

# 适宜水氮互作提升膜下滴灌瓜尔豆产量品质与水氮利用效率

王振华<sup>1,2,3,4</sup>, 任孔聚<sup>1,2,3,4</sup>, 尹飞虎<sup>1,4,5</sup>, 马占利<sup>1,2,3,4</sup>, 陈朋朋<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 石河子 832000;  
3. 兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心, 石河子 832000; 4. 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室, 石河子 832000;  
5. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 石河子 832000)

**摘要:** 瓜尔豆是一种重要的经济作物, 因其种子中含有大量的瓜尔胶而具有重要的经济和工业价值。为探究适合新疆地区膜下滴灌瓜尔豆的水氮管理模式, 设置4个灌水水平(W1: 1 170 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W2: 1 530 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W3: 1 890 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W4: 2 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)和2个施氮量水平(N1: 30 kg/hm<sup>2</sup>、N2: 50 kg/hm<sup>2</sup>), 研究膜下滴灌条件下水氮互作对瓜尔豆生长指标、产量、水氮利用效率及品质的影响。结果表明, 新疆干旱区绿洲种植瓜尔豆具有可行性, 膜下滴灌水肥一体化处理下水氮耦合效应对瓜尔豆产量、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力及半乳甘露聚糖含量影响极显著( $P < 0.01$ )。在W1~W3灌水条件下, 增施氮肥能有效提高作物单株质量及千粒质量, 从而最终提高作物产量。基于主成分分析及隶属函数分析得出灌水量为1 890 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 施氮量为50 kg/hm<sup>2</sup>(W3N2)水氮组合模式为最优处理。研究可为促进新疆干旱区绿洲膜下滴灌瓜尔豆高产、高水、氮利用效率提供理论依据。

**关键词:** 灌溉; 氮; 主成分分析; 高产; 瓜尔豆; 隶属函数分析; 膜下滴灌

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403089

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0091-10

王振华, 任孔聚, 尹飞虎, 等. 适宜水氮互作提升膜下滴灌瓜尔豆产量品质与水氮利用效率[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 91-100. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403089 <http://www.tcsae.org>

WANG Zhenhua, REN Kongju, YIN Feihu, et al. Yield quality and water and nitrogen use efficiency of guar beans under mulched drip irrigation in response to water and nitrogen interactions in arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 91-100. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403089 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

瓜尔豆(*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) *taubert*)原产于热带亚洲或非洲, 它具有耐旱和耐贫瘠的特性, 能够增加土壤的肥力, 并且非常适合机械化耕种<sup>[1]</sup>。瓜尔豆是一种用途广泛的工业原料作物, 其主要产物瓜尔胶是目前国际上最为廉价而又广泛应用的亲水胶体之一, 主要用于石油开采业, 配制成水基压裂液, 能增加含油地层的渗透性, 对提高石油产量有显著效果。此外, 瓜尔胶广泛应用在造纸、纺织、食品、香料、药物及矿冶工业上, 具有良好的社会效益和经济效益<sup>[2-3]</sup>。瓜尔豆在中国种植已有数十年历史, 广东、海南、四川、湖南、云南等地均是适宜栽培瓜尔豆的较好地区<sup>[4-5]</sup>。新疆地区光热资源丰富、昼夜温差大, 其水土环境和温热条件与瓜尔豆原产地极为相似, 具有生产、栽培瓜尔豆独特的地理优势<sup>[6]</sup>, 具有广阔的综合利用和开发前景, 但迄今在新疆地区瓜尔豆的种植推广相对较少。

灌水和施氮作为灌溉策略中最重要的两大因素, 探究水氮互作对瓜尔豆的影响对进一步推动新疆地区农业

节水增效至关重要。新疆地区无霜期长, 冬季气候严寒, 夏季干旱少雨, 属于典型的温带大陆性气候。因此, 水资源短缺成为限制新疆农业发展的一个重要因素<sup>[7]</sup>。为了保障新疆农业可持续发展, 提高灌溉水的利用效率, 自20世纪90年代以来, 新疆生产建设兵团创制了膜下滴灌技术<sup>[8]</sup>, 迄今已应用了27 a<sup>[9]</sup>, 应用面积已超过350万hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。膜下滴灌技术具有节水、高效, 提高作物产量和品质的优点<sup>[11]</sup>。然而, 新疆灌溉水有效利用系数、粮食水分生产率等较节水先进国家仍有较大差距<sup>[12]</sup>, 且农业用水量占比较大, 亟需进一步挖掘农业节水潜力<sup>[13]</sup>。氮在植物代谢中起着重要的作用, 是多种代谢活性物质的重要组成成分, 并且是细胞、蛋白质和酶的主要结构成分<sup>[14]</sup>。因此, 氮素对作物的生长、产量和品质同样起到重要作用<sup>[15]</sup>。然而, 氮素不合理利用不仅造成肥料浪费和利用效率低, 还会导致土壤板结、盐碱化等生态问题, 进而对作物产量和品质产生负面影响<sup>[16-18]</sup>。尤其对新疆这个盐碱地分布广泛、生态环境脆弱的地区而言, 合理控制施肥量尤其重要<sup>[19]</sup>。

目前针对瓜尔豆的研究主要集中在水分胁迫及种植方式方面<sup>[20-22]</sup>, 关于水氮互作的研究较少。因此, 本研究设置膜下滴灌下不同水氮组合处理, 探究瓜尔豆生长、产量和水氮利用效率对水氮互作的响应, 旨在为新疆干旱区绿洲节水省肥、高产高效的瓜尔豆栽培技术提供理论支撑, 进一步推动新疆绿洲农业可持续发展。

收稿日期: 2024-03-13 修订日期: 2024-09-14

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目“西北绿洲农业精量微灌水肥协同调控技术集成与应用(2022YFD1900405)”

作者简介: 王振华, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉理论与技术。Email: wzh2002027@163.com

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年 6—9 月在现代节水灌溉兵团重点实验室暨石河子大学节水灌溉试验站 (86°03'47"E, 44°18'28"N, 海拔为 450.8 m) 进行, 地处西北内陆干旱区, 蒸发量大。多年平均日照时数 2 850 h, 多年平均降水量在 205 mm。2023 年瓜尔豆生育期间气象数据如图 1 所示。试验前茬种植作物为番茄, 试验田地下水埋深在 8 m 以下, 土壤质地为中壤土, 小于 0.01 mm 粒径的土壤物理质量分数大于 21%, 0~100 cm 土壤平均容重为 1.48 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量为 14.4% (质量分数)。

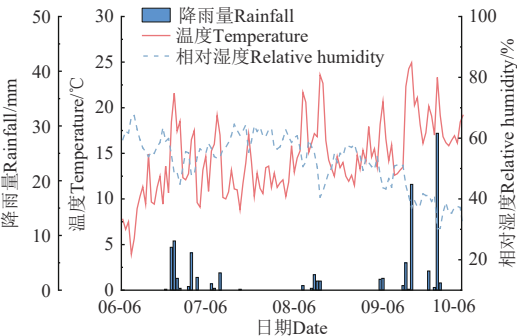


图 1 2023 年瓜尔豆生育期间气象数据  
Fig.1 Meteorological data during the growth period of guar bean in 2023

1.2 试验设计及试验过程

瓜尔豆于 6 月 6 日进行人工穴播, 10 月 2 日进行成熟期采收, 全生育期 118 d (表 1)。种植模式 (图 2) 为“1 膜 2 管 4 行”, 覆 1.45 m 宽聚乙烯普通塑料地膜; 播种前小区内预设 2 条滴灌带, 滴灌带间距 70 cm, 在滴灌带两侧 10 cm 处各播一行, 穴距 15 cm。为减小各处理间的相互影响, 各小区间隔 70 cm。

表 1 瓜尔豆生育期灌溉施肥方案

Table 1 Irrigation and fertilization scheme of guar bean growth period				
生育期 Growth period	日期 Date	施肥灌水 Irrigation and fertilization		
		周期 Cycle/d	比例 Proportion/%	次数 times
苗期 Seedling	06-06-06-26	20	20	1
盛花期 Blooming	06-27-07-11	15	20	1
盛荚期 Pod	07-12-08-01	20	20	1
鼓粒期 Seed filling	08-02-08-16	15	20	1
成熟期 Mature	08-17-10-02	47	20	1
全生育期 Whole	06-06-10-02	117	100	5

灌溉制度 (表 1) 参考当地生产实践及其他学者研究<sup>[14,22]</sup>。试验共设置 W1 (1 170 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、W2 (1530 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、W3 (1890 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 和 W4 (2250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 4 个灌溉水平, N1 (30 kg/hm<sup>2</sup>) 和 N2 (50 kg/hm<sup>2</sup>) 2 个施氮水平, 采用完全随机组合设计, 共计 8 个处理, 每个处理设置 3 个重复, 共 24 个重复, 即 24 个小区。每个试验小区面积为 8.7 m<sup>2</sup> (6 m×1.45 m), 磷肥和钾

肥施肥水平为 40-25 kg/hm<sup>2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)。滴灌施肥设备包括蓄水池、施肥罐、旋翼式水表以及输送管道系统。使用来自深层地下水的水进行灌溉, 灌溉水中的矿化度约为 1.35 g/L。试验肥料为尿素 (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, 氮质量分数为 46.4%)、磷酸一铵 (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 磷酸二氧化物质量分数为 60.5%) 和氯化钾 (KCl, 氧化钾质量分数为 57%)。试验区内的除草、打药等田间管理措施均一致。

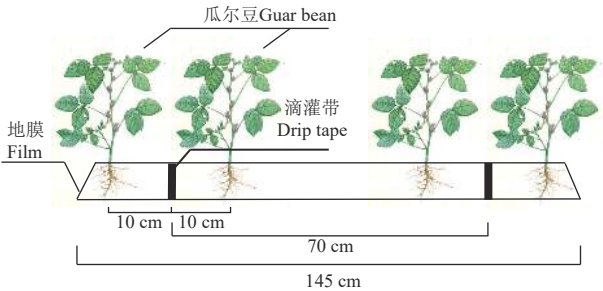


图 2 瓜尔豆种植模式  
Fig.2 Guar bean planting mode

1.3 项目测定与方法

1.3.1 生长指标、产量及品质

1) 株高、茎粗测定: 分别于苗期、盛花期、盛荚期和鼓粒期对瓜尔豆的株高、茎粗进行测量, 每个小区随机选取 3 株进行标记, 从植株基部用卷尺测量株高, 用游标卡尺读取植株距离表层土 2 cm 处的茎粗。

2) 产量测定: 在瓜尔豆成熟收获期, 每个小区全部收获豆荚, 进行脱粒, 测定产量及千粒质量。每个小区选择 9 株长势均匀的植株, 以单株计, 测其单株荚数、单株荚质量、单株粒数、单株粒质量和单株产量。

3) 品质测定: 瓜尔豆中的半乳甘露聚糖、可溶性糖、多糖和淀粉含量分别采用高效液相色谱法、蒽酮比色法、硫酸苯酚法测定<sup>[23]</sup>。

1.3.2 灌溉水分利用效率及氮肥偏生产力

1) 灌溉水利用效率

$$I_{WUE}=Y/I \tag{1}$$

式中  $Y$  为相应处理瓜尔豆产量, kg/hm<sup>2</sup>;  $I$  为相应处理灌溉水量, m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;  $I_{WUE}$  为灌溉水利用效率, kg/m<sup>3</sup>。

2) 氮肥偏生产力

$$S_{PPFN}=Y/F \tag{2}$$

式中  $F$  为相应处理施氮量, kg/hm<sup>2</sup>;  $S_{PPFN}$  为氮肥偏生产力, kg/kg。

3) 收获指数

$$S_{HI}=Y/Y_B \tag{3}$$

式中  $S_{HI}$  为收获指数;  $Y_B$  为作物在整个生育过程中所积累的有机物质的总量, kg/hm<sup>2</sup>。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 整理计算数据, 使用 Origin 2022 进行作图, 采用 IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析、主成分分析和隶属函数分析。利用主成分分析和隶属函数对 8 个水氮处理进行综合评价。隶属函数

值计算公式如下<sup>[24]</sup>:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{4}$$

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{5}$$

式中  $U(X_i)$  表示某指标的隶属函数值;  $X_i$  表示该指标的测定值;  $X_{\max}$  表示该指标的最大值;  $X_{\min}$  表示该指标的最小值。若测定指标与瓜尔豆质量呈正相关关系, 则选择式 (4) 计算; 若呈负相关关系, 则选择式 (5) 计算。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对瓜尔豆生长的影响

2.1.1 水氮互作对瓜尔豆株高和茎粗的影响

瓜尔豆株高和茎粗随瓜尔豆生育期推进逐渐增大 (图 3)。株高的增幅以盛荚期最大, 平均为 1.182 cm/d; 茎粗的增幅以盛花期最大, 平均为 0.157 mm/d; 进入鼓粒期, 瓜尔豆株高和茎粗日增长量逐渐降低。在鼓粒期, 灌水量对瓜尔豆株高和茎粗的影响均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

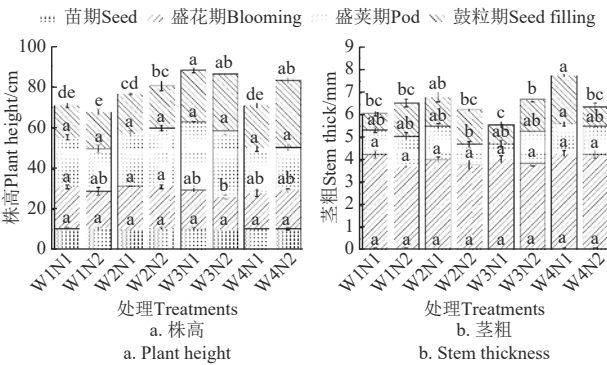


图 3 不同水氮处理对瓜尔豆株高和茎粗的影响  
Fig.3 Effects of different drip nitrogen treatments on plant height and stem diameter of guar bean

在瓜尔豆鼓粒期时, 相同施氮水平下, 瓜尔豆株高随灌水量增大先增大后减小, 在 W3 水平下达到最大; 其中 W3N1 与 W1N1、W2N1 和 W4N1, W3N2 与 W1N2 均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。W3 水平下瓜尔豆株高较其他灌水水平增加 1.57%~28.8%。相同施氮量下瓜尔豆茎粗基本随灌水量增大而增大, 其中以 W4N1 处理茎粗最大, 与除 W2N1 处理外的其他处理均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。在瓜尔豆整个生育期内, 施氮量及施氮量与灌水量的交互作用均未对株高和茎粗有显著性影响 ( $P > 0.05$ )。

2.1.2 水氮互作对瓜尔豆干物质积累量的影响

新疆干旱区绿洲膜下滴灌水肥一体化处理下灌水量对瓜尔豆单株干物质积累量存在极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 施氮量及施氮量与灌水量的交互作用对单株干物质积累量无显著影响 ( $P > 0.05$ ) (表 2)。瓜尔豆各部分干物质质量基本随灌水量增大呈现先增大后稳定趋势, 在 W3 水平下相对较高。其中, 茎干物质积累量中 W3N1 与 W1N1、W1N2, W3N2 与 W1N1、W1N2; 根部干物质积累量中 W1N1 与 W3N1、W3N2、W4N1, W1N2 与 W3N1、W3N2、W4N1, 均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 果实干物质积累量中 W3N2、W4N1、W4N2 均与 W1N2、W1N2、W2N1、W2N2 处理间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。W3 水平下瓜尔豆茎、果及根干物质积累量达到较大值, 与 W4 灌水水平差异不显著, 较 W1、W2 灌水水平显著增加 175.69%、33.70%; 196.67%、143.39% 及 44.22%、9.05% ( $P < 0.01$ )。瓜尔豆单株干物质积累量在 W3N2 处理下获得最大值, 与 W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 及 W4N2 均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 较这些处理增加 16.32%~148.82% ( $P < 0.05$ )。W1N1~W4N1 处理下根冠比差异不显著, 但 W2N2 处理显著高于 W4N2 处理 ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同水氮处理对鼓粒期瓜尔豆干物质积累量的影响

Table 2 Effects of different water and nitrogen treatments on dry matter accumulation of guar bean at seed filling stage

处理 Treatments	叶 Leaf/g	茎 Stem/g	果 Fruit/g	根 Root/g	单株积累量 Accumulation per plant/g	根冠比 Root-shoot ratio
W1N1	1.57±0.71a	2.24±0.68b	3.84±1.57c	5.44±0.32b	13.09±1.32d	0.09±0.02ab
W1N2	1.58±0.41a	2.49±1.02b	6.37±1.82b	5.36±0.63b	15.8±3.65cd	0.08±0.05ab
W2N1	1.74±0.61a	4.63±0.79ab	5.96±2.28b	7.13±2.04ab	19.46±3.59c	0.12±0.07ab
W2N2	2.10±0.28a	5.12±0.42ab	6.48±1.85b	7.15±0.91ab	21.06±1.89bcd	0.14±0.06a
W3N1	1.94±0.19a	6.43±1.96a	14.17±7.63ab	7.78±0.24a	30.32±9.56ab	0.07±0.03ab
W3N2	2.05±0.36a	6.61±1.23a	16.1±5.15a	7.80±0.49a	32.57±6.19a	0.06±0.02ab
W4N1	1.63±0.62a	5.32±2.16ab	14.90±5.55a	7.62±1.56a	29.47±5.71ab	0.07±0.02ab
W4N2	1.65±0.09a	5.09±0.99ab	14.88±2.00a	6.78±0.99ab	28.00±4.04b	0.06±0.01b
灌水量 W	1.217ns	10.844**	10.529**	5.54**	13.904**	3.319*
施氮量 N	0.46ns	0.111ns	0.551ns	0.253ns	0.369ns	0.12ns
W×N	0.199ns	0.08ns	0.127ns	0.224ns	0.202ns	0.177ns

注: 同行数据不同小写字母表示不同部分干物质质量存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ 。  
Note: Different lowercase letters of peer data indicate that there are significant differences in dry matter quality in different parts ( $P < 0.05$ ), \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ .

2.2 水氮互作对瓜尔豆产量以及水肥利用效率的影响

新疆干旱区绿洲膜下滴灌水肥一体化处理下灌水量对单株有效花序数、单株荚数、单株荚质量和单株粒质量均存在极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 施氮量对单株荚质量、单株粒数和千粒质量均存在显著甚至极显著影响 ( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ), 水氮交互只对单株粒质量和千粒质

量影响显著 ( $P < 0.05$ )。(图 4)。

由图 4 可知, 在相同施氮水平下, 瓜尔豆单株有效花序数、单株荚数、单株荚质量及单株粒质量在灌水量处于 W1~W3 下均随灌水量增加而增加, 在 W3 水平下达到最大值。W3 处理下单株有效花序数、单株荚数、单株荚质量及单株粒质量分别较 W1 处理显著增加 154.16%、



230.41%、103.13% 和 44.14% ( $P < 0.05$ ), 较 W2 处理增大 128.15%、139.02%、23.43% 和 18.61% ( $P < 0.05$ )。在相同灌水水平下, 单株荚质量、单株粒数及千粒质量均随施氮量增大而增大, 单株荚质量中 W2N1 与 W2N2、单株粒数中 W2N1 与 W2N2、W3N1 与 W3N2, 千粒质

量中 W4N1 与 W4N2 间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。灌水量与施氮量的耦合作用对单株粒质量及千粒质量产生显著甚至极显著影响 ( $P < 0.05$ )。单株粒质量及千粒质量均在 W3N2 处理下达到最大值, 基本与除 W3N1 和 W4N2 外的其他处理均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

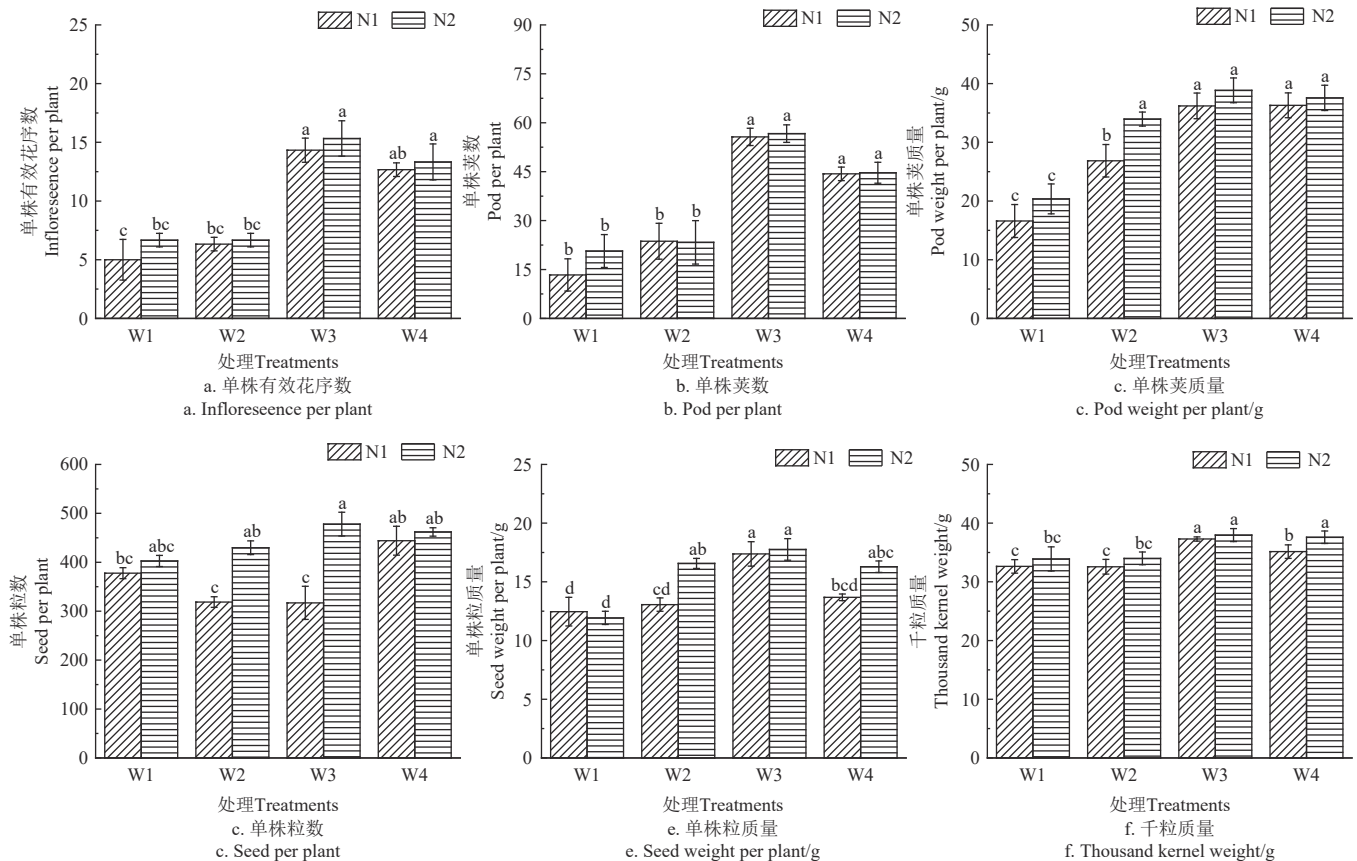


图4 不同水氮处理对瓜尔豆产量构成的影响

Fig.4 Effects of different water and nitrogen treatments on yield components of guar bean

新疆干旱区绿洲膜下滴灌水肥一体化处理下灌水量、施氮量及两者交互作用对产量、IWUE 和  $PPF_N$  均具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 但均未对收获指数有显著性影响 ( $P > 0.05$ ) (图 5)。N1 施氮水平下, 瓜尔豆产量在 W4 水平下达到最大, 且相较于其他处理显著增加 24.29%~37.68% ( $P < 0.05$ ); N2 施氮水平下, 除 W1 灌水水平外,

其余 3 个灌水水平间瓜尔豆产量无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。在相同灌水水平下, W2N1 与 W2N2、W3N1 与 W3N2 均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 且产量随施氮量增大而增加 25.94%~30.13%。综合而言, 瓜尔豆产量在 W3N2 处理下较大 (2 480 kg/hm<sup>2</sup>), 相较于 W1N2 显著提升 50.07%, 但与 W2N2、W4N1 和 W4N2 差异不显著。

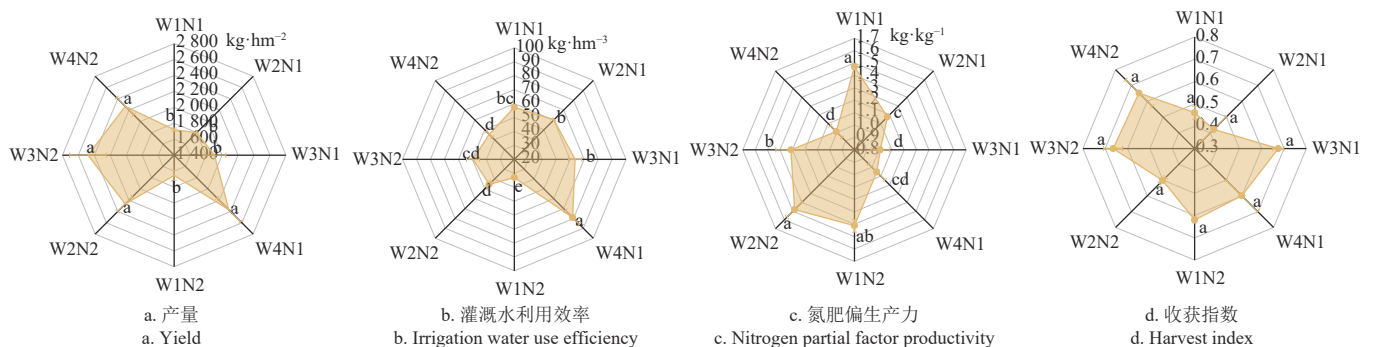


图5 不同水氮处理对瓜尔豆产量及水氮利用效率的影响

Fig.5 Effects of different water and nitrogen treatments on yield and water and nitrogen use efficiency of guar bean

N1 施氮水平下,  $PPF_N$  瓜尔豆 IWUE 随灌水量增加逐渐增加, 在 W4 灌水水平下达到最大, 且 W4 灌水水

平下相较于其他 3 个灌水水平显著提高 24.30%~37.69% ( $P < 0.05$ ) ( $P < 0.05$ ); N2 施氮水平下, 瓜尔豆

IWUE 在 W3N1 施氮水平下, 瓜尔豆 IWUE 随灌水量增加逐渐下降, 在 W1 灌水水平下取得最大值, 且 W1 灌水水平下相较于其他 3 个灌水水平显著提高 25.00%~49.83% ( $P < 0.05$ ); N2 施氮水平下, IWUE 在 W2 水平下达到最大, 且与除 W1N2 外其余处理间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。在 W2 和 W3 灌水水平下, IWUE 随施氮量增加而上升, W2N1 相较于 W2N2、W3N1 相较于 W3N2 显著增加 25.95% 和 30.14% ( $P < 0.05$ )。N1 施氮水平下, 瓜尔豆 PFP<sub>N</sub> 随灌水量增加逐渐增加, 在 W4 灌水水平下达到最大, 且 W4 灌水水平下相较于其他 3 个灌水水平显著提高 24.30%~37.69% ( $P < 0.05$ ); N2 施氮水平下, 瓜尔豆 PFP<sub>N</sub> 在 W3 灌水水平下达到最大, 仅与 W1 灌水水平存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 且相较于 W1 灌水水平 PFP<sub>N</sub> 显著提高 50.06% ( $P < 0.05$ )。在相同灌水水平下, PFP<sub>N</sub> 随施氮量增加而下降, 各灌水水平下 N1 与 N2 处理间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 且随施氮量增加而显著降低 3.05%~130.08%。灌水量、施氮量及两者交互均未对收获指数有显著性影响 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 水氮互作对瓜尔豆果实品质的影响

新疆干旱区绿洲膜下滴灌水肥一体化处理下灌水量对各品质指标均存在显著甚至极显著影响 ( $P < 0.01$  或  $P$

$< 0.05$ ), 施氮量对半乳甘露聚糖、可溶性糖及多糖均存在显著性影响 ( $P < 0.05$ ), 而灌水与施氮的交互作用仅对半乳甘露聚糖含量存在极显著影响 ( $P < 0.01$ ) (图 6)。N1 施氮水平下, 瓜尔豆半乳甘露聚糖含量在灌水水平 W1~W3 下随灌水水平的增大而减小, 在 W4 灌水水平下又显著增加, 并在 W4 灌水水平下取得最大值, 且相较于其他灌水水平显著提高 10.88~16.79% ( $P < 0.05$ ); N2 施氮水平下, 瓜尔豆半乳甘露聚糖含量随灌水量增加而减小, 除 W2 灌水水平与 W3 灌水水平外, 其余处理间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), W3N2 处理下半乳甘露聚糖含量为 0.79 ng/g, 显著高于 W4N2 处理下 0.71 ng/g。在 W1~W3 灌水水平下, 瓜尔豆半乳甘露聚糖含量随施氮量增加而上升, 且相较于 N1 施氮水平, N2 施氮水平下显著提升了 4.30%~6.62% ( $P < 0.05$ ); 但在 W4 水平下, W4N1 乳甘露聚糖含量显著高于 W4N2 ( $P < 0.05$ )。

瓜尔豆可溶性糖含量在 W1 水平下达到较大水平, 随着灌水量增加而逐渐下降, 且 W1N1 与 W2N1、W3N1, W1N2 与 W4N2 间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。瓜尔豆可溶性糖含量在各灌水水平下 N1、N2 处理间均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

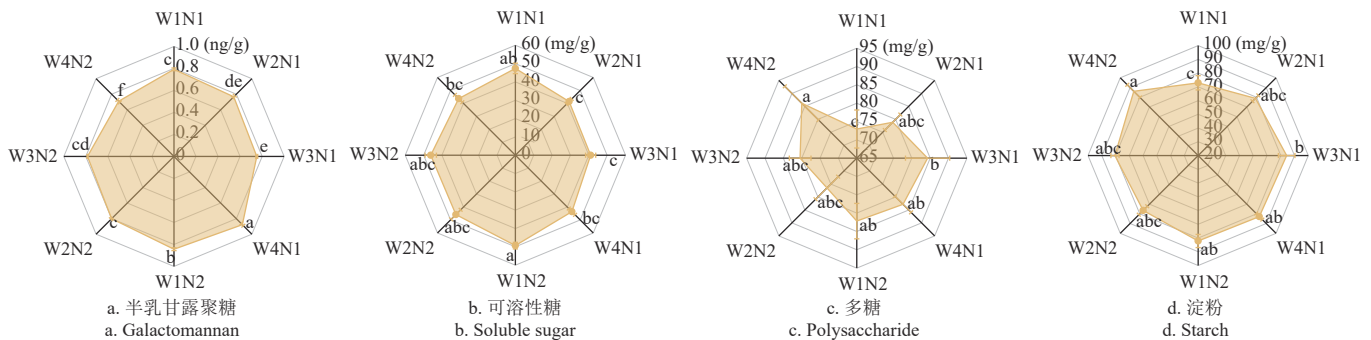


图 6 不同水氮处理对瓜尔豆品质的影响

Fig.6 Effects of different water and nitrogen treatments on the quality of guar beans

在 N1 施氮水平下, 瓜尔豆多糖含量在 W2~W4 水平下均无显著性差异, 但 W3N1 和 W4N1 显著高于 W1N1 ( $P < 0.05$ ); N2 施氮水平下, 瓜尔豆多糖含量各处理间无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。在相同灌水水平下, 瓜尔豆多糖含量仅在 W1 时 N2 显著于 N1 ( $P < 0.05$ ), 其他灌水水平下 N1 与 N2 之间无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。瓜尔豆淀粉含量在 W1N1 时较低, 与 W2N1, W2N2 和 W3N2 无显著性差异, 但显著低于其他处理 ( $P < 0.05$ )。然而施氮量及两者交互对瓜尔豆淀粉含量均不存在显著影响 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 基于主成分分析及隶属函数分析的综合评价

基于瓜尔豆的高产优质增效, 选取产量 ( $X_1$ )、灌溉水利用效率 ( $X_2$ )、氮肥偏生产力 ( $X_3$ )、收获指数 ( $X_4$ )、半乳甘露聚糖 ( $X_5$ )、可溶性糖 ( $X_6$ )、多糖 ( $X_7$ )、淀粉 ( $X_8$ ) 8 个指标对各处理进行综合评价。对 8 个指标进行相关性分析 (表 3), 结果表明灌溉水利用效率与可溶性糖、多糖, 氮肥偏生产力与收获指数、

淀粉, 可溶性糖和淀粉间均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 氮肥偏生产力和可溶性糖, 收获指数和淀粉间均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。因此, 不同指标间存在相互影响的密切关系。采用主成分分析法对 8 个指标进行降维数学统计分析。通过主成分分析, 提取出 3 个特征值大于 1 的主成分。这 3 个主成分的累计贡献率达到了 81.55%, 这意味着它们已经包含了 8 个指标的大部分信息 (表 4)。因此, 用这 3 个主成分来代替原来的 8 个指标, 对瓜尔豆进行评价。第一主成分解释了总变异信息的 29.39%, 主要反映氮肥偏生产力 ( $X_3$ ) 和多糖 ( $X_7$ ) 2 个指标的影响; 第二主成分包含了原始信息的 29.21%, 主要反映产量 ( $X_1$ )、收获指数 ( $X_4$ ) 和淀粉 ( $X_8$ ) 3 个指标的影响; 第三主成分包含了原始信息的 22.95%, 主要以半乳甘露聚糖 ( $X_5$ ) 和可溶性糖 ( $X_6$ ) 的影响为主。根据主成分分析结果, 在 3 个主成分中用这 8 指标来进行模糊隶属函数分析并排名。结合式 (4) 和式 (5), 计算各处理隶属函数值, 并进行排序 (表 5)。

表 3 各评价指标间相关性分析

Table 3 Correlation analysis of each evaluation index

指标 Index	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$X_1$	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$X_2$	0.46	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$X_3$	-0.69	-0.67	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$X_4$	0.59	0.00	-0.72*	1	0.00	0.00	0.00	0.00
$X_5$	-0.41	0.15	0.48	-0.64	1	0.00	0.00	0.00
$X_6$	-0.65	-0.77*	0.93*	-0.49	0.48	1	0.00	0.00
$X_7$	-0.32	-0.90*	0.55	0.00	-0.35	0.54	1	0.00
$X_8$	0.63	0.30	-0.90*	0.94*	-0.59	-0.71*	-0.23	1

注:  $X_1$  表示产量、 $X_2$  表示灌溉水利用效率、 $X_3$  表示氮肥偏生产力、 $X_4$  表示收获指数、 $X_5$  表示半乳甘露聚糖、 $X_6$  表示可溶性糖、 $X_7$  表示多糖、 $X_8$  表示淀粉,下同。  
Note:  $X_1$  represents yield,  $X_2$  represents irrigation water use efficiency,  $X_3$  represents partial factor productivity of nitrogen fertilizer,  $X_4$  represents harvest index,  $X_5$  represents galactomannan,  $X_6$  represents soluble sugar,  $X_7$  represents polysaccharide, and  $X_8$  represents starch., same as below.

表 4 主成分因子荷载和方差贡献率

Table 4 Factor loadings and variance contribution rates of the principal component

指标变量 Indicator variables	因子荷载 Factor loading		
	第一主成分 Primary principal component	第二主成分 Secondary principal component	第三主成分 Third principal component
$X_1$	-0.156	0.630	0.132
$X_2$	0.535	-0.584	0.587
$X_3$	-0.941	0.046	-0.039
$X_4$	0.222	0.923	-0.055
$X_5$	-0.273	0.019	0.883
$X_6$	0.567	-0.141	0.741
$X_7$	0.841	0.034	-0.076
$X_8$	-0.055	0.851	-0.366
特征值 Characteristic values	2.35	2.34	1.86
方差贡献率 Variance contribution rates/%	29.39	29.21	22.95
累计贡献率 Cumulative contribution rates/%	29.39	58.60	81.55

表 5 瓜尔豆评价指标隶属函数值

Table 5 Guar bean evaluation index membership function value

指标 Index	隶属函数值 Subordinate function value							
	W1N1	W1N2	W2N1	W2N2	W3N1	W3N2	W4N1	W4N2
$X_1$	0.08	0.16	0.98	0.53	0.47	0.77	0.31	<0.01
$X_2$	0.18	<0.01	0.36	0.59	0.35	0.04	0.54	0.44
$X_3$	0.74	0.32	1.00	0.27	0.53	0.58	0.87	0.27
$X_4$	<0.01	0.80	0.85	<0.01	0.76	1.00	0.83	0.70
$X_5$	0.31	1.00	<0.01	0.66	0.24	<0.01	0.74	0.86
$X_6$	1.00	1.00	0.64	0.36	0.47	0.61	1.00	0.57
$X_7$	0.87	0.72	0.09	1.00	1.00	0.31	<0.01	0.75
$X_8$	0.74	0.92	<0.01	0.27	<0.01	0.32	0.36	1.00
隶属函数值 Subordinate function value	0.21	0.34	0.26	0.72	0.36	0.90	0.70	0.47
综合排序 Comprehensive ranking	8	6	7	2	5	1	3	4

N2 施氮水平下的隶属函数值在 W1、W2 和 W3 灌水平下均大于 N1 施氮水平, 在 N1 水平下, 隶属函数值随灌水平增大而增大。在相同施氮水平下, 瓜尔豆各处理隶属函数值大小顺序表现为 W3>W4>W2>W1。隶属函数值最高的处理为 W3N2, 排名第 1, 最低的处理为 W1N1, 排名第 8。

3 讨 论

高效节水灌溉的优势在于能够为作物生长提供适宜的水分和养分, 确保供给及时且合理, 从而营造出水分、养分、空气和热量均衡的土壤环境<sup>[25]</sup>。膜下滴灌结合水肥一体化的方式可以将水分和养分直接输送至作物根部, 并根据作物不同生长阶段的需求, 精确提供所需的水分和养分<sup>[26]</sup>。梁斌等<sup>[27-28]</sup>的研究表明适量的水分有利于加快  $K^+$ 、 $H_2PO_4^-$  等离子的扩散过程, 促进植物吸收养分, 促进植株生长。唐锐等<sup>[29]</sup>研究表明, 在适宜的灌溉情况下, 作物的产量会保持在一个较高的水平。然而, 如果水量过多, 反而会导致土壤中的养分被过度冲洗, 影响作物对养分的吸收和利用, 从而影响作物的生长和发育, 最终导致产量减少, 这与本试验的观察结果一致。本试验中得出, 无论是各组分干物质质量、各产量构成指标、产量还是收获指数基本均在  $1\ 890\ m^3/hm^2$  (W3) 灌水平下取得较大值。此外, 本研究得出, W2-W3 水平下施氮量由  $30\ kg/hm^2$  (N1) 增至  $50\ kg/hm^2$  (N2) 时, 瓜尔豆产量都得到增加, 这与人研究结果相似<sup>[30-31]</sup>。宋娜等<sup>[32]</sup>研究表明, 增加土壤湿润程度或施加更多的氮肥都可以提高作物的产量, 这与本研究结果一致。

邢英英等<sup>[33]</sup>研究表明, 作物产量与灌水量和施肥量之间存在着正向关系, 在灌水量减少和施肥量增加的情况下, 作物的水分利用效率也会提高, 相反会使作物肥料偏生产力增大。在本研究中, 瓜尔豆产量随水氮供应量的增加逐渐增大到一定水平后不再增大, 反而出现下降趋势, 即在 W3N2 处理下取得较大值, 且与 W2N2、W4N1 和 W4N2 差异不显著, 但较其他处理提高  $4.70\%\sim 50.07\%$ 。刘洋等<sup>[34]</sup>研究表明, 随着施氮量的增加, 作物产量呈现增长的趋势, 这与本研究的结果相类似。本研究发现, 在适宜的灌溉水平下, 随着施氮量提高, 瓜尔豆产量得到了显著提升。张延平等<sup>[35]</sup>研究表明灌水量的增加会对植物果实各品质指标有稀释作用, 如果灌水量增加会导致植物果实中的水分含量增加, 对果实品质指标起到稀释效果, 从而导致养分含量下降, 与本研究结果类似。本研究结果表明, N1 施氮水平下, 瓜尔豆半乳甘露聚糖含量在灌水平 W1~W3 下随灌水平的增大而减小, 可溶性糖含量在 W1 水平下达到较大水平, 随着灌水量增加而逐渐下降。氮素营养是限制其高产的关键因素, 杨启睿等<sup>[36]</sup>研究表明在一定范围内, 花生籽粒品质随氮肥用量增加而提高。梁运江等<sup>[37]</sup>通过建立数学模型对灌水、施氮对作物品质的影响进行了研究, 结果表明, 灌水和施氮对辣椒果实作物品质的表现为施氮影响大于灌水。本研究表明, 随着施氮量由  $30\ kg/hm^2$  (N1) 增至  $50\ kg/hm^2$  (N2) 时, 在某些灌水平下瓜尔豆中半乳甘露聚糖、淀粉及可溶性糖含量均显著提升。姜慧敏等<sup>[38]</sup>研究表明, 土壤中硝态氮含量会随氮肥用量增加而升高。在经常灌溉的环境下, 土壤氮素流失严重, 影响土壤肥力。过多施氮还可能减少作物坐果率, 降低抗逆能力, 增加病害风险, 最终对作物产量产生负面影响<sup>[39]</sup>。



而本研究结果表明, 灌水量增加提高了氮肥偏生产力, 但降低了灌溉水利用效率; 相反, 施氮量增加降低了氮肥偏生产力, 但提高了灌溉水利用效率, 这与刘俊明等<sup>[40]</sup>的研究结果类似。

新疆干旱区气候炎热干燥, 降水量稀少, 传统农业生产面临着严重的水资源短缺问题。瓜尔豆作为一种耐旱作物, 具有较强的抗逆性, 采用膜下滴灌水肥一体化技术, 有望在新疆干旱区绿洲实现高产高效种植<sup>[41]</sup>。节水灌溉尽管可以缓解水资源的供需矛盾, 但不可避免对作物生长发育造成干旱胁迫, 从而影响其生长发育, 然而合理增施氮肥可以有效缓解干旱对瓜尔豆造成的伤害。但单一指标并不能反应某一水氮组合的优劣, 因此, 通过主成分分析和隶属函数结合<sup>[42]</sup>的方法进行综合评估, 提出灌溉定额为  $1\ 890\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量为  $50\ \text{kg}/\text{hm}^2$  为新疆地区瓜尔豆高产高效种植的最优管理措施。

#### 4 结 论

1) 膜下滴灌水氮互作效应对瓜尔豆产量、灌溉水利用系数、氮肥偏生产力及半乳甘露聚糖含量均存在极显著影响。相同施氮水平下, 随着灌水水平的增加, 灌溉水利用效率和半乳甘露聚糖含量逐渐降低; 在  $1\ 530 \sim 1\ 890\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  灌水水平下, 随着施氮量的增加, 瓜尔豆产量、灌溉水利用效率及半乳甘露聚糖含量均呈上升趋势, 然而氮肥偏生产力则有所下降。总体而言, 适度增加灌溉定额与氮肥施用量有助于提高瓜尔豆产量、品质及水肥利用效率。

2) 新疆干旱区绿洲种植瓜尔豆具有可行性, 膜下滴灌水肥一体化对瓜尔豆具有显著的节水调质作用, 综合考虑产量、水氮利用效率、收获指数及品质, 基于主成分分析和隶属函数分析, 灌溉定额  $1\ 890\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ , 施氮量  $50\ \text{kg}/\text{hm}^2$  处理下干旱区绿洲瓜尔豆产量可达到  $2\ 400\ \text{kg}/\text{hm}^2$  以上, 果实中半乳甘露聚糖达到  $0.7\ \text{ng}/\text{g}$ , 该水氮组合为新疆干旱区绿洲较优的滴灌瓜尔豆水氮管理模式。

#### 【参 考 文 献】

- RAJAMANICKAM C. Assessment of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba*) varieties for growth and yield characters[J]. *Journal of Krishi Vigyan*, 2019, 7(2): 7.
- 徐又新, 史劲松, 孙达峰, 等. 瓜尔豆的资源分布及引种栽培[J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(2): 69-71.  
XU Youxin, SHI Jinsong, SUN Dafeng, et al. Resource distribution and introduction & cultivation of *Cyamopsis tetragonoloba*[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2009, 28(2): 69-71. (in Chinese with English abstract)
- PATHAK R, SINGH S K, SINGH M, et al. Molecular assessment of genetic diversity in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba*) genotypes[J]. *Journal of Genetics*, 2010, 89(2): 243-246.
- 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 40: 326
- 朱相云, 杜玉芬. 中国豆科植物外来种之研究[J]. 植物研究, 2002(2): 139-150.  
ZHU Xiangyun, DU Yufen. Exotic legume species in China[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2002(2): 139-150. (in Chinese with English abstract)
- 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 中国农业出版社, 2003.
- 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83.  
YANG Guang, LI Wanjing, REN Futian, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 73-83. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG R, TIAN F, YANG P, et al. Planting and irrigation methods for cotton in southern Xinjiang, China[J]. *Irrigation and Drainage*, 2016, 65(4): 461-468.
- 李明思, 刘洪光, 郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 82-87.  
LI Mingsi, LIU Hongguang, ZHENG Xurong. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(22): 82-87. (in Chinese with English abstract)
- 姣余, 周和平. 新疆膜下滴灌技术应用现状及展望[J]. 农业科学, 2023(13): 719.
- 马占利, 王振华, 刘健, 等. 膜下滴灌配置模式对北疆地区棉花生长与产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 9-15.  
MA Zhanli, WANG Zhenhua, LIU Jian, et al. Effects of plantings on growth and yield of drip-irrigated cotton in northern Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(5): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- WANG F, HAN H, LIN H, et al. Effects of planting patterns on yield, quality, and defoliation in machine-harvested cotton[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(9): 2019-2028.
- 王东旺, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌带布置模式对北疆机采棉生长及土壤水热盐分布特征的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 76-86.  
WANG Dongwang, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of drip tape modes on machine-harvest cotton growth and soil water, heat and salt distribution in northern Xinjiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(增刊): 76-86. (in Chinese with English abstract)
- KUMAR R, PAREEK N K, RATHORE V S, et al. Effect of water and nitrogen levels on yield attributes, water productivity and economics of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba*) in hot arid region[J]. *Legume Research-an International Journal*, 2019, 43(5): 702-705.

- [15] DONGARKAR K P, PAWAR W S, KHAWALE V S, et al. Effect of nitrogen and sulphur on growth and yield of mustard (*Brassica juncea* L.)[J]. Journal of Soils and Crops, 2005, 15(1): 163-167.
- [16] 师学静, 柴同海, 邢明振, 等. 不同肥料配施对马铃薯产量和品质以及土壤理化性状的影响[J]. 河北农业科学, 2021, 25(2): 72-76.
- SHI Xuejing, CHAI Tonghai, XING Mingzhen, et al. Effects of different fertilizers on potato yield and quality and soil physico chemical properties[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2021, 25(2): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 覆膜时期和施氮量对陇东旱塬玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(3): 479-490.
- ZHANG Jianjun, DANG Yi, ZHAO Gang, et al. Influences of mulching periods and nitrogen application rates on maize yield as well as water and nitrogen use efficiencies in Loess Plateau of Eastern Gansu Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(3): 479-490. (in Chinese with English abstract)
- [18] MANIVANNAN A, ANANDAKUMAR C R, USHAKUMARI R, et al. Characterization of Indian clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) taub.) genotypes using qualitative morphological traits[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2016, 63(3): 483-493.
- [19] 张健利, 王振华, 刘茹华, 等. 水肥互作对滴灌红枣耗水及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(6): 597-604, 613.
- ZHANG Jianli, WANG Zhenhua, LIU Ruhua, et al. Effects of water and fertilizer interaction on water consumption and yield of jujube under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 41(6): 597-604, 613. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郑群, 李天来, 吕国华, 等. 播种期对瓜尔豆生长发育及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2005, 23(3): 342-345.
- ZHENG Qun, LI Tianlai, LV Guohua, et al. Effects of sowing date on growth and yield of clusterbean(*Cyamopsis tetragonoloba*)[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2005, 23(3): 342-345. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郑群, 吕国华, 李天来, 等. 不同种植方式和密度对瓜尔豆生长发育及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2008, 26(2): 195-198.
- ZHENG Qun, LV Guohua, LI Tianlai, et al. Effects of different cropping pattern and densities on the growth development and yield of clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba*)[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2008, 26(2): 195-198. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吉雪花, 郑群, 李格, 等. 水分胁迫对瓜尔豆生长和生理性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 39-44.
- JI Xuehua, ZHENG Qun, LI Ge, et al. Effects of water stress on the growth and physiological traits of guar[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 39-44. (in Chinese with English abstract)
- [23] 曹建, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [24] 张志恒, 王玉琴, 任国艳, 等. 基于主成分分析和隶属函数分析评价不同添加剂处理的玉米秸秆青贮的发酵品质[J]. 动物营养学报, 2022, 34(4): 2677-2688.
- ZHANG Zhiheng, WANG Yuqin, REN Guoyan, et al. Evaluation of fermentation quality of corn straw silage treated with different additives based on principal component analysis and membership function analysis[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(4): 2677-2688. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王振华, 陈潇洁, 吕德生, 等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 66-75.
- WANG Zhenhua, CHEN Xiaojie, LYU Desheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 66-75. (in Chinese with English abstract)
- [26] 窦允清, 王振华, 张金珠, 等. 水肥耦合对滴灌加工番茄生理生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 124-129.
- DOU Yunqing, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of water and fertilizer coupling on physiological growth and yield of tomato under drip irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 124-129. (in Chinese with English abstract)
- [27] 梁斌, 王群艳, 董静, 等. 水氮管理对设施番茄根系生长的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 677-682.
- LIANG Bin, WANG Qunyan, DONG Jing, et al. Effects of irrigation and nitrogen management on root growth of tomato under greenhouse condition[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(4): 677-682. (in Chinese with English abstract)
- [28] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应的研究进展与展望[J]. 湖北农业科学, 2006(3): 385-388.
- LIANG Yunjiang, YI Yanli, XU Guangbo, et al. Research progress and prospect of water and fertilizer coupling effect[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2006(3): 385-388. (in Chinese with English abstract)
- [29] 唐锐, 韩宜秀, 易树生, 等. 不同水氮组合对冬小麦产量及水氮利用效率的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(10): 1944-1955.
- TANG Rui, HAN Yixiu, YI Shusheng, et al. Optimal water and nitrogen rate combination for winter wheat yield and water-nitrogen efficiency in Guanzhong area of Shaanxi[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(10): 1944-1955. (in



- Chinese with English abstract)
- [30] 单长河, 汪艳萍. 超量灌溉对农田耕作区水土肥流失的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(6): 11-16.  
SHAN Changhe, WANG Yanping. Effect of excessive irrigation on the soil and fertilizer in farmland cultivation area[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(6): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 81-84.  
WANG Yanqun, PENG Zhengping, XUE Shichuan, et al. Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(增刊): 81-84. (in Chinese with English abstract)
- [32] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 98-105.  
SONG Na, WANG Fengxin, YANG Chenfei, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 98-105. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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): 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(增刊): 110-121. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘洋, 栗岩峰, 李久生. 东北黑土区膜下滴灌施氮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, SU Yanfeng, LI Yongsheng. Effects of nitrogen management on the growth and yield of mulched and drip-irrigation maize in northeast black soil regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 529-536. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张延平, 温祥珍, 李亚灵, 等. 水氮耦合对日光温室番茄干物质生产与分配的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(2): 215-223.  
ZHANG Yanping, WEN Xiangzhen, LI Yaling, et al. Effects of water and nitrogen coupling on dry matter production and allocation of tomato in a solar greenhouse[J]. Acta
- Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(2): 215-223. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杨启睿, 李岚涛, 张潇, 等. 施氮对夏花生产量、品质及光温生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 32(4): 1-13.  
YANG Qirui, LI Lantao, ZHANG Xiao, et al. Effects of nitrogen application on yield, quality and light temperature physiological characteristics of summer peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 32(4): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [37] 梁运江, 许广波, 依艳丽. 水肥耦合效应对辣椒 Vc 含量的影响[J]. 人民黄河, 2008, 30(10): 73-74, 79.  
LIANG Yunjiang, XU Guangbo, YI Yanli. Effect of water and fertilizer coupling on vc content of pepper[J]. Yellow River, 2008, 30(10): 73-74, 79. (in Chinese with English abstract)
- [38] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2338-2345.  
JIANG Huimin, ZHANG Jianfeng, YANG Juncheng, et al. Effects of different treatments of nitrogen fertilizer on yield, quality of tomato and soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation in vegetable-greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2338-2345. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王激清, 刘社平. 施氮量对番茄生长发育和氮肥利用率的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 94-97.  
WANG Jiqing, LIU Sheping. Effects of nitrogen application rate on tomato growth and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(2): 94-97. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘俊明, 司转运, 武利峰, 等. 高低畦种植模式下水氮耦合对冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 144-154.  
LIU Junming, SI Zhuanyun, WU Lifeng, et al. Effects of water and nitrogen coupling on winter wheat yield and water or nitrogen use efficiency under high-low seedbed cultivation pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 144-154. (in Chinese with English abstract)
- [41] ANSARI M, SIKARWAR P, LADE S, et al. Genetic diversity clusters in germplasm of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L., Taub), an important food and an industrial legume crop[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18: 1393-1406.
- [42] 侯赵玉, 龚亦钊, 钱祎, 等. 芍药耐热性评价及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学, 2023, 56(23): 4742-4756.  
HOU Zhaoyu, GONG Yizhao, QIAN Wei, et al. Evaluation of heat tolerance of herbaceous peony and screening of its identification indices[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(23): 4742-4756. (in Chinese with English abstract)

# Yield quality and water and nitrogen use efficiency of guar beans under mulched drip irrigation in response to water and nitrogen interactions in arid areas

WANG Zhenhua<sup>1,2,3,4</sup>, REN Kongju<sup>1,2,3,4</sup>, YIN Feihu<sup>1,4,5</sup>, MA Zhanli<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Pengpeng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, China; 3. Technology Innovation Center for Agricultural Water and Fertilizer Efficiency Equipment of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, China; 4. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PR China, Shihezi 832000, China; 5. Institute of farmland Water Conservancy and Soil-Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** Guar is a typical legume cash crop native to India. Guar beans are ever-rising in the market share at present. Among them, the guar gum of its seed endosperm has been mainly used in the oil exploration industry. Water-based fracturing fluid can be formulated to increase the permeability of oil-bearing strata during oil production. In addition, guar gum is also widely used in paper making, textiles, food, spices, drugs, as well as mining and metallurgical industries. The nutrient-rich green seeds of guar beans are edible for food vegetables, due to a large amount of protein and a small amount of fat. The plant can be used as fodder and green manure. However, the low supply of guar gum on the market cannot fully meet the broad market space. Only a small number of planting areas of guar beans are suitable for the cultivation of guar beans in the food industry. Among them, Xinjiang located in the northwestern inland arid zone is very similar to the unique geographic conditions for the production and cultivation of guar beans. The temperature and heat conditions are suitable for the origin of guar, rich in the light and heat resources under the soil and water environment, with the high temperature difference between day and night, due to the scarce rainfall and high evaporation. But the relatively small region of guar bean planting still remains so far. Therefore a broad prospect can be expected to optimize the water and nitrogen management for the high crop yield and efficient use of water and nitrogen. This study aims to explore the water and nitrogen mode suitable for drip irrigation of guar beans under film in the Xinjiang area of China. Four irrigation levels were set: W1:1170 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, W2:1 530 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, W3:1 890 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, W4: 2 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>; Two levels of nitrogen application were: N1:30 kg/hm<sup>2</sup>, N2:50 kg/hm<sup>2</sup>. A systematic investigation was made to clarify the effects of water and nitrogen interaction on the growth index, yield, water, and nitrogen use efficiency, as well as the quality of guar bean during drip irrigation under film. The results showed that the coupling effect of water and nitrogen shared a significant effect on the yield, irrigation water use efficiency, and partial factor productivity of nitrogen fertilizer (W3>W4>W2>W1). There was an increase in the plant height, stem diameter, dry matter accumulation, yield, water use efficiency, galactomannan, soluble sugar, and polysaccharide content of Guar bean under the N2 level, compared with the N1 level. Only the partial productivity of nitrogen fertilizer decreased slightly. Principal component and membership function analysis showed that the optimal treatment was achieved in the irrigation amount of 1 890 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and the nitrogen application rate of 50 kg/hm<sup>2</sup>(W3N2). The finding can also provide a theoretical basis to promote the yield, water, and nitrogen use efficiency of Guar bean under mulched drip irrigation.

**Keywords:** irrigation; nitrogen; principal component analysis; high yield; guar beans; affiliation function analysis; submembrane drip irrigation