

西南季节性干旱区夏玉米水氮耦合效应与水氮生产函数研究

侯艳¹, 崔宁博^{1*}, 郭立¹, 甘永德²

(1.四川大学, 成都 610065; 2.青海大学, 西宁 810016)

摘要:【目的】探究西南季节性干旱区夏玉米关键生育期适宜的水氮耦合模式。【方法】于 2022 年 6—10 月在四川省都江堰灌溉试验站测桶区遮雨棚内开展夏玉米水氮耦合试验, 以仲玉 3 号夏玉米为研究对象, 采用桶栽方式种植夏玉米, 以充分灌水 (100%ET) 和当地高水平施氮量 (300 kg/hm²) 为对照 (CK), 在拔节—抽雄期 (II)、抽雄—灌浆期 (III) 分别设置 2 个灌水水平: HW (75%CK)、LW (50%CK) 和 3 个施氮水平: N1 (85%CK)、N2 (70%CK)、N3 (55%CK), 共计 13 个处理, 研究不同关键生育期的水氮耦合对夏玉米生长、产量、水分利用效率 (WUE)、氮肥偏生产力 (NPF_P) 的影响, 基于 Jensen 模型构建水氮生产函数。【结果】拔节—抽雄期为夏玉米营养生长的关键时期, 适宜的水氮耦合模式能在节水节氮条件下获得较高的产量并提高 WUE 和 NPF_P, II-HWN2、III-HWN1 处理和 III-HWN2 处理较 CK 分别节水 12.78%、9.77% 和 9.77%, 节氮 9.0%、4.5% 和 9.0%, 增产 1.31%、4.32% 和 4.50%, WUE 较 CK 分别提高 28.39%、14.83% 和 8.52%, NPF_P 较 CK 分别提高 11.33%、10.42% 和 8.52%; 基于 Jensen 模型构建的水氮生产函数拟合度较好 ($R^2=0.7619$), 拔节—抽雄期水氮敏感指数为 0.152, 大于抽雄—灌浆期的水氮敏感指数 0.074。【结论】从提高水肥资源利用效率和保障产量的角度出发, 推荐 II-HWN2 处理和 III-HWN2 处理为西南季节性干旱区适宜的水氮耦合模式。

关键词: 玉米; 水氮耦合; 水分利用效率; 氮肥偏生产力

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023365

侯艳, 崔宁博, 郭立, 等. 西南季节性干旱区夏玉米水氮耦合效应与水氮生产函数研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 34-40.
HOU Yan, CUI Ningbo, GUO Li, et al. The effect of water-nitrogen coupling on growth of summer maize in seasonally arid areas and water-nitrogen production function in southwestern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 34-40.

0 引言

【研究意义】玉米是我国第一大粮食作物^[1], 我国是世界上第二大玉米生产国^[2], 也是全球最大的玉米进口国^[3]。四川省是我国粮食主产区之一, 其玉米种植面积占全国玉米种植面积的 11%。四川省水资源丰富, 但降水时空分布不均, 季节性干旱频发^[4], 夏玉米关键生育期的干旱发生频率较高。水分和氮素作为作物生长发育过程中重要的生境因子, 对玉米生长和产量形成具有至关重要的作用。水分在干旱和半干旱区是制约玉米生产最重要的生态因子^[5], 施用氮素在一定程度上可降低玉米对干旱的敏感程度^[6], 对于干旱条件下作物产量有补偿作用^[7], 合理的水氮耦合模式可促进作物生长并提高产量和水氮利用效率^[8-9]。

【研究进展】国内外围绕水、氮耦合对玉米生长、产量的影响开展了大量研究, 适宜的水、氮施用量对玉

米的生长发育及产量形成具有明显的协同效应。现阶段常用的作物水分生产函数主要有 2 类, 一是反映产量和全生育期耗水量之间的关系; 二是反映产量和不同生育期耗水量的关系, 包括加法模型 (Blank 模型、Stewart 模型) 和乘法模型 (Jensen 模型、Minhas 模型)^[10-11]。周智伟等^[12]将肥料因素引入 Jensen 模型, 形成了水肥生产函数的 Jensen 模型; 孙爱华等^[13]研究水氮比对水稻产量的影响, 建立了水稻水氮生产函数的 Jensen 模型, 拟合度较高。【切入点】当前, 国内外研究主要集中在玉米全生育期水氮的交互作用, 而对于分生育期的水氮耦合效应鲜有涉及; 此外, 国内研究主要集中在北方地区, 针对西南季节性干旱区的相关研究较少。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究聚焦于西南季节性干旱区的夏玉米生长, 在夏玉米关键生育期内实施不同水氮耦合处理, 分析夏玉米生长、产量、水分利用效率 (WUE)、氮肥偏生产力 (NPF_P) 的变化规律, 并基于 Jensen 模型构建水氮生产函数, 以期得到适宜的水氮耦合模式, 为当地夏玉米的水氮优化管理提供科学依据。

收稿日期: 2023-08-13 修回日期: 2023-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900805); 四川省科技计划项目/对口科技援助 (川青) (2022YFQ0066)

作者简介: 侯艳 (1988-), 女。硕士研究生, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: 354162074@qq.com

通信作者: 崔宁博 (1981-), 男。教授, 主要从事农业绿色高效用水研究。

E-mail: cuiningbo@scu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2022 年 6—10 月在四川省都江堰灌溉试验站进行（E104°26′，N31°12′）。该区域为典型的西南季节性干旱区，海拔高程为 490 m，年降水量介于 900~950 mm，年日照时间介于 1 251~1 471.7 h。根据试验地小型气象站观测资料，2022 年最高气温为 41.32 ℃（8 月 21 日），7—8 月最高气温为 34.75 ℃。试验地土壤为典型紫色土，pH 值 7.87，有机质量 9.36 g/kg，碱解氮量 36.21 mg/kg，P₂O₅ 量 6.57 mg/kg，K₂O 量 130.0 mg/kg。

1.2 试验材料

供试玉米品种为仲玉 3 号，为四川省农科院作物所选育的品种，主要适用于四川省平坝、丘陵地区。

供试底肥为复合肥，其中 N-P₂O₅-K₂O 量的比例均为 15%，追施氮肥为尿素（含 N46%）。

1.3 试验设计

基于遮雨棚内的桶栽试验，设置生育期、灌水量和施氮量 3 个因素，以充分灌溉（100%ET）和当地高水平施氮量（300 kg/hm²）为 CK（其中 40%的 N 肥作为底肥在播种时施用，60%的 N 肥分别在拔节—抽雄期和抽雄—灌浆期按 30%等量追施），在拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期设置 2 个灌水水平：HW（75%CK）、LW（50%CK）和 3 个施氮水平：N1（85%CK）、N2（70%CK）、N3（55%CK），共计 13 个处理，试验组设置 3 个重复，对照组 CK 设置 4 个重复，试验设计如表 1 所示。

表 1 试验设计方案

Tab.1 Experiments design

处理	播种		拔节—抽雄期(II)		抽雄—灌浆期(III)	
	灌水量/(m ³ hm ⁻²)	施氮量/(kg hm ⁻²)	灌水量/(m ³ hm ⁻²)	施氮量/(kg hm ⁻²)	灌水量/(m ³ hm ⁻²)	施氮量/(kg hm ⁻²)
II-HWN1	434.0	120.0	1 696.5	76.5	1 729.0	90.0
II-HWN2	434.0	120.0	1 696.5	63.0	1 729.0	90.0
II-HWN3	434.0	120.0	1 696.5	49.5	1 729.0	90.0
II-LWN1	434.0	120.0	1 131.0	76.5	1 729.0	90.0
II-LWN2	434.0	120.0	1 131.0	63.0	1 729.0	90.0
II-LWN3	434.0	120.0	1 131.0	49.5	1 729.0	90.0
III-HWN1	434.0	120.0	2 262.0	90.0	1 296.8	76.5
III-HWN2	434.0	120.0	2 262.0	90.0	1 296.8	63.0
III-HWN3	434.0	120.0	2 262.0	90.0	1 296.8	49.5
III-LWN1	434.0	120.0	2 262.0	90.0	864.5	76.5
III-LWN2	434.0	120.0	2 262.0	90.0	864.5	63.0
III-LWN3	434.0	120.0	2 262.0	90.0	864.5	49.5
CK	434.0	120.0	2 262.0	90.0	1 729.0	90.0

夏玉米于 6 月 22 日播种，每个测桶 3 穴，每穴播 3 粒，待出苗后每个测桶保留长势均匀的玉米苗 6 株。夏玉米于 9 月 30 日收获，生育期历时 101 d，其中播种—拔节期 28 d；拔节—抽雄期 23 d；抽雄—灌浆期 17 d；灌浆—成熟期 33 d。

测桶内径 0.7 m，深 0.8 m，底部 0.2 m 为砂砾石反滤层，上覆耕植土厚 0.6 m，桶内装干土质量为 610 kg，测桶下布置全自动地下轨道称质量式小车，灌水周期为 7~10 d。根据上次灌水后至本次灌水前测桶质量变化确定 CK 每次的灌水量，再将其换算至标准单位（m³/hm²）；将当地高水平施氮量 300 kg/hm²按测桶面积换算至 CK 施氮量，再按复合肥含 N 量折算为每桶肥料用量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 株高

玉米株高采用精度为 0.01 cm 的卷尺测定，测定距离为地面至叶子自然伸直的最高处，玉米抽雄后为地面至雄穗顶的距离^[14]。每个处理固定选取 5 株玉米，株高取其平均值。

1.4.2 茎粗

玉米茎粗采用精度为 0.1 mm 的游标卡尺测定，测定位置为从地面起第 3 节中部最宽部分的直径（在叶鞘外测量）^[14]。每个处理固定选取 5 株玉米，茎粗取其平均值。

1.4.3 叶面积

玉米叶面积采用精度为 0.01 cm 的卷尺测定，沿叶片主脉量取每片叶的长度和叶片最宽处的宽度，通过累加每片叶子长宽乘积并乘以校正系数（0.75）可得到单株叶面积^[15]。

1.4.4 作物耗水量（ET_a）

ET_a由 1 次灌水周期中测桶质量变化计算得到，计算式为：

$$ET_a = \frac{1\ 000 \Delta G}{\rho \pi r^2} \quad , \quad (1)$$

式中：ET_a为作物每日实际耗水量（mm/d）；ΔG 为测桶每日质量变化（kg/d）；ρ 为水的密度（10³ kg/m³）；r 为测桶半径（m）。各生育期实际耗水量为每日耗水量之和。

1.4.5 水氮利用效率

收获时将各处理全部植株进行人工脱粒测产,于 105℃杀青 30 min, 80℃烘干至恒质量,称质量后换算为标准含水率(14%)^[16]下的产量。水分利用效率和氮肥偏生产力计算式分别为:

$$WUE = \frac{Y}{\sum ET_a}, \quad (2)$$

$$NPFP = \frac{Y}{N_a}, \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率 (kg/m^3); $NPFP$ 为氮肥偏生产力 (kg/kg); Y 为产量 (kg/hm^2); $\sum ET_a$ 为全生育期实际耗水量 (m^3/hm^2); N_a 为全生育期施氮量 (kg/hm^2)。

1.4.6 水氮生产函数

Jensen 模型是目前应用较为普遍的一种分生育期的水分生产函数,在增加氮素影响后,构建得到的水氮生产函数如下^[10]:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \times \frac{N_{ai}}{N_{mi}} \right)^{\lambda_i}, \quad (4)$$

对构建的水氮生产函数取对数可得:

$$\ln \left(\frac{Y_a}{Y_m} \right) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \times \frac{N_{ai}}{N_{mi}} \right). \quad (5)$$

令 $Y = \ln \left(\frac{Y_a}{Y_m} \right)$, $X_i = \ln \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \times \frac{N_{ai}}{N_{mi}} \right)$, 可得到线性方程 $Y = \sum_{i=1}^n \lambda_i X_i$, 本研究共考虑 4 个生育期,因此可表达为:

$$Y = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3 + \lambda_4 X_4, \quad (6)$$

式中: Y_a 为各试验处理的实际产量 (kg/hm^2); Y_m 为 CK 产量 (kg/hm^2); ET_{ai} 为第 i 阶段各处理的实际耗水量 (mm); ET_{mi} 为第 i 阶段 CK 的实际耗水量 (mm); N_{ai} 为第 i 阶段各处理的实际施氮量 (kg/hm^2);

N_{mi} 为第 i 阶段 CK 的实际施氮量 (kg/hm^2); λ_i 为模型中产量对缺水缺氮的敏感指数; i 为生育阶段。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理分析和作图,采用 SPSS 24.0 进行方差分析和多重比较,采用双向 ANOVAs 分析灌溉、施氮水平及其相互作用对测量变量的影响,用 Duncan 多重比较法进行多组样本间差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对夏玉米株高、茎粗的影响

不同处理下的夏玉米生育期内株高、茎粗变化如表 2 所示。随着生育进程的推进,夏玉米株高和茎粗先增加后减小,在抽雄—灌浆期达到峰值。株高和茎粗峰值受施氮量影响显著,受灌水量影响不显著。

除 III-LWN3 处理外, III 期各处理下的株高峰值较 CK 增加 0.97%~6.11%; 除 II-HWN2 处理外, II 期各处理下的株高峰值较 CK 减小 2.99%~22.46%。在相同生育期的同一施氮水平下,株高峰值随灌水量的增加而增加。II 期除 II-HWN3 处理外, HW 处理较 LW 处理分别提高 11.20% (N1) 和 8.10% (N2); III 期除 III-HWN2 处理外, HW 处理较 LW 处理分别提高 0.85% (N1) 和 11.97% (N3)。在相同生育期的同一灌水水平下,玉米株高峰值随施氮量的增加先增加后减小。II 期各处理中, N2 处理较 N1、N3 处理分别提高 23.36%、7.09%; III 期各处理中 N2 处理较 N1、N3 处理分别提高 2.24% 和 3.38%。

表 2 水氮耦合对夏玉米株高和茎粗的影响

Tab.2 Effect of water-nitrogen coupling on summer maize plant height and stem diameter

处理	拔节—抽雄期(II)		抽雄—灌浆期(III)		灌浆—成熟期(IV)	
	株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm	株高/cm	茎粗/mm
II-HWN1	109.67±5.84a	20.90±2.24a	200.90±16.14ab	19.88±2.08abcd	199.63±15.73ab	20.09±1.02bcd
II-HWN2	134.43±14.67a	22.68±3.68a	244.34±11.45a	22.27±0.68abc	232.00±14.86a	23.59±1.47abc
II-HWN3	115.33±17.3a	20.87±3.20ab	219.43±12.36ab	19.02±3.37bcd	210.30±13.81ab	20.81±2.35bcd
II-LWN1	104.17±7.02a	18.84±3.89b	180.67±12.93b	18.57±1.82cd	182.60±11.15b	18.13±3.61abc
II-LWN2	122.87±13.32a	19.02±1.59a	226.03±9.92ab	19.75±1.95abcd	216.90±5.79ab	19.72±3.09bcd
II-LWN3	106.20±11.20a	18.40±1.55ab	219.80±9.88ab	18.24±2.35d	212.60±14.64ab	17.93±1.59cd
CK	125.57±3.70a	21.87±1.63ab	233.00±21.79ab	22.15±2.89a	230.60±23.33ab	23.30±1.40a
W	0.039	1.354	0.807	0.652	1.086	1.062
F 值	N	2.592	4.369*	4.863*	4.134*	5.172*
W×N	0.407	0.044	0.215	1.791	0.415	0.598
III-HWN1	116.20±6.37a	18.36±1.29ab	237.00±14.30a	19.10±2.68d	218.27±18.42a	18.16±0.71d
III-HWN2	115.63±9.19a	20.97±1.93ab	235.27±12.68a	21.90±2.63abcd	222.60±25.71a	22.55±2.54ab
III-HWN3	128.03±18.06a	20.12±2.2ab	246.47±9.94a	21.27±1.78ab	223.00±14.76a	23.45±1.59ab
III-LWN1	115.70±4.59a	18.15±1.20b	235.00±16.37a	18.79±2.47abc	224.27±10.20a	18.13±1.04bcd
III-LWN2	129.73±11.68a	20.41±1.01ab	247.23±7.28a	21.39±2.20abc	226.50±23.15a	22.46±2.92ab
III-LWN3	111.87±11.47a	19.27±0.67a	220.13±14.16ab	19.14±2.29bcd	205.80±18.53ab	20.61±1.39bcd
CK	125.57±3.70a	21.87±1.63ab	233.00±21.79ab	22.15±2.89a	230.60±23.33ab	23.30±1.40a
W	0.058	0.571	0.547	0.042	0.118	1.039
F 值	N	0.651	3.932*	6.530*	0.460	1.580
W×N	3.001	0.066	1.947	0.598	7.456*	8.511*

注 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), *表示 $P<0.05$, 下同。

II 期除 II-HWN2 处理外, 其余各处理茎粗峰值较 CK 减小 10.69%~21.72%; III 期除 III-HWN3 处理外,

其余各处理茎粗峰值较 CK 减小 3.22%~19.36%。相同生育期的同一施氮水平下，茎粗峰值随灌水量的增加而增加。II 期 HW 处理较 LW 处理分别提高 8.19% (N1)、19.44% (N2) 和 14.09% (N3)；III 期 HW 处理较 LW 处理分别提高 1.65% (N1)、0.40% (N2) 和 13.78% (N3)。相同生育期内的同一灌水水平下，茎粗峰值随施氮量的增加先增加后减小，II 期各处理中，N2 处理较 N1、N3 处理分别提高 11.89%、10.82%；III 期各处理中，N2 处理较 N1、N3 处理分别提高 18.80%、2.57%。

2.2 水氮耦合对夏玉米叶面积的影响

夏玉米叶面积变化如表 3 所示，除 III 期灌水量对叶面积的影响达到显著水平外，施氮量和水氮耦合效应对叶面积的影响均不显著。相同灌水和施氮水平下，III 期各处理叶面积较 II 期提高 1.2%~25.35%。相同生育期的同一施氮水平下，叶面积随灌水量的增加而增加。II 期 HW 处理的叶面积较 LW 处理提高 1.88%~18.93%；III 期 HW 处理的叶面积较 LW 提高 17.29%~33.48%。在相同生育期内同一灌水水平下，HW 处理的叶面积与施氮水平呈正相关，LW 处理的叶面积随施氮量的增加先增加后减小。

2.3 水氮耦合对夏玉米水氮利用效率的影响

各处理下的水氮利用效率如表 4 所示。II 期各处理 WUE 受施氮量影响显著，III 期各处理 WUE 受灌水量影响显著。除 II-HWN3 处理外，各处理 WUE 较 CK 提高 5.36%~48.58%；除 III-HWN2 处理和 III-LWN2 处理外，III 期各处理 WUE 较 II 期提高 7.21%~20.67%。相同生育期内同一施氮水平下，WUE 随灌水量的增

加而减小，II 期 LW 处理 WUE 相比 HW 处理增加 7.19%~15.72%；III 期 LW 处理 WUE 比 HW 处理提高 5.31%~28.78%；相同生育期的同一灌水水平下，WUE 随施氮量的增加先增加后减小，N2 处理 WUE 较 N1 处理和 N3 处理平均提高 12.62%和 24.68%。

表 3 水氮耦合对夏玉米叶面积的影响

Tab.3 Effect of water-nitrogen coupling on summer maize leaf area

处理	拔节—抽雄期(II)/ mm ²	抽雄—灌浆期(III)/ mm ²	灌浆—成熟期(IV)/ mm ²
II-HWN1	7 005±1 647b	6 143±937ab	5 865±1 026a
II-HWN2	6 181±545ab	6 029±519b	5 586±418a
II-HWN3	5 598±2 369ab	5 649±1 368ab	5 434±849a
II-LWN1	5 890±1 317b	5 345±697ab	4 889±887a
II-LWN2	6 067±1 064ab	5 447±1 064ab	5 409±1 203a
II-LWN3	5 383±899ab	5 333±1 102ab	5 269±1 026a
CK	6 764±481ab	5 307±431ab	4 269±329a
W	0.039	0.016	0.981
F 值 N	1.229	0.904	0.224
W×N	0.480	0.621	0.481
III-HWN1	6 881±478a	7 220±393ab	6 511±709a
III-HWN2	6 652±1 061ab	7 131±1 875a	6 219±595a
III-HWN3	5 980±1 013abc	7 081±507a	6 118±1 077a
III-LWN1	5 143±639c	5 409±481ab	5 269±1 381a
III-LWN2	5 491±196bc	6 080±443ab	5 333±697a
III-LWN3	5 184±504c	5 307±253ab	5 206±633a
CK	6 764±481ab	5 307±431ab	4 269±329a
W	14.837*	4.575*	4.563*
F 值 N	0.930	0.362	0.117
W×N	0.735	2.077	0.111

表 4 水氮耦合对夏玉米产量及水氮利用率的影响

Tab.4 Effects of water-nitrogen coupling on summer maize yield and water and nitrogen utilization

处理	产量 Y(kg hm ⁻²)	ET/mm	WUE/(kg m ⁻³)	NPFP/(kg kg ⁻¹)
II-HWN1	13 019±314bcd	400±73abc	3.34±0.73de	45.44±1.1cde
II-HWN2	13 680±122ab	336±16bcde	4.07±0.19abcd	50.11±0.45ab
II-HWN3	12 434±662d	408±47abc	3.09±0.54e	47.92±2.55bc
II-LWN1	10 772±299e	302±31e	3.58±0.27bcde	37.6±1.04g
II-LWN2	12 146±974d	262±44e	4.71±0.68a	44.49±3.57cdef
II-LWN3	10 878±275e	333±50cde	3.33±0.59de	41.92±1.06f
CK	13 503±139abc	426±17a	3.17±0.15de	45.01±0.47cdef
W	51.314*	13.960*	2.164	49.737*
F 值 N	9.629*	3.755	8.075*	13.295*
W×N	0.889	0.124	0.273	0.559
III-HWN1	14 086±628a	391±43abc	3.64±0.52bcde	49.17±2.2ab
III-HWN2	14 111±464a	414±40ab	3.44±0.44cde	51.69±1.7a
III-HWN3	12 972±253bcd	384±20e	3.39±0.24cde	49.99±0.97ab
III-LWN1	12 574±700cd	292±11abcd	4.32±0.39abc	43.89±2.44def
III-LWN2	12 775±68bcd	293±43e	4.43±0.67ab	46.79±0.25bcd
III-LWN3	11 088±265e	311±20de	3.57±0.14bcde	42.73±1.02ef
CK	13 503±139abc	426±17a	3.17±0.15de	45.01±0.47cdef
W	54.258*	41.530*	8.943*	58.059*
F 值 N	17.921*	0.209	2.427	5.998*
W×N	0.570	0.852	1.334	0.925

灌水量和施氮量对 NPFP 具有显著影响。III 期各处理 NPFP 较 II 期提高 1.93%~16.73%。除 III-LWN2 处理外，HW 处理的 NPFP 较 CK 平均提高 8.98%，

LW 处理的 NPFP 较 CK 平均降低 4.68%；在相同生育期的同一施氮水平下，NPFP 随灌水量的增加而增加，II 期 HW 处理的 NPFP 比 LW 处理增加

12.63%~20.85%; III期 HW 处理的 *NPFP* 比 LW 处理增加 10.47%~16.99%。在相同生育期内同一灌水水平下, *NPFP* 随施氮量的增加先增加后减小, N2 处理的 *NPFP* 较 N1 处理和 N3 处理平均提高 10.08% 和 5.90%。

2.4 水氮耦合下夏玉米水氮生产函数

由于播种—拔节期、灌浆—成熟期未设置水氮耦合, 敏感指数为 0, 水氮生产函数主要由 II 期 (拔节—抽雄期)、III 期 (抽雄—灌浆期) 表示, 计算式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_{a2}}{ET_{m2}} \times \frac{N_{a2}}{N_{m2}} \right)^{0.152} \times \left(\frac{ET_{a3}}{ET_{m3}} \times \frac{N_{a3}}{N_{m3}} \right)^{0.074}, \quad (7)$$

式中: 0.152 和 0.074 分别为 II、III 期的敏感指数, II 期敏感指数大于 III 期, 表明夏玉米在 II 期对水氮最为敏感。

夏玉米水氮生产函数模型拟合相对产量 Y_n/Y_{ck} 与实际相对产量 Y_a/Y_{ck} 相关性分析如图 1 所示。模型拟合相对产量与实际相对产量之间的 R^2 为 0.761 9, 表示模型可以解释因变量 76.19% 的变化, 模型的解释能力较高, 拟合度较好。

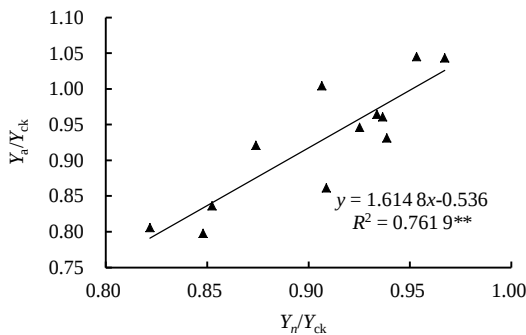


图 1 模型拟合相对产量与实际相对产量相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between model fitting relative yield and actual relative yield

3 讨论

水氮耦合是调控作物生长和产量的重要措施。前人研究表明, 玉米株高、茎粗随施氮量增加而增加^[17-18], 但灌水量较小时增加施氮量会抑制株高生长^[19], 本研究亦有相同规律。这可能是由于适合玉米生长的氮素浓度存在阈值, 低水条件下增加施氮量提高了氮素浓度。此外, 本研究施氮量对 II 期各处理株高、茎粗的影响未达到显著水平, 却在 III 期存在显著影响, 说明播种—拔节期充足的水氮供应为 II 期玉米的生长提供了持续保障, III 期随着玉米植株的增长和 8 月气温的升高 (最高气温为 41.32 °C), 玉米养分消耗量增加, 养分供应对其影响增大。

温立玉等^[20]研究表明, 充足的灌水和一定范围内增施氮肥可有效促进叶面积增长。本研究表明, 在相同生育期内, 叶面积与灌水量呈正相关, 高水条件下叶面积与施氮量呈正相关, 低水条件下叶面积随施氮量的增加先增加后减小, 与前人研究结论一致。本研

究中 LWN3 处理的叶面积最低, CK 的叶面积衰退速度和幅度较大, 说明水分胁迫或低氮无法满足叶片增长对养分的需求, 而高氮会使叶片早衰^[21]。III 期处理最终叶面积大于 II 期处理, 说明 III 期水氮耦合能延缓叶片衰老, 这与刘见等^[22]研究发现一致。

水肥调控可以提高作物水分利用效率^[23], 适当水分胁迫与合理施氮有助于作物 *WUE* 的提高^[8,24]。本研究中, *WUE* 随灌水量的增加而减小, 随施氮量的增加先增加后减小, 水氮耦合处理后的 *WUE* 均高于 CK, 说明适当的节水减氮有助于提高 *WUE*, 这与史中欣等^[25]研究结果一致。灌水量和施氮量对玉米 *NPFP* 具有显著影响, *NPFP* 随灌水量和施氮量的增加先增加后减小, 这可能是由于水分可以促进作物对养分的吸收^[26], 但过多的灌水量一方面可能导致氮素淋失^[27], 另一方面水分的稀释作用降低了氮肥浓度, 从而影响作物生长和产量。II 期各处理下的 *NPFP* 较 III 期低, 结合叶面积和产量初步判断 II 期水氮耦合在一定程度上会影响玉米叶面积生长, 降低光合作用, 从而影响产量。

本研究通过 Jenson 模型拟合了夏玉米水氮生产函数, 得到 2 个生育期的水氮敏感指数。夏玉米在拔节—抽雄期对水氮最为敏感, 在此期间的过度节水减氮对其生长会产生一定负面影响, 这与王进斌等^[28]研究结论吻合。在水氮敏感的生育期采用合理的水氮耦合模式能在牺牲部分营养生长的情况下促进生殖生长, 提高资源利用效率, II-HWN2、III-HWN1 和 III-HWN2 处理较 CK 在节水节氮的条件下保障了产量且提高了 *WUE* 和 *NPFP*。本研究在夏玉米关键生育阶段 (抽雄—灌浆期) 出现了极端高温天气, 试验结果对气候变暖背景下研究夏玉米水氮耦合效应具有探索意义, 下一步可通过调整播种期消除气候因子带来的影响。

4 结论

1) 拔节—抽雄期是玉米营养生长的关键时期, 采用适宜的水氮耦合模式可有效促进玉米株高、茎粗和叶面积增长, 延缓叶片衰老, 在节水节氮条件下获得较高的产量并提高水氮利用效率。

2) 从提高资源利用效率和保障高产的角度, 推荐 II-HWN2 和 III-HWN2 处理为西南季节性干旱区适宜的水氮耦合模式。

3) 基于 Jenson 模型建立的水氮生产函数拟合度较好 ($R^2=0.761\ 9$), 拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期的水氮敏感指数分别为 0.152 和 0.074。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1 941-1 959.
LI Shaokun, ZHAO Jiuran, DONG Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1 941-1 959.
- [2] ZHAO Jin, YANG Xiaoguang, SUN Suang. Constraints on maize yield and yield stability in the main cropping regions in China[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 99: 106-115.
- [3] 程雪琦, 陈宁远, 魏杰. 我国玉米进出口贸易的现状问题及对策[J]. 河北农业科学, 2023, 27(2): 100-103.
CHENG Xueqi, CHEN Ningyuan, WEI Jie. Current situation, problems and countermeasures of China's corn import and export trade[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2023, 27(2): 100-103.
- [4] 贾艳青, 张勃, 马彬, 等. 1960—2015 年中国西南地区持续性干旱事件时空演变特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 171-176.
JIA Yanqing, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of persistent drought in Southwest China in 1960-2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5): 171-176.
- [5] WANG W X, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance[J]. Planta, 2003, 218(1): 1-14.
- [6] 张卫星, 赵致, 柏光晓, 等. 不同玉米杂交种对水分和氮胁迫的响应及其抗逆性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1 361-1 370.
ZHANG Weixing, ZHAO Zhi, BAI Guangxiao, et al. Response on water stress and low nitrogen in different maize hybrid varieties and evaluation for their adversity-resistance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(7): 1 361-1 370.
- [7] 关军锋, 李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 59-61.
GUAN Junfeng, LI Guangmin. Effects and mechanism of fertilization under drought[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(1): 59-61.
- [8] 尚文彬, 张忠学, 郑恩楠, 等. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 49-55.
SHANG Wenbin, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Nitrogen-water coupling affects nitrogen utilization and yield of film-mulched maize under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 49-55.
- [9] XU Jiatao, CAI Huanjie, WANG Xiaoyun, et al. Exploring optimal irrigation and nitrogen fertilization in a winter wheat-summer maize rotation system for improving crop yield and reducing water and nitrogen leaching[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105 904.
- [10] 李亚龙, 崔远来, 李远华. 作物水氮生产函数研究进展[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 704-710.
LI Yalong, CUI Yuanlai, LI Yuanhua. Advancement of research on crop water-nitrogen production function[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 704-710.
- [11] 韩松俊, 刘群昌, 王少丽, 等. 作物水分敏感指数累积函数的改进及其验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 83-88.
HAN Songjun, LIU Qunchang, WANG Shaoli, et al. Improvement and verification of cumulative function of crop water sensitive index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 83-88.
- [12] 周智伟, 尚松浩, 雷志栋. 冬小麦水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型及其应用[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 280-284.
ZHOU Zhiwei, SHANG Songhao, LEI Zhidong. Jensen model and ANN model for water-fertilizer production function of winter wheat[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 280-284.
- [13] 孙爱华, 华信, 朱士江, 等. 节水灌溉水稻水氮生产函数模型试验研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11 704-11 706.
SUN Aihua, HUA Xin, ZHU Shijiang, et al. Experiments of water-nitrogen production function for rice water-saving irrigation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(33): 11 704-11 706.
- [14] 中国气象局. 农业气象观测规范 玉米: QX/T 361—2016[S]. 北京: 中国气象出版社, 2017.
- [15] 陆军胜. 滴灌水肥一体化冬小麦/夏玉米水氮效应及夏玉米氮肥供应决策研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
LU Junsheng. Research on water and nitrogen effect of winter wheat/summer maize and nitrogen fertilizer decision of summer maize under drip fertigation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [16] 张雨珊, 杨恒山, 葛选良, 等. 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对玉米根、冠物质分配与水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 129-136, 196.
ZHANG Yushan, YANG Hengshan, GE Xuanliang, et al. Effects of reduction of nitrogen and water of shallow drip irrigation on material distribution of root and canopy and utilization efficiency of water and nitrogen of maize under dense planting[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 129-136, 196.
- [17] LI Changzhen, LI Changjiang. Ridge-furrow with plastic film mulching system decreases the lodging risk for summer maize plants under different nitrogen fertilization rates and varieties in dry semi-humid areas[J]. Field Crops Research, 2021, 263: 108 056.
- [18] 翟登攀, 蒋静, 白宇龙, 等. 全膜双垄沟播条件下施氮量对玉米耗水特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 24-30.
ZHAI Dengpan, JIANG Jing, BAI Yulong, et al. Nitrogen applications affect water consumption and yield of maize grown in double-furrowed raised bed with full film mulch[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 24-30.
- [19] 孙云云, 刘方明, 高玉山, 等. 吉林西部膜下滴灌水氮调控对玉米生长及水肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 76-82.
SUN Yunyun, LIU Fangming, GAO Yushan, et al. Regulating water and fertilizer application in film-mulched drip irrigation to improve growth and water-fertilizer utilization of maize in western Jilin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 76-82.
- [20] 温立玉, 宋希云, 刘树堂. 水肥耦合对夏玉米不同生育期叶面指数和生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(21): 89-94.
WEN Liyu, SONG Xiyun, LIU Shutang. Effect of water and fertilizer coupling on foliar index and biomass at different growth stages of summer maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(21): 89-94.
- [21] 吕丽华, 赵明, 赵久然, 等. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2 624-2 632.
LYU Lihua, ZHAO Ming, ZHAO Jiuran, et al. Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2 624-2 632.
- [22] 刘见, 宁东峰, 秦安振, 等. 氮肥减量后移对喷灌玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 42-49.
LIU Jian, NING Dongfeng, QIN Anzhen, et al. Impacts of reducing and delaying nitrogen application on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize under sprinkler fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 42-49.
- [23] 聂灵杰. 水氮耦合对玉米水分利用效率的影响[J]. 甘肃农业科技, 2016(4): 36-39.
NIE Lingjie. Effect of water and nitrogen coupling on water use efficiency of corn[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2016(4): 36-39.
- [24] 张忠学, 张世伟, 郭丹丹, 等. 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 206-214.
ZHANG Zhongxue, ZHANG Shiwei, GUO Dandan, et al. Coupling

- effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 206-214.
- [25] 史中欣, 柴强, 杨彩虹, 等. 带型配置及施氮量对玉米间作豌豆产量和水分利用效率的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 39-43. SHI Zhongxin, CHAI Qiang, YANG Caihong, et al. Effects of different nitrogen applications and intercropping stripe compound on yield and WUE under maize/pea intercropping[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(1): 39-43.
- [26] 陈星, 李亚娟, 刘丽, 等. 灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 283-290. CHEN Xing, LI Yajuan, LIU Li, et al. Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(2): 283-290.
- [27] GUO Jingheng, LIU Xuejun, ZHANG Ying, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1 008-1 010.
- [28] 王进斌, 李玲玲, 谢军红, 等. 耕作措施和氮肥用量对陇中旱农区粮饲兼用玉米光合特性与水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(6): 802-811. WANG Jinbin, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on photosynthetic characteristics and water use efficiency of grain and forage maize in dry farming areas of central Gansu in China[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(6): 802-811.

The effect of water-nitrogen coupling on growth of summer maize in seasonally arid areas and water-nitrogen production function in southwestern China

HOU Yan¹, CUI Ningbo^{1*}, GUO Li¹, GAN Yongde²

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: 【Objective】 Water and nitrogen are two most important factors affecting crop growth. Their acquisitions by crops interactively affect by each other. The purpose of this paper is to study the interactive effect of water-nitrogen coupling on development of summer maize during its key growing stages in seasonally arid areas in southwestern China. 【Method】 The experiment was conducted from June to October 2022 using lysimeters inside a rain-shelter at Dujiangyan Irrigation Experimental Station in Sichuan province. The variety Zhongyu No.3 was used as the model plant, and the control (CK) was irrigation of 100% of evapotranspiration (ET) combined with 300 kg/hm² of nitrogen fertilization as used by local farmers. There were two irrigation treatments by irrigating 75% (HW) and 50% (LW) of the water used in the CK, and three nitrogen treatments by fertilizing 85% (N1), 70% (N2) and 55% (N3) of the fertilizer used in the CK at jointing-tasseling stage (II) and tasseling-filling stage (III), respectively. In each treatment, we measured the changes in growth, yield, water use efficiency (WUE) and nitrogen partial productivity (NPPF) of the maize at its key growing stages. The production function of the water and nitrogen was calculated using the Jensen model. 【Result】 The jointing-tasseling stage was the key stage for vegetative growth of the maize. A suitable water-nitrogen coupling can increase the yield, WUE and NPPF of the crop. Compared with CK, the combinations II+HW+N2, III+HW+N1 and III+HW+N2 saved 12.78%, 9.77% and 9.77% of water, and 9.0%, 4.5% and 9.0% of nitrogen, respectively, while increasing grain yield by 1.31%, 4.32% and 4.50%, WUE by 28.39%, 14.83% and 8.52%, and NPPF by 11.33%, 10.42% and 8.52% respectively. The water-nitrogen production function was well described by the Jensen model with the R^2 being 0.761 9. The sensitivity index of water-nitrogen coupling at jointing-tasseling stage was 0.152, higher than 0.074 at the tasseling-filling stage. 【Conclusion】 Our results showed that the combinations II+ HW+N2 and III+ HW+N2 are optimal for maintaining high yield yet improving water and nitrogen use efficiency of the maize. They can be used as an improved irrigation and fertilization for maize production in the studied region and its periphery. The water-nitrogen production function is well described by the Jensen model.

Key words: maize; water-nitrogen coupling; water use efficiency; nitrogen partial productivity

责任编辑: 韩 洋