

分类号：
学号：20222110012

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



水氮耦合对瓜尔豆生长及水氮利用效率的影响研究

学位申请人

任孔聚

指导教师

王振华教授

王恒高级工程师

申请学位类别

专业硕士

专业名称

土木水利

研究领域

农田水土工程

所在学院

水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

分类号：
学号：20222110012

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



水氮耦合对瓜尔豆生长及水氮利用效率的影响研究

学位申请人

任孔聚

指导教师

王振华教授

王恒高级工程师

申请学位类别

专业硕士

专业名称

土木水利

研究领域

农田水土工程

所在学院

水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

**Study on the effect of water-nitrogen coupling on the growth and
water and nitrogen use efficiency of guar beans**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Ren Kong-ju

(Agricultural Soil and Water Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Zhen-hua

Senior Engineer. Wang Heng

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：佴孔聚

时间：2025年5月20日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：佴孔聚

时间：2025年5月20日

导师签名：



时间：2025年5月20日

摘要

目的: 旨在为北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。本文通过探究水氮耦合对膜下滴灌瓜尔豆根区土壤环境、生长、产量、品质及水氮利用效率的影响。提出适宜北疆干旱区绿洲滴灌瓜尔豆的最佳水氮组合模式, 为促进北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。

方法: 试验以瓜尔豆为研究对象, 共设置 W1 (1170 m³/hm²)、W2 (1530 m³/hm²)、W3 (1890 m³/hm²) 和 W4 (2250 m³/hm²) 4 个灌溉水平, 和 N1 (30 kg/hm²) 和 N2 (50 kg/hm²) 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。

结果: (1) 土壤含水率在垂直方向上随深度增加呈先升后降趋势, 表层 (0~20 cm) 含水率较低, 随瓜尔豆生育进程推进, 土壤含水率先增后减, 盛荚期含量最低。同一灌溉水平下, 氮肥比例增加使 0~60 cm 土层平均含水率在各生育期上升; 相同施肥水平下, 提高灌溉水平也显著增加含水率。苗期、盛花期、盛荚期和鼓粒期, 增加灌溉量和氮肥施用量均显著提高土壤水分。例如, 苗期 1170 m³/hm² 灌溉定额下含水率最低, 较 1530 m³/hm²、1890 m³/hm²、2250 m³/hm² 灌水水平分别降低 10.29%、11.71% 和 14.97%; 相同灌溉水平下, 50 kg/hm² 施氮水平较 30 kg/hm² 施氮水平提高了 6.99%。瓜尔豆耗水量随生育进程先增后减, 盛荚期>盛花期>苗期>鼓粒期, 且随着灌水量的增加, 各生育期耗水量呈现先增加后减少的趋势, 增施氮肥显著提高了各生育期的耗水量。

(2) 增加灌溉量和氮肥施用量均能显著降低土壤盐分含量, 且土壤盐分的垂直分布在不同灌溉水平下存在显著差异。在低灌溉水平下, 土壤盐分主要集中在表层, 而在高灌溉水平下, 盐分分布更加均匀, 且深层土壤的盐分含量显著降低。具体而言, 随着灌溉水平提高, 土壤盐分含量显著下降, 2250 m³/hm² 灌溉水平下土壤盐分含量较 1170 m³/hm² 灌溉水平降低 50%。盛花期和盛荚期, 土壤盐分含量有所增加, 但增加灌溉量和氮肥施用量仍显著降低了土壤盐分含量, 其中在 1890 m³/hm² 灌溉水平下, 50 kg/hm² 施氮水平处理较 30 kg/hm² 施氮水平处理降低了 15.21%。

(3) 增加灌溉量和氮肥施用量均能显著提高土壤氨态氮和硝态氮含量, 且其垂直分布在不同灌溉水平下存在显著差异。在低灌溉水平下, 氨态氮和硝态氮主要集中在表层土壤 (0~20 cm), 而在高灌溉水平下, 其分布更加均匀, 且深层土壤 (40~60 cm) 的含量显著增加。在同一灌溉水平下, 增加氮肥施用量显著提高了土壤氨态氮和硝态氮含量, 其中在 1890 m³/hm² 灌溉水平下, 50 kg/hm² 施氮水平下的氨态氮和硝态氮含量较 30 kg/hm² 施氮水平分别提高了 24.4% 和 11.5%。随着灌溉水平的提高, 土壤氨态氮和硝态氮含量也呈现上升趋势, 其中在 50 kg/hm² 施氮水平下, 2250 m³/hm² 灌溉水平的氨态氮和硝态氮含量较 1170 m³/hm² 灌溉水平分别提高了 37.6% 和 39.1%。

(4) 水氮耦合对瓜尔豆生长具有显著影响且显著提升了瓜尔豆的品质。适宜的水分和氮肥供应可促进瓜尔豆植株生长, 增加株高、茎粗以及根系的生长, 并且促进干物质量的积累, 从而提高

产量。然而，过量灌溉或施氮可能导致植株徒长，降低茎粗，抑制根系的生长及干物质量的积累，最终影响产量。半乳甘露聚糖、可溶性糖及多糖含量随灌水量增加呈下降趋势，随施氮量增加而增加；淀粉含量随灌水量增加而上升，但施氮量对其影响不显著。

(5) 灌溉水量和氮肥施用量及其交互作用对产量、灌溉水利用效率 (IWUE) 和 0 氮肥偏生产力 (PFP_N) 均具有极显著影响。30 kg/hm² 施氮水平下，瓜尔豆产量在 2250 m³/hm² 灌溉水平下达到最大，较其他处理显著增加 24.29%~37.68%；50 kg/hm² 施氮水平下，1890 m³/hm² 灌溉水平处理下的产量最高，较 1170 m³/hm² 灌溉水平显著提升 50.07%。灌溉水利用效率 (IWUE) 在 30 kg/hm² 施氮水平下随灌水量增加而下降，1170 m³/hm² 灌溉水平下达到最大值；而在 50 kg/hm² 施氮水平下，灌溉水利用效率 (IWUE) 在 1530 m³/hm² 灌溉水平下达到最大。氮肥偏生产力 (PFP_N) 在 30 kg/hm² 施氮水平下随灌水量增加而上升，2250 m³/hm² 灌溉水平下达到最大值；而在 50 kg/hm² 施氮水平下，氮肥偏生产力 (PFP_N) 在 1890 m³/hm² 灌溉水平下达到最大。

结论：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 1890 m³/hm²，施氮量 50 kg/hm² 处理下干旱区绿洲瓜尔豆产量可达到 2400 kg/hm² 以上，果实中半乳甘露聚糖（瓜尔胶）达到 0.7 ng/g，该水氮组合为较优的滴灌瓜尔豆水氮管理模式。

关键词：膜下滴灌；氮；主成分分析；瓜尔豆；隶属函数分析

Abstract

Object: It aims to provide theoretical support for water-saving and fertiliser-saving, high-yield and high-efficiency guar bean cultivation technology in the oasis of the arid zone of Northern Xinjiang, and further promote the sustainable development of oasis agriculture in Xinjiang. This paper explores the effects of water-nitrogen coupling on soil environment, growth, yield, quality and water and nitrogen use efficiency of drip-irrigated guar beans in the root zone under the membrane. It proposes the best water and nitrogen combination model suitable for drip-irrigated guar beans in the oasis of the arid zone of Northern Xinjiang, and provides a theoretical basis for promoting the high yield, water and nitrogen utilisation efficiency of drip-irrigated guar beans in the oasis of the arid zone of Northern Xinjiang.

Methods: The experiment took guar beans as the research object, and four irrigation levels, W1 (1170 m³/hm²), W2 (1530 m³/hm²), W3 (1890 m³/hm²) and W4 (2250 m³/hm²), and two nitrogen levels, N1 (30 kg/hm²) and N2 (50 kg/hm²), were set up, and the total number of treatments was 8 in the completely randomized combinatorial design, each treatment was set up with three water-nitrogen combinations. treatments, and each treatment was set up with three replications.

Results: (1) Soil water content tended to increase and then decrease vertically with depth, and was lower in the surface layer (0-20 cm), increasing and then decreasing with the reproductive process of guar beans, and was lowest at the podding stage. At the same irrigation level, increasing the proportion of nitrogen fertilizer caused the average water content of the 0-60 cm soil layer to increase at all fertility stages; at the same fertilization level, increasing the irrigation level also significantly increased the water content. Increasing irrigation and N fertilizer application significantly increased soil moisture at seedling, bloom, pod and bulb stages. For example, water content was lowest at the seedling stage under 1170 m³/hm² irrigation quota, which was 10.29%, 11.71% and 14.97% lower than 1530 m³/hm², 1890 m³/hm² and 2250 m³/hm², respectively; 50 kg/hm² nitrogen application level was 6.99% higher than 30 kg/hm² under the same irrigation level. The water consumption of guar bean increased and then decreased with the reproductive process, with full pod > full flower > seedling > bulb stage, And with the increase of irrigation water, the water consumption of each fertility period showed the trend of increasing and then decreasing, and the increase of nitrogen fertiliser significantly increased the water consumption of each fertility period.

(2) Increasing irrigation and nitrogen fertilizer application could significantly reduce soil salinity content, and the vertical distribution of soil salinity was significantly different at different irrigation levels. At low irrigation levels, soil salts were mainly concentrated in the surface layer, while at high irrigation levels, the distribution of salts was more uniform, and the salt content of the deep soil was significantly reduced. Specifically, soil salinity content decreased significantly with higher irrigation levels, and soil salinity content

was 50% lower at the 2250 m³/hm² irrigation level compared to 1170 m³/hm². At bloom and pod stage, soil salinity content increased, but increasing irrigation and nitrogen fertilizer application still significantly reduced soil salinity content, including a 15.21% reduction in the 50 kg/hm² treatment compared to the 30 kg/hm² treatment at the 1890 m³/hm² irrigation level.

(3) Increasing irrigation and nitrogen fertilizer application significantly increased soil ammoniacal nitrogen and nitrate nitrogen contents, and their vertical distributions were significantly different at different irrigation levels. At low irrigation levels, ammonia N and nitrate N were mainly concentrated in the top soil layer (0-20 cm), while at high irrigation levels, their distribution was more uniform, and their contents in the deep soil layer (40-60 cm) increased significantly. At the same irrigation level, increasing N fertilizer application significantly increased soil ammoniacal and nitrate N contents, including 24.4% and 11.5% in the 50 kg/hm² treatment compared with the 30 kg/hm² treatment at the 1890 m³/hm² irrigation level. With the increase of irrigation level, the soil ammoniacal and nitrate nitrogen contents also showed an increasing trend, in which the ammoniacal and nitrate nitrogen contents of 2250 m³/hm² irrigation level increased by 37.6% and 39.1%, respectively, compared with the 1170 m³/hm² irrigation level at the 50 kg/hm² nitrogen application level.

(4) Water and nitrogen coupling had a significant effect on the growth of guar beans and significantly improved the quality of guar beans. Suitable water and nitrogen fertilizer supply can promote the growth of guar plants, increase plant height, stem thickness and root growth, and promote the accumulation of dry matter mass, thus improving yield. However, excessive irrigation or nitrogen application may lead to plant lengthening, reduce stem thickness, inhibit root growth and dry matter mass accumulation, and ultimately affect yield. The contents of galactomannan, soluble sugar and polysaccharide showed a decreasing trend with the increase of irrigation water, and increased with the increase of nitrogen application; the starch content increased with the increase of irrigation water, but the effect of nitrogen application on it was not significant.

(5) Irrigation water and N fertiliser application and their interaction had highly significant effects on yield, irrigation water use efficiency (IWUE) and nitrogen fertiliser bias productivity (PFP_N). guar yield was maximum at 2250 m³/hm² irrigation level under 30 kg/hm² nitrogen application level, which was significantly increased by 24.29% to 37.68% compared to other treatments; 50 kg/hm² nitrogen application level Under 50 kg/hm² N application level, the maximum yield was recorded under 1890 m³/hm² irrigation level treatment, which was significantly increased by 50.07% compared to 1170 m³/hm² irrigation level. Irrigation water use efficiency (IWUE) decreased with the increase of irrigation water at 30 kg/hm² N application level and reached the maximum at 1170 m³/hm² irrigation level; while at 50 kg/hm² N application level, irrigation water use efficiency (IWUE) reached the maximum at 1530 m³/hm² irrigation level. Nitrogen fertiliser bias productivity (PFP_N) increased with increasing irrigation water at 30 kg/hm² N application level

and reached maximum at 2250 m³/hm² irrigation level; while at 50 kg/hm² N application level, nitrogen fertiliser bias productivity (PFP_N) reached maximum at 1890 m³/hm² irrigation level.

Conclusion: Considering the yield, water and nitrogen utilization efficiency, harvest index and quality, based on the principal component analysis and the subordinate function analysis, the yield of guar beans in arid zone oasis could reach more than 2400 kg/hm² under the treatment of irrigation quota of 1890 m³/hm² and nitrogen application of 50 kg/hm², and galactomannan in fruits could reach 0.7 ng/g, which makes this water and nitrogen combination a better combination for guar beans in arid zone oasis of Xinjiang. This water and nitrogen combination is a better water and nitrogen management model for drip irrigation guar beans.

Key words: Submembrane drip irrigation; Nitrogen; Principal component analysis; Guar beans; Affiliation function analysis

目录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 水氮耦合研究现状	2
1.2.1.1 水氮耦合对作物生长指标的影响	2
1.2.1.2 水氮耦合对作物耗水特性的影响	2
1.2.1.3 水氮耦合对作物水肥利用效率的影响	3
1.2.1.4 水氮耦合对作物产量的影响	3
1.2.2 瓜尔豆对环境响应的研究现状	5
1.2.2.1 瓜尔豆对土壤和水分响应的影响研究	5
1.2.2.2 瓜尔豆对种植密度及光照响应的影响研究	5
1.3 拟解决的关键问题及研究目标	6
1.3.1 拟解决的关键问题	6
1.3.2 研究目标	6
1.4 研究内容	6
1.5 技术路线图	7
第2章 材料与方法	8
2.1 试验概况	8
2.2 试验设计	9
2.3 测定项目及方法	10
2.3.1 土壤水分	10
2.3.2 土壤盐分	11
2.3.3 土壤养分	11
2.3.4 瓜尔豆生长指标测量	11
2.3.5 瓜尔豆根系指标测量	12
2.3.6 瓜尔豆干物质	12
2.3.7 瓜尔豆产量	12
2.3.8 瓜尔豆品质测定	12
2.3.9 相关指标计算方法	12
2.4 数据处理方法	13

第3章 水氮耦合对膜下滴灌瓜尔豆根区土壤环境的影响	14
3.1 水氮耦合对瓜尔豆土壤水分变化的影响	14
3.1.1 水氮耦合对瓜尔豆土壤水分含量变化的影响	14
3.1.2 水氮耦合对瓜尔豆耗水量的影响	18
3.2 水氮耦合对瓜尔豆土壤盐分含量变化的影响	20
3.3 水氮耦合对瓜尔豆土壤养分吸收利用的影响	22
3.3.1 水氮耦合对瓜尔豆土壤氨态氮含量的影响	22
3.3.2 水氮耦合对瓜尔豆土壤硝态氮含量的影响	24
3.4 讨论	26
第4章 水氮耦合对膜下滴灌瓜尔豆生长的影响	28
4.1 水氮耦合对瓜尔豆生长指标的影响	28
4.2 水氮耦合对瓜尔豆根系指标的影响	30
4.3 水氮耦合对瓜尔豆干物质积累量的影响	32
4.4 讨论	35
第5章 水氮耦合对膜下滴灌瓜尔豆产量、品质及水氮利用效率的影响	37
5.1 水氮耦合对瓜尔豆产量构成的影响	37
5.2 水氮耦合对瓜尔豆水氮利用效率的影响	39
5.3 水氮耦合对瓜尔豆品质的影响	41
5.4 基于主成分分析及隶属函数的瓜尔豆水氮耦合综合效应评价	44
5.5 讨论	47
第6章 结论与展望	48
6.1 结论	48
6.2 展望	49
参考文献	51
致谢	59
作者简介	60

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

我国作为农业强国，灌溉规模位居全球首位^[1]。然而，水资源利用效率低下导致肥料大量流失和水肥利用效率不高等问题在我国依然显著^[2]，由此引发的耕地生态环境问题日益严重^[3,4]。因此，通过深入研究农业现代化灌溉水利用规律和施肥调控原理，是我国推动农业生产方式变革发展的重要举措^[5]。新疆作为全国典型的缺水型粮食主产区之一，2021年全疆用水总量为571.4亿立方米，其中灌溉用水量为522.8亿立方米，水资源的短缺严重制约着新疆农业的发展^[6]。

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^[7]。瓜尔豆也是一种用途广泛的工业原料作物，其主要产物瓜尔胶（半乳甘露聚糖）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^[8]，具有良好的社会效益和经济效益^[9,10]。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^[11,12]。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^[13]，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^[14]。因此，水资源短缺成为限制新疆农业发展的一个重要因素^[15]。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^[16]，迄今已应用了27a^[17]，应用面积已超过350万 hm^2 ^[18]。膜下滴灌技术具有节水、高效，提高作物产量和品质的优点^[19]。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^[20]，且农业用水量占比较大，亟需进一步挖掘农业节水潜力^[21]。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^[22]。因此，氮素对作物的生长、产量和品质同样起到重要作用^[23]。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^[24-26]。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^[27]。

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^[28-30]，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，旨在为北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。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水氮耦合研究现状

传统的农耕方式不仅消耗大量水资源和肥料，作物的产量提升不显著，超量灌水及施肥也会对环境造成不同程度的污染^[31]，这与我国走的绿色可持续发展之路相悖^[32]。瓜尔豆作为一种经济价值较高的作物，在全球多个国家广泛种植^[33]。在作物种植过程中，水和肥的合理使用对农业的发展起着至关重要的作用^[34]，适宜的灌水可以促进植物的生长发育，最终也会显著提高瓜尔豆的产量和品质，而适当增加氮肥施用量可以增加土壤中的氮素含量，促进植物根系生长，更好从土壤中汲取养分，从而实现水肥之间的相互促进和相互制约^[35]。

1.2.1.1 水氮耦合对作物生长指标的影响

适宜的水分是植物生长发育乃至生存必不可少的条件之一，养分也在水的作用下被输送至植物各个部位以供吸收^[36]。植物的茁壮成长也离不开土壤中的氮、磷、钾等各种养分，并且各养分含量的占比也关乎作物的健康生长^[37]。

李翎华等^[38]研究表明，在适宜的水肥交互条件下，甜椒的各生长指标均有显著提升，而其他低水低肥以及高水高肥耦合条件下，水肥协同的效果并不显著，甜椒的生长速度也较为缓慢。赵策等^[39]实验结果指出，随着土壤含水量的增加，植物的代谢能力也会有所增强，从而有利于作物株高的增加，但随着进一步施加肥料，作物的正常发育反而受到一定的抑制。杜常亮等^[40]研究表明，水肥耦合对马铃薯株高的影响显著，研究结果显示，在马铃薯生长旺盛时期，适当增加灌水定额及增施肥料有利于马铃薯的生长，进而提高其产量。高子星等^[41]的研究表明，水肥交互条件下对辣椒的生长指标影响显著，但过量的施肥灌水条件下，辣椒的生长指标呈现下降趋势。李超等^[42]研究表明，草莓对水肥的需求并不是固定的，在生长初期对水肥的要求较低，但在生长旺盛时期及果实成熟期对水肥具有较大需求，适宜的灌水施肥有利于植株生长，作物产量也得到显著提升。综上所述，科学的灌水施肥会促进植株株高、茎粗、叶面积指数等生长指标的生长，然而过量会对植物的生长起到抑制作用。

1.2.1.2 水氮耦合对作物耗水特性的影响

植物在一般在生长初期对土壤水分含量要求较低，但生长旺盛时期（如开花坐果期）植株需要大量水分，因此不同生育时期植物对水的需求也不同。因此，在现如今淡水资源十分有限的情况下，探索适宜的水肥种植模式以期起到节水、增产、提质的效果至关重要^[43]。李炫臻等^[44]的研究表明，马铃薯的耗水量在收获期最高，而在生长末期（淀粉积累期）马铃薯的耗水量会逐渐减少。王小燕等^[45]的研究表明，低水低氮耦合条件下小麦的总耗水量显著低于正常灌溉条件下的小麦。崔政军等^[46]的研究表明，灌溉和施肥会显著影响作物的耗水量，灌溉水平的提高，以及施肥水平的提高都会显著提高作物的耗水量。冯福学等^[47]的研究表明，燕麦在抽穗至灌浆阶段耗水量最大，在整个生命周期中用水强度最初增加，随后在施肥氮量相同的情况下用水量减少。温越等^[48]的研究表明，生殖期用水量随生长周期推进而增加，呈“双峰”曲线，其中灌溉影响最显著。侯裕生等^[49]研究表明，不同的水肥耦合模式下，葡萄的耗水量具有显著差异，耗水量与耗水强度呈先升高后降低趋势。综上所述，不同水氮耦合模式下作物的耗水特性具有显著差异。

1.2.1.3 水氮耦合对作物水肥利用效率的影响

水不仅是参与作物光合作用并制造有机物的主要原料，还负责将土壤中的影响物质通过根系吸收后运送至植株的各个部位^[50]。在一定范围内增加土壤湿度，可提高土壤的水势，而增加土壤养分到达根系表面的水势，有利于提高土壤中水和肥料的利用率，在促进和支持有机物和肥料的高效转化方面发挥重要作用^[51-53]。惠薇等^[54]在小麦研究中指出，水氮对作物的作用有一定限度，当水氮施用过量时会使作物的生长发育受到抑制。曹正鹏等^[55]研究表明，随着灌溉水平的不断提高，起初马铃薯的灌溉水利用效率不断提高，但当灌水定额超过一定数量时，马铃薯的灌溉水利用效率反而会出现一定程度的下降。燕鹏等^[56]的研究表明，胡麻随着灌水量的不断增加，灌溉水利用效率呈现先增加后减少的趋势，随着施氮量的不断增加，也呈现出相同的变化规律。薛道信等^[57]的研究表明，少量的缺水条件下，作物的水分利用效率反而会有一定程度的增加。刘玉等^[58]研究指出，在番茄整个生育期内，灌水量及施肥量两者交互对番茄水氮利用效率影响显著，灌水下限的不断减小以及施氮量的上升均会显著降低番茄的水分利用效率。范海燕等^[59]研究指出，在同一灌水水平下，随着施氮量的不断增高，塔菜花氮肥偏生产力显著下降。综上所述，适宜的水氮耦合有利于土壤中有机质和肥料的转化，从而提高水肥利用率。然而过量的施肥灌水反而会使肥料偏生产力降低，造成浪费。

1.2.1.4 水氮耦合对作物产量的影响

水分状况是影响植物生长和发育的最重要因素之一，确保正确的生长和发育对保

证植物的产量和质量至关重要^[60]。灌溉不足会导致作物不能健康生长，可能会导致作物叶片发黄、脱落，影响其光合作用及营养物质的积累，最终导致产量降低^[61]。氮是植物生长和发育的重要元素，施用量对最终产量和质量也有重大影响^[62]。

姜小凤等^[63]研究表明，正常灌溉和增加氮肥可提高春小麦产量，而水胁迫和减少氮肥可进一步提高产量。杨昉等^[64]的研究表明，增施氮肥或增加灌溉可以弥补这两种不足，但过量施氮会产生负面影响。郝琨^[65]的研究表明，增施氮肥能减轻水分亏缺对作物造成的影响，促进植物的生长发育。Santos MR^[66]指出适宜的水氮耦合种植模式下能显著提高作物的产量及水氮利用效率。Yin Juan^[67]指出短期水氮耦合对枸杞根区土壤养分和微生物生物量有一定的调控作用，但土壤养分和微生物生物量比值变化不显著，即短期水氮调控对土壤养分平衡没有显著干扰。陈丽楠^[68]指出在适量的灌水施肥条件下，葡萄生长最为旺盛，果实干物质积累量最多，进而得到较高产量。何至杭^[69]研究表明水分胁迫条件下，辣木分枝随施氮量增加而下降，而高氮会降低生物量，如果在没有氮肥施入的情况下，随着灌溉水平的不断提高，作物的产量逐渐降低。Wen Junyue^[70]研究表明高水高氮条件下温室甜瓜干物质积累量和产量最高。李武超等^[71]说明适宜的水分会促进植物根系的伸长，从而更好地从土壤中吸取养分，适宜的水氮互作会显著提高作物生物量的积累，但过度的灌水施肥会对作物的生长产生一定的抑制作用。刘坤雨^[72]研究表明在灌溉水平不变的情况下，增施氮肥有利于果实成长，因此，适宜的水氮互作条件下有利于提高梨树产量。吴海卿^[73]指出提高灌水水平有利于植物吸收氮素，水分亏缺条件下增施氮肥可以缓解水分胁迫对作物产生的伤害。Ma Zhenghu^[74]研究表明灌溉量对枸杞子生长发育影响最大，其次是水氮交互作用，再次是施氮量，适度增加灌溉量有利于枸杞植株的生长发育。除春梢期外，灌溉和施氮均显著影响枸杞叶片 SPAD 值，但水氮互作效应不显著。王国兴^[75]研究表明过量水氮会导致作物徒长，最终造成减产。戴明等^[76]研究温室黄瓜时发现，水氮耦合对其生长具有显著影响，增加灌水量及增施氮肥均会提高黄瓜产量。李振松^[77]等研究结果显示，随着灌水水平的不断提高，燕麦的产量得到显著提升，而随着施氮量的增加，燕麦品质得到显著提高。尹娟^[78]研究表明，提高灌水水平和提高施肥水平对马铃薯的影响机制是相反的。赵财^[79]研究证明，在亏缺灌溉时，增施氮肥能减少水分亏缺对小麦的影响，从而获得较高产量。综上所述，适宜的水氮组合可以显著增加作物产量，提高水氮利用效率。然而适当减水减肥虽然会造成一定的减产，但节约成本，反而获取更大收益。

1.2.2 瓜尔豆对环境响应的研究现状

1.2.2.1 瓜尔豆对土壤和水分响应的影响研究

吉雪花^[30]采用膜下滴灌方式,研究4个水分处理,对瓜尔豆生长与逆境生理指标的影响,结果表明,在轻度水分胁迫下,瓜尔豆产量达到最大值,瓜尔豆各产量性状及生理生长指标也处于一个较高水平。Seyed Hassan 等^[80]研究结果指出,在瓜尔豆植株生长初期、发育期、中期和后期的最佳灌水水平依次为在充分灌溉情况下的60%、80%、100%和40%,以提高瓜尔豆植株的数量性状值。

瓜尔豆耐贫瘠,对土壤适应性强,对水涝敏感,但对盐碱的耐受较高,是极好的土壤改良作物,能够增强土壤肥力,且适合与其他作物轮作^[81]。Tejaswini 等^[82]在研究结果中指出当无机肥料与有机肥配合施用,肥料有助于将其中的养分快速释放到植物体内,而含有微量和大量养分的有机肥则为植物和土壤提供养分,这有助于通过提高微生物活性来提高土壤肥力,进而促进瓜尔豆的营养生长和生殖生长。

1.2.2.2 瓜尔豆对种植密度及光照响应的影响研究

郑群^[29]认为,随着种植密度的增高,瓜尔豆的产量也逐渐上升,但当种植密度到达一定数量时,进一步提高种植密度瓜尔豆质量反而会有所下降。Gholamreza 等^[83]研究结果表明,瓜尔豆产量对种植密度有较强的依赖性。较高的种植密度可获得较高的种子产量,而较低的种植密度可获得较高的生物产量。Mevada 等^[84]在研究中指出在较宽的间距下,一些产量成分可能在单个植物的基础上增加,但在单位面积基础上会减少,而在狭窄的间距下,每单位面积的植物数量可能会增加,但产量成分可能会在单个基础上下降,最终生物产量会降低。Heidar 等^[85]研究表明不同播期对瓜尔豆半乳甘露聚糖(瓜尔胶)含量与蛋白质和碳水化合物含量都有显著影响。Maryam 等^[86]在研究中指出在所研究的大部分性状中,植株密度的影响是显著的,包括物候性状和株高。此外,播期×密度互作对籽粒产量、总干物质和收获指数的差异也有显著影响。这说明,瓜尔豆获得高产取决于选择合适的密度,当然也取决于播期。

郑光华等^[87]认为,温度对瓜尔豆种子萌发影响极显著,合适的温度会大大提高瓜尔豆的发芽率。瓜尔豆对光照的要求较严格,在其生长发育过程中需要较强的光强,是一种严格的短日照作物^[88]。瓜尔豆对光强的反映敏感,当光强降低至自然光强的50%和25%时,其产量分别降至43.79%和35.08%^[89]。