素吸收量与植株氮素吸收量的比值<sup>[23]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理,采用 SPSS 20.0 统计分析软件对试验数据进行方差分析,采用 Origin 9.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水氮处理对春玉米地上部干物质累积量的影响及 Logistic 函数拟合

地上部干物质累积量是反映作物产量的一个重要因素<sup>[28]</sup>。表 2 为地上部干物质质量与生长时间的 Logistic 函数拟合方程和特征值,图 2 为地上部干物质质量的实测值与 Logistic 函数的拟合值。由表 2 可知,不同水氮处理条件下各拟合方程的  $R^2$  均在 0.990 以上,且  $P < 0.01$ ,说明 Logistic 函数对该试验单一处理具有较高的拟合度。与 W0.6 和 W0.8 灌水处理相比,生育期内进行较大灌水定额( W1.0 灌水处理) 明显推迟  $t_1$  的时间。在 W0.6 和 W0.8 灌水处理条件下,各处理间的  $t_1$  相差 2 d 左右。虽然各灌水水平下的 N300 处理的  $t_2$  比 N375 处理分别提前了 4.21、9.05、13.34 d,但 N300 处理的  $V_M$  却均大于 N375 处理。在 W1.0 灌水条件下, N150 处理发育迟缓,进入  $t_1$  的时间较其他处理分别延后了 5.27、5.53、5.88 d。在 W0.6 灌水条件下,与 N150 处理相比, N225、N300 和 N375 处理的  $t_2$  分别提前了 10.36、10.29、6.08 d,  $t_0$  分别提前了 6.62、6.26、3.54 d,  $G_T$  分别提前了 7.47、8.04、5.05 d; 在 W0.8 灌水条件下,与 N375 处理相比, N150、N225 和 N300 处理的  $t_2$  分别提前了 9.77、8.87、9.05 d,  $t_0$  分别提前了 6.15、5.25、6.3 d,  $G_T$  分别提前了 7.24、7.24、5.50 d; 在 W1.0 灌水条件下,与 N150 处理相比, N225、N300 和 N375 处理的  $t_0$  分别提前了 7.41、13.7、7.21 d,  $G_T$  分别提前了 4.29、16.36、2.66 d。W0.6、W0.8 和 W1.0 灌水处理的  $V_M$  分别在 N225、N300 和 N300 处理下取得最大值,分别为 473.37、511.19、627.93 kg/hm<sup>2</sup>。

表 2 地上部干物质质量与生长时间的 Logistic 函数拟合

Tab. 2 Fitting result of aboveground dry biomass and growing time by Logistic function

| 处理       | $t_1$ /d | $t_2$ /d | $t_0$ /d | $V_M/(kg \cdot hm^{-2})$ | $G_T$ /d | 回归方程                                  | $R^2$ | $P$    |
|----------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|---------------------------------------|-------|--------|
| W0.6N150 | 81.98    | 128.19   | 105.08   | 319.39                   | 46.21    | $Y=20\ 916.66/(1+399.27e^{-0.057t})$  | 0.995 | 0.001  |
| W0.6N225 | 79.09    | 117.83   | 98.46    | 473.37                   | 38.74    | $Y=25\ 983.21/(1+808.61e^{-0.068t})$  | 0.999 | <0.001 |
| W0.6N300 | 79.73    | 117.90   | 98.82    | 383.45                   | 38.17    | $Y=20\ 742.19/(1+914.42e^{-0.069t})$  | 0.999 | <0.001 |
| W0.6N375 | 80.96    | 122.11   | 101.54   | 373.63                   | 41.16    | $Y=21\ 790.84/(1+664.04e^{-0.064t})$  | 0.999 | <0.001 |
| W0.8N150 | 79.21    | 117.38   | 98.29    | 423.18                   | 38.17    | $Y=22\ 891.59/(1+881.97e^{-0.069t})$  | 0.999 | <0.001 |
| W0.8N225 | 80.10    | 118.28   | 99.19    | 509.69                   | 38.17    | $Y=27\ 571.16/(1+938.34e^{-0.069t})$  | 0.999 | <0.001 |
| W0.8N300 | 78.19    | 118.10   | 98.14    | 511.19                   | 39.91    | $Y=28\ 910.09/(1+650.24e^{-0.066t})$  | 0.998 | <0.001 |
| W0.8N375 | 81.73    | 127.15   | 104.44   | 429.39                   | 45.41    | $Y=27\ 634.89/(1+427.29e^{-0.058t})$  | 0.993 | 0.002  |
| W1.0N150 | 89.17    | 138.87   | 114.02   | 415.64                   | 49.70    | $Y=29\ 274.00/(1+421.16e^{-0.053t})$  | 0.991 | 0.003  |
| W1.0N225 | 83.90    | 129.31   | 106.61   | 481.54                   | 45.41    | $Y=30\ 990.65/(1+484.57e^{-0.058t})$  | 0.997 | <0.001 |
| W1.0N300 | 83.64    | 116.99   | 100.32   | 627.93                   | 33.34    | $Y=29\ 666.12/(1+2765.39e^{-0.079t})$ | 0.996 | 0.001  |
| W1.0N375 | 83.29    | 130.33   | 106.81   | 350.95                   | 47.04    | $Y=23\ 394.15/(1+395.98e^{-0.056t})$  | 0.995 | 0.001  |

注:  $t_1$  和  $t_2$  分别为春玉米地上干物质质量快速积累期的起点时间和终点时间,  $t_0$  为日最大增长量出现的时间,  $V_M$  为日最大增长量,  $G_T$  为快速积累期持续的时间。

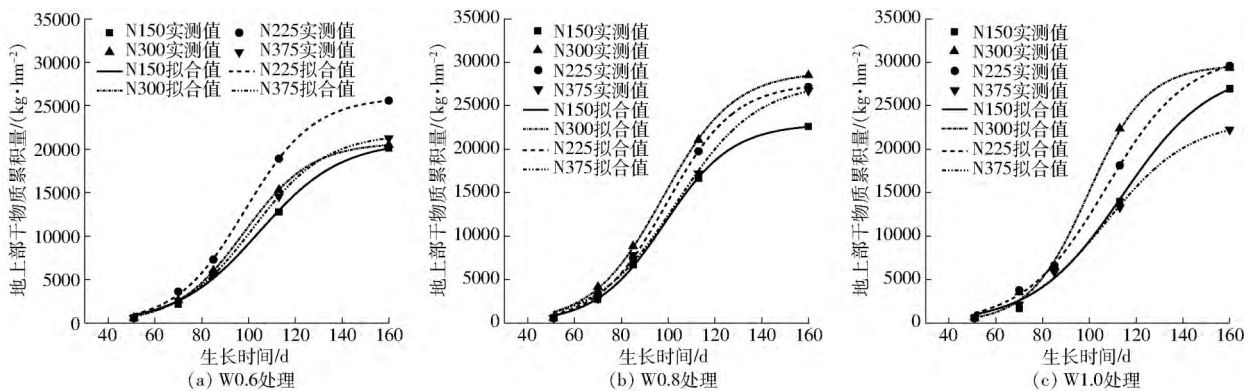


图 2 不同水氮处理对地上部干物质积累量的影响及 Logistic 函数拟合

Fig. 2 Effects of different water and nitrogen treatments on aboveground dry biomass and fitting results by Logistic function

由图 2 可知,同一灌水水平下,从拟合曲线斜率可以看出,各施氮处理地上部干物质累积速率均随生长时间呈现“慢—快—慢”的趋势,由拟合方程可知,各处理大致在第 100 天左右的地上部干物质日增长量最大。在 W0.6 灌水水平条件下,N225 处理的地上部干物质累积量显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ );在 W0.8 灌水水平条件下,N150 处理的地上部干物质累积量显著低于其他处理 ( $P < 0.05$ );在 W1.0 灌水水平条件下,N225 处理与 N300 处理的地上部干物质累积量无显著性差异 ( $P > 0.05$ ) 但显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ )。表明相同灌水条件下,地上部干物质累积量随施氮量的增加先增加后减小。

### 2.2 不同水氮处理对春玉米产量及其构成要素的影响

由表 3 可知,灌水量和施氮量的耦合效应对春玉米产量及产量构成要素有极显著性影响(百粒质量除外) ( $P < 0.01$ ),灌水量和施氮量的单因素对百粒质量有极显著性影响 ( $P < 0.01$ )。总体看来,同一灌水水平下,产量随施氮量增加先增加后减小,穗长和百粒质量在 W0.8 和 W1.0 灌水水平下也随施

氮量增加先增加后减小。W0.6、W0.8 和 W1.0 灌水条件下所对应的最高产量处理分别为 W0.6N225、W0.8N300 和 W1.0N300,三者之中 W0.8N300 处理的产量最高并且秃尖长最小,分别为  $16\ 387\ kg/hm^2$  和  $0.96\ cm$ ,该处理的产量虽然与 W1.0N300 处理无显著性影响 ( $P > 0.05$ ),但显著高于其他处理的产量 ( $P < 0.05$ )。另外,W0.8N300 处理的秃尖长显著低于 W0.6N225 和 W1.0N300 处理 ( $P < 0.05$ );穗长和百粒质量显著高于 W0.6N225 和 W1.0N300 处理 ( $P < 0.05$ )。整体看来,W0.8 处理的产量及产量构成要素(秃尖长除外)均显著高于 W0.6 处理 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 不同水氮处理对春玉米氮素累积量的影响

由表 4 可知,灌水量对茎秆、苞叶、穗轴的氮素累积量和氮收获指数无显著性影响 ( $P > 0.05$ ),对叶片的氮素累积量有显著性影响 ( $P < 0.05$ ),对籽粒和植株氮素累积量有极显著性影响 ( $P < 0.01$ );施氮量对穗轴的氮素累积量和氮收获指数无显著性影响 ( $P > 0.05$ ),对茎秆和苞叶的氮素累积量有显著性影响 ( $P < 0.05$ ),对叶片、籽粒和植株氮素累积

表3 不同水氮处理对春玉米产量及其构成要素的影响

Tab.3 Effects of different water and nitrogen treatments on spring maize yield and its components

| 灌水量          | 施氮量  | 穗长/cm                | 穗粗/mm                | 秃尖长/cm               | 百粒质量/g               | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|--------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| W0.6         | N150 | 17.96 <sup>e</sup>   | 50.45 <sup>de</sup>  | 1.94 <sup>cd</sup>   | 32.66 <sup>def</sup> | 11 607 <sup>ef</sup>      |
|              | N225 | 17.56 <sup>ef</sup>  | 50.70 <sup>ede</sup> | 2.14 <sup>bc</sup>   | 32.86 <sup>de</sup>  | 12 832 <sup>ede</sup>     |
|              | N300 | 19.30 <sup>cd</sup>  | 49.74 <sup>ef</sup>  | 2.62 <sup>a</sup>    | 33.93 <sup>ede</sup> | 11 468 <sup>ef</sup>      |
|              | N375 | 18.84 <sup>d</sup>   | 48.62 <sup>f</sup>   | 2.44 <sup>ab</sup>   | 32.52 <sup>ef</sup>  | 10 293 <sup>f</sup>       |
| W0.8         | N150 | 19.8b <sup>c</sup>   | 52.35 <sup>a</sup>   | 1.24 <sup>fg</sup>   | 36.02 <sup>ab</sup>  | 12 720 <sup>de</sup>      |
|              | N225 | 20.66 <sup>a</sup>   | 52.32 <sup>a</sup>   | 1.90 <sup>cd</sup>   | 36.59 <sup>ab</sup>  | 14 166 <sup>cd</sup>      |
|              | N300 | 21.14 <sup>a</sup>   | 53.03 <sup>a</sup>   | 0.96 <sup>g</sup>    | 37.47 <sup>a</sup>   | 16 387 <sup>a</sup>       |
|              | N375 | 19.96 <sup>b</sup>   | 52.92 <sup>a</sup>   | 1.20 <sup>fg</sup>   | 34.70 <sup>bcd</sup> | 14 428 <sup>bc</sup>      |
| W1.0         | N150 | 17.06 <sup>f</sup>   | 48.94 <sup>f</sup>   | 2.22 <sup>bc</sup>   | 30.68 <sup>f</sup>   | 10 350 <sup>f</sup>       |
|              | N225 | 18.90 <sup>d</sup>   | 51.05 <sup>bcd</sup> | 1.70 <sup>de</sup>   | 34.22 <sup>cde</sup> | 13 725 <sup>cd</sup>      |
|              | N300 | 20.06 <sup>b</sup>   | 51.99 <sup>ab</sup>  | 1.50 <sup>ef</sup>   | 35.61 <sup>abc</sup> | 15 744 <sup>ab</sup>      |
|              | N375 | 19.26 <sup>cd</sup>  | 51.82 <sup>abc</sup> | 1.78 <sup>de</sup>   | 32.79 <sup>de</sup>  | 13 016 <sup>ede</sup>     |
| ANOVA 检验 F 值 |      |                      |                      |                      |                      |                           |
| 灌水量          |      | 216.02 <sup>**</sup> | 90.27 <sup>**</sup>  | 127.50 <sup>**</sup> | 58.69 <sup>**</sup>  | 44.98 <sup>**</sup>       |
| 施氮量          |      | 34.36 <sup>**</sup>  | 3.87 <sup>*</sup>    | 3.09                 | 14.50 <sup>**</sup>  | 24.86 <sup>**</sup>       |
| 灌水量×施氮量      |      | 10.22 <sup>**</sup>  | 8.09 <sup>**</sup>   | 14.97 <sup>**</sup>  | 2.38                 | 6.85 <sup>**</sup>        |

注: 同列不同字母表示显著性差异, \* 表示达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), \*\*表示达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 下同。

表4 春玉米各器官氮素累积量和氮收获指数显著性检验

Tab.4 Significance test of nitrogen accumulation in different organs of spring maize and N harvest index

| 项目      | 氮素累积量             |                    |                     |                   |      |                     | 氮收获指数             |
|---------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|------|---------------------|-------------------|
|         | 茎秆                | 叶片                 | 籽粒                  | 苞叶                | 穗轴   | 植株                  |                   |
| 灌水量     | 0.35              | 6.57 <sup>*</sup>  | 12.65 <sup>**</sup> | 1.06              | 1.09 | 18.76 <sup>**</sup> | 0.50              |
| 施氮量     | 3.87 <sup>*</sup> | 6.75 <sup>**</sup> | 19.88 <sup>**</sup> | 4.68 <sup>*</sup> | 2.71 | 33.18 <sup>**</sup> | 1.39              |
| 灌水量×施氮量 | 3.28 <sup>*</sup> | 3.26 <sup>*</sup>  | 3.40 <sup>*</sup>   | 1.31              | 1.84 | 5.86 <sup>**</sup>  | 3.43 <sup>*</sup> |

量有极显著性影响 ( $P < 0.01$ ); 二者的耦合作用对茎秆、叶片、籽粒的氮素累积量有显著性影响 ( $P < 0.05$ ), 对植株氮素累积量有极显著性影响 ( $P < 0.01$ )。由图3可知, 不同水氮处理下春玉米地上部氮素累积量差异很大, 各处理间植株氮素累积量的变化范围为 84.34 ~ 135.96 kg/hm<sup>2</sup>, 其中籽粒氮素累积量的变化范围为 63.80 ~ 95.30 kg/hm<sup>2</sup>, 氮收获指数的变化范围为 0.69 ~ 0.76。W0.6 和 W1.0 灌水条件下, 植株氮素累积量随着施氮量的增加先增加后减小, 并分别在 N225 和 N300 处理获得最大值, 分别为 113.74、135.96 kg/hm<sup>2</sup>; W0.8 灌水条件下, N300 和 N375 处理之间的植株氮素累积量无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 与 W1.0N300 处理无显著性差异, 但显著高于其它处理 ( $P < 0.05$ )。说明在同一灌水水平条件下, 适当的提高施氮量有利于植株氮素的总累积量, 但施氮量过高时会影响营养器官和生殖器官中的氮素累积量, 降低了植株的氮素累积量。

#### 2.4 不同水氮处理对春玉米水分利用效率及氮肥偏生产力的影响

由表5可知, 灌水量是影响耗水量 (ET) 的一个

重要因素, 灌水量越多, ET 越大。灌水量和施氮量的耦合效应对 IWUE、WUE 及 PFPN 有极显著性影响 ( $P < 0.01$ )。灌水量对耗水量有极显著性影响 ( $P < 0.01$ ), 施氮量对耗水量有显著性影响 ( $P < 0.05$ )。在 W0.6 灌水水平下, 各处理的 ET 无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), N225 处理的 IWUE 显著高于 N375 处理 ( $P < 0.05$ ); 在 W0.8 灌水水平下, N375 处理的 ET 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 在 W1.0 灌水水平下, N300 处理的 ET 显著低于 N150 和 N375 处理 ( $P < 0.05$ ), 与 N225 无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。WUE 最高的处理为 W0.8N300, 为 3.34 kg/m<sup>3</sup>, 与 W0.6N225 和 W1.0N300 相比提高了 19.71% 和 17.16%。相同灌水条件下, PFPN 随着施氮量的增加而减小, 其中产量最高处理 (W0.8N300) 对应的 PFPN 值为 54.62 kg/kg, 与 W0.6 和 W1.0 灌水条件下所对应的最高产量处理 W0.6N225 和 W1.0N300 无显著性差异。

#### 2.5 基于产量、WUE、PFPN 和籽粒氮素累积量的水氮管理方案优化

考虑试验区年际降雨量分布不均, 增加水氮管理方案优化的实用性, 因此将灌水量 + 作物生育期

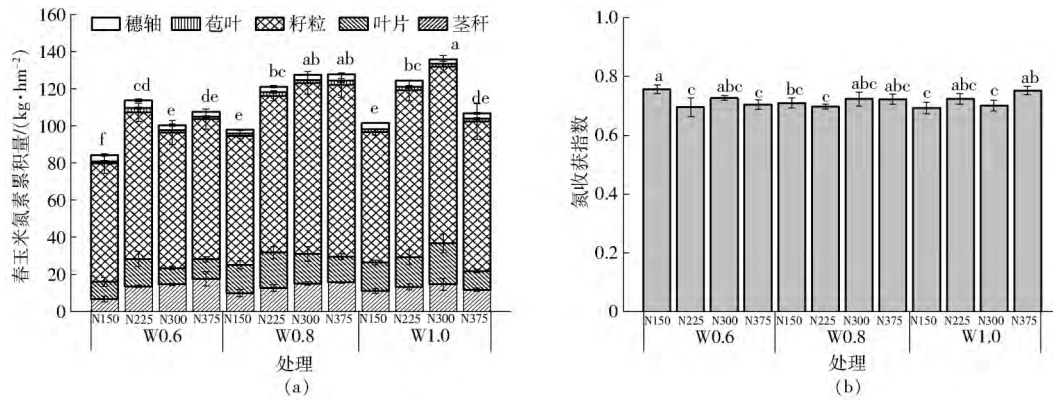


图 3 不同水氮处理对春玉米氮素累积量及氮收获指数的影响

Fig. 3 Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen accumulation of spring maize and N harvest index

表 5 不同水氮处理对水分利用效率及氮肥偏生产力的影响

Tab. 5 Effects of different water and nitrogen treatments on water use efficiency and nitrogen partial factor productivity

| 灌水量          | 施氮量  | 耗水量/mm              | 灌溉水利用效率/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 水分利用效率/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 氮肥偏生产力/(kg·kg <sup>-1</sup> ) |
|--------------|------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| W0.6         | N150 | 450 <sup>e</sup>    | 4.58 <sup>abc</sup>           | 2.57 <sup>cdef</sup>         | 77.38 <sup>b</sup>            |
|              | N225 | 458 <sup>e</sup>    | 5.07 <sup>a</sup>             | 2.79 <sup>bed</sup>          | 57.03 <sup>def</sup>          |
|              | N300 | 457 <sup>e</sup>    | 4.53 <sup>abcd</sup>          | 2.51 <sup>defg</sup>         | 38.22 <sup>g</sup>            |
|              | N375 | 465 <sup>e</sup>    | 4.07 <sup>cd</sup>            | 2.21 <sup>g</sup>            | 27.44 <sup>h</sup>            |
| W0.8         | N150 | 481 <sup>d</sup>    | 3.90 <sup>cde</sup>           | 2.64 <sup>bcd</sup>          | 84.79 <sup>a</sup>            |
|              | N225 | 488 <sup>d</sup>    | 4.34 <sup>bcd</sup>           | 2.90 <sup>b</sup>            | 62.95 <sup>cd</sup>           |
|              | N300 | 489 <sup>d</sup>    | 5.02 <sup>ab</sup>            | 3.34 <sup>a</sup>            | 54.62 <sup>ef</sup>           |
|              | N375 | 507 <sup>e</sup>    | 4.42 <sup>abcd</sup>          | 2.84 <sup>bc</sup>           | 38.47 <sup>g</sup>            |
| W1.0         | N150 | 570 <sup>a</sup>    | 2.52 <sup>g</sup>             | 1.81 <sup>h</sup>            | 68.99 <sup>c</sup>            |
|              | N225 | 561 <sup>ab</sup>   | 3.34 <sup>ef</sup>            | 2.44 <sup>efg</sup>          | 61.00 <sup>de</sup>           |
|              | N300 | 551 <sup>b</sup>    | 3.84 <sup>de</sup>            | 2.85 <sup>bc</sup>           | 52.47 <sup>f</sup>            |
|              | N375 | 567 <sup>a</sup>    | 3.17 <sup>f</sup>             | 2.29 <sup>fg</sup>           | 34.70 <sup>g</sup>            |
| ANOVA 检验 F 值 |      |                     |                               |                              |                               |
| 灌水量          |      | 45.68 <sup>**</sup> | 33.02 <sup>**</sup>           | 68.20 <sup>**</sup>          | 39.13 <sup>**</sup>           |
| 施氮量          |      | 4.71 <sup>*</sup>   | 22.11 <sup>**</sup>           | 28.56 <sup>**</sup>          | 1.32                          |
| 灌水量 × 施氮量    |      | 2.74                | 6.29 <sup>**</sup>            | 7.25 <sup>**</sup>           | 5.85 <sup>**</sup>            |

有效降雨量和施氮量为自变量,以产量、WUE、PFPN 和籽粒氮素累积量为因变量进行回归分析,结果如表 6 所示。表 6 可知,水氮投入对各因变量的影响均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ),决定系数  $R^2$  均在 0.80 以上。设定  $x$  的上下限分别为 W1.0 处理的灌水量 + 有效降雨量和 W0.6 处理的灌水量 + 有效降雨量,  $y$  的上下限分别为 N375 和 N150 处理的施氮量,运用 Matlab 分别求出表 6 中各方程的最大值,并得出获得最大值时的  $x$  和  $y$  值。

由表 6 可知,  $x$  为 555 mm,  $y$  为 285 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量最大 (15 888 kg/hm<sup>2</sup>);  $x$  为 530 mm,  $y$  为 270 kg/hm<sup>2</sup> 时, WUE 最大 (3.19 kg/m<sup>3</sup>);  $x$  为 530 mm,  $y$  为 150 kg/hm<sup>2</sup> 时, PFPN 最大 (82.21 kg/kg);  $x$  为 569 mm,  $y$  为 297 kg/hm<sup>2</sup> 时,籽粒氮素累积量最大 (93.81 kg/hm<sup>2</sup>)。可见,相同灌水施氮条件下,很难满足几个指标同时达到最大值,产量、WUE 和籽粒氮素累积量有比较接近的施氮区域,而 PFPN 与其他 3 个指标无重叠区域,因此综合评价中不考虑

PFPN。运用空间分析方法,考虑产量、WUE 和籽粒氮素累积量最大值的 95% 置信区间的可接受性,结果如图 4 所示(图中红点代表实测值,蓝色区域分别代表产量、WUE 和籽粒氮素累积量最大值 95% 的置信区间和氮肥偏生产力最大值 60% 的置信区间),当  $x$  为 506 ~ 576 mm,  $y$  为 230 ~ 335 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量、WUE 和籽粒氮素累积量均能同时达到最大值的 95% 以上,所得的 PFPN 约为最大值的 80%。

### 3 讨论

已有研究表明,水和氮是作物生长必需的主要元素,氮素更是作物生长需求量最多的营养元素<sup>[29]</sup>,氮素吸收量直接影响作物干物质的积累和产量<sup>[30]</sup>,这种影响反映到 Logistic 模型上为对应参数的变化<sup>[22]</sup>。本研究发现,Logistic 函数对本试验单一处理的地上部干物质累积量具有较高的拟合度,这与前人研究结果基本一致<sup>[31]</sup>。另外拟合结果表明,与低灌水 (W0.6) 和中灌水 (W0.8) 相比,高灌

表6 水氮供应与春玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和籽粒氮素累积量的回归关系

Tab.6 Regression equations between water and nitrogen inputs and spring maize yield, water use efficiency, nitrogen partial factor productivity and grain nitrogen accumulation

| 因变量           | 回归方程  | $R^2$ | $P$        |
|---------------|---|-------|------------|
| 产量 $Z_1$      | $Z_1 = -84\ 580.7 + 346.799x - 0.3453x^2 + 28.941y + 0.12918xy - 0.1764y^2$ | 0.88  | $P < 0.01$ |
| 水分利用效率 $Z_2$  | $Z_2 = -18.4 + 0.0786x - 0.000081x^2 + 0.00538y + 0.000027xy - 0.000036y^2$ | 0.89  | $P < 0.01$ |
| 氮肥偏生产力 $Z_3$  | $Z_3 = -217.8 + 1.3438x - 0.0013x^2 - 0.4949y + 0.00049xy + 0.000081y^2$    | 0.98  | $P < 0.01$ |
| 籽粒氮素累积量 $Z_4$ | $Z_4 = -331.25 + 1.2186x - 0.0011x^2 + 0.524y + 0.000038xy - 0.000092y^2$   | 0.84  | $P < 0.01$ |

注:  $x$  代表灌水量 + 有效降雨量 (mm)  $y$  代表施氮量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

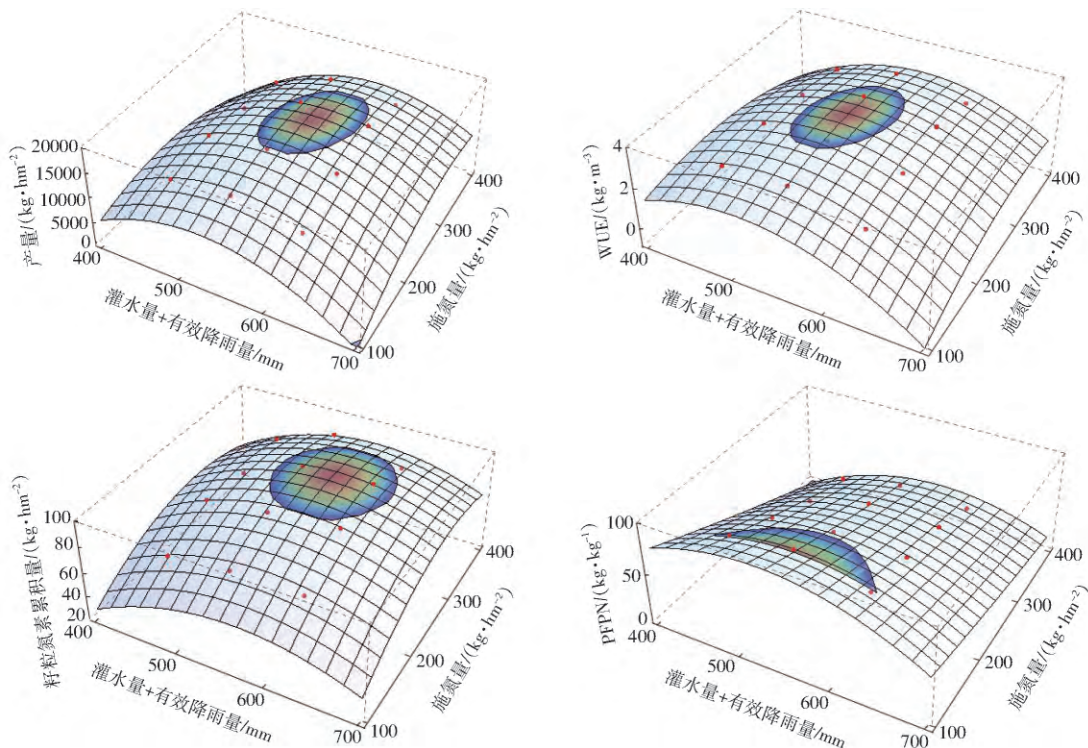


图4 产量、水分利用效率、肥料偏生产力、籽粒氮素累积量与灌水量 + 有效降雨量和施氮量的关系

Fig.4 Relationships between yield, water use efficiency, grain nitrogen accumulation, nitrogen partial factor productivity and irrigation amount plus effective rainfall and fertilizer application rate

水处理 (W1.0) 会推迟干物质快速积累期的起点, 相同灌水条件下, 地上部干物质累积量随着施氮量的增加先增后减小。郭丙玉等<sup>[1]</sup> 得出适宜的灌水量和施氮量能显著增加作物地上部干物质累积量和产量, 玉米氮素累积量随灌水量、施氮量的增加而增加, 产量与施氮量呈抛物线形关系。刘洋等<sup>[30]</sup> 得出玉米产量和氮素吸收量随施氮量增加呈增加趋势, 但施氮量增加到一定范围时, 产量差异不显著。王平等<sup>[6]</sup> 得出  $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$  和  $290 \text{ kg}/\text{hm}^2$  施氮量下的玉米产量无显著差异, 氮素累积量随施氮量的增加呈先增加后减小的趋势, 并在施氮量为  $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时获得最大值。本研究结果与之不完全相似。本研究中水氮耦合对氮收获指数有显著性影响 ( $P < 0.05$ ), 试验年氮收获指数的变化范围为  $0.69 \sim 0.76$ , 进一步说明了玉米吸收的养分主要用于形成籽粒, 提高产量; 相同灌水条件下, 产量和植株氮素

累积量随着施氮量的增加先增加后减小 (W0.8N300 与 W0.8N375 处理的氮素累积量无显著性差异), 其中 W0.8N300 处理产量最高, 为  $16\ 387 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , W1.0N300 处理籽粒氮素累积量最高, 为  $135.96 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 说明在相同灌水条件下, 适当地提高施氮量有利于作物产量和氮素的吸收, 但施氮量过高则会影响作物的生长和氮素的吸收, 反而不利于产量的形成。

另外, 本文试验结果表明, 灌水量是影响 ET 变化的一个重要因素, 两者呈正相关关系; 相同灌水条件下, PPFPN 与施氮量呈反比, WUE 随着施氮量的增加先增加后减小, 这与张富仓等<sup>[32]</sup> 研究结果相似。在优化水氮管理方案时, 考虑到试验区年际降雨量分布不均, 为提高水氮管理优化结果的适用性, 进一步分析春玉米产量、WUE、PPFPN 和籽粒氮素累积量与灌水量 + 有效降雨量和施氮量之间的关系, 由于



PFPN 受水氮影响的规律与其他 3 个指标的规律完全相反,并无重叠区域。在优化水氮管理方案时不考虑 PFPN。考虑产量、WUE 和籽粒氮素累积量三者最大值 95% 置信区间的可接受性,得出当灌水量与有效降雨量之和为 506 ~ 576 mm,施氮量为 230 ~ 335 kg/hm<sup>2</sup>时,产量、WUE 和籽粒氮素累积量均能同时达到最大值的 95% 以上,优化区间所得的 PFPN 约为最大值的 80%。但本研究不足之处在于该研究只进行了 1 年的试验,结果的可靠性有待进一步长期的试验研究和验证。

#### 4 结论

(1) 春玉米地上部干物质累积量符合 Logistic 模型, W1.0 灌水处理推迟地上部干物质快速积累

期的起点;灌水量和施氮量对产量、植株氮素累积量、WUE 均有显著或极显著影响,灌水量对 PFPN 有极显著影响,水氮耦合作用对氮收获指数有显著性影响;相同灌水条件下,地上部干物质累积量、产量、植株氮素累积量(W0.8 处理除外)和 WUE 随施氮量的增加先增加、后减小。

(2) 考虑试验区年降雨量分配不均,基于产量、WUE、PFPN 和籽粒氮素累积量,优化水氮管理方案,得出当灌水量与有效降雨量之和为 506 ~ 576 mm、施氮量为 230 ~ 335 kg/hm<sup>2</sup>时,产量、WUE 和籽粒氮素累积量均能同时达到最大值的 95% 以上,优化区间所得的 PFPN 约为最大值的 80%,为适宜的水氮滴灌管理区间。该研究成果对宁夏沙土地区春玉米滴灌水氮管理具有重要指导意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 郭丙玉,高慧,唐诚,等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3679 - 3686.  
GUO Bingyu, GAO Hui, TANG Cheng, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3679 - 3686. (in Chinese)
- [2] 张建云,王奇,夏学智. 宁夏农垦耕地土壤类型与分布规律[J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(10): 105 - 109.  
ZHANG Jianyun, WANG Qi, XIA Xuezh. Soil classes and distribution regularity of farmland in Ningxia agricultural reclamation area[J]. Ningxia Journal of Argi. and Fores. Sci. & Tech., 2012, 53(10): 105 - 109. (in Chinese)
- [3] TANG L S, LI Y, ZHANG J H. Partial root zone irrigation increases water use efficiency, maintains yield and enhances economic profit of cotton in arid area[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1527 - 1533.
- [4] BADR M A, HUSSEIN S D A, ELTOHAMY W A, et al. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands[J]. Gesunde Pflanzen, 2010, 62(1): 11 - 19.
- [5] MAN J G, YU J S, WHITE P J, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 26 - 37.
- [6] 王平,陈新平,张福锁,等. 不同水氮处理对棉田氮素平衡及土壤硝态氮移动的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 946 - 955.  
WANG Ping, CHEN Xinping, ZHANG Fusuo, et al. Effects of different irrigation and fertilization strategies on nitrogen balance and soil nitrate movement of high-yield cotton system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(5): 946 - 955. (in Chinese)
- [7] KRESOVIC B. Irrigation as a climate change impact mitigation measure: an agronomic and economic assessment of maize production in Serbia[J]. Agricultural Water Management, 2014, 139(3): 7 - 16.
- [8] HU H Y, NING T Y, LI Z J, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China[J]. Field Crops Research, 2013, 142: 85 - 94.
- [9] LIU C A, ZHOU L M, JIA J J, et al. Maize yield and water balance is affected by nitrogen application in a film-mulching ridge-furrow system in a semiarid region of China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 52: 103 - 111.
- [10] SRIVASTAVA R K, PANDA R K, CHAKRABORTY A, et al. Enhancing grain yield, biomass and nitrogen use efficiency of maize by varying sowing dates and nitrogen rate under rainfed and irrigated conditions[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 339 - 349.
- [11] KAUR R, ARORA V K. Deep tillage and residue mulch effects on productivity and water and nitrogen economy of spring maize in north-west India[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 724 - 731.
- [12] TEIXEIRA E I, GEORGE M, HERREMAN T, et al. The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resource-use efficiencies for radiation, water and nitrogen[J]. Field Crops Research, 2014, 168: 109 - 118.
- [13] GHEYSARI M, MIRLATIFI S M, BANNAYAN M, et al. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 809 - 821.
- [14] GHEYSARI M, LOESCHER H W, SADEGHI S H, et al. Water-yield relations and water use efficiency of maize under nitrogen fertigation for semiarid environments: experiment and synthesis[J]. Advances in Agronomy, 2015, 130: 175 - 229.
- [15] 邢英英,张富仓,吴立峰,等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 110 - 121.  
XING Yingying, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip

- fertigated system based on tomato yield , quality , water and fertilizer use efficiency [J]. Transactions of the CSAE , 2015 , 31( Supp. 1) : 110 – 121. ( in Chinese)
- [16] WANG H D , WU L F , CHENG M H , et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield , water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang , China [J]. Field Crops Research , 2018 , 219: 169 – 179.
- [17] WANG H D , LI J , CHENG M H , et al. Optimal drip fertigation management improves yield , quality , water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber [J]. Scientia Horticulturae , 2019 , 243: 357 – 366.
- [18] THOMPSON T L , DOERGE T A , GODIN R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: II . Agronomic , economic , and environmental outcomes [J]. Soil Science Society of America Journal , 2000 , 64( 1) : 412 – 418.
- [19] 邹海洋 张富仓 张雨新 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量 [J]. 农业工程学报 , 2017 , 33( 21) : 145 – 155.  
ZOU Haiyang , ZHANG Fucang , ZHANG Yuxin , et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China [J]. Transactions of the CSAE , 2017 , 33( 21) : 145 – 155. ( in Chinese)
- [20] 范军亮 张富仓 吴立峰 等. 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价 [J]. 农业工程学报 , 2016 , 32( 12) : 96 – 101.  
FAN Junliang , ZHANG Fucang , WU Lifeng , et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank [J]. Transactions of the CSAE , 2016 , 32( 12) : 96 – 101. ( in Chinese)
- [21] RICHARD G , ALLEN L S P , DIRK R , et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations , 1998.
- [22] SEPASKHAH A R , FAHANDEZH-SAAD I S , ZAND-PARSA S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management [J]. Agricultural Water Management , 2011 , 99( 1) : 51 – 57.
- [23] 张雨新 张富仓 邹海洋 等. 生育期水分调控对甘肃河西地区滴灌春小麦氮素吸收和利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 , 2017 , 23( 3) : 597 – 605.  
ZHANG Yuxin , ZHANG Fucang , ZOU Haiyang , et al. Effects of soil water regulation at different growing stages on nitrogen uptake and utilization of spring wheat in the Hexi Region , Gansu Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer , 2017 , 23( 3) : 597 – 605. ( in Chinese)
- [24] EBERBACH P , PALA M. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in Northern Syria [J]. Plant and Soil , 2005 , 268( 1) : 195 – 208.
- [25] OWEIS T Y , FARAHANI H J , HACHUM A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria [J]. Agricultural Water Management , 2011 , 98( 8) : 1239 – 1248.
- [26] 陈静 王迎春 李虎 等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响 [J]. 中国农业科学 , 2014 , 47( 10) : 1966 – 1975.  
CHEN Jing , WANG Yingchun , LI Hu , et al. Effects of drip fertigation with no-tillage on water use efficiency and yield of winter wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica , 2014 , 47( 10) : 1966 – 1975. ( in Chinese)
- [27] 王宜伦 李潮海 谭金芳 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究 [J]. 中国农业科学 , 2010 , 43( 15) : 3151 – 3158.  
WANG Yilun , LI Chaohai , TAN Jinfang , et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica , 2010 , 43( 15) : 3151 – 3158. ( in Chinese)
- [28] 夏方山 毛培胜 闫慧芳 等. 植物花后光合性能与物质转运的研究进展 [J]. 草地学报 , 2013 , 21( 3) : 420 – 427.  
XIA Fangshan , MAO Peisheng , YAN Huifang , et al. Photosynthetic performance and material transport of post-anthesis plants ( review) [J]. Acta Agrestia Sinica , 2013 , 21( 3) : 420 – 427. ( in Chinese)
- [29] 周昌明 李授农 谷晓博 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响 [J/OL]. 农业机械学报 , 2016 , 47( 2) : 133 – 142 , 112.  
ZHOU Changming , LI Yuannong , GU Xiaobo , et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2016 , 47( 2) : 133 – 142 , 112. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160218&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160218&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.018. ( in Chinese)
- [30] 刘洋 栗岩峰 李久生 等. 东北黑土区膜下滴灌施肥管理对玉米生长和产量的影响 [J]. 水利学报 , 2014 , 45( 5) : 529 – 536.  
LIU Yang , LI Yanfeng , LI Jiusheng , et al. Effects of nitrogen management on the growth and yield of mulched and drip-irrigated maize in Northeast Black Soil Regions [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2014 , 45( 5) : 529 – 536. ( in Chinese)
- [31] HUANG C D , LIU Q Q , LI H P , et al. Optimised sowing date enhances crop resilience towards size-asymmetric competition and reduces the yield difference between intercropped and sole maize [J]. Field Crops Research , 2018 , 217: 125 – 133.
- [32] 张富仓 严富来 范兴科 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响 [J]. 农业工程学报 , 2018 , 34( 22) : 111 – 120.  
ZHANG Fucang , YAN Fulai , FAN Xingke , et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigated spring maize in Ningxia [J]. Transactions of the CSAE , 2018 , 34( 22) : 111 – 120. ( in Chinese)