

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0521

张掖绿洲娃娃菜高效生产的水氮耦合技术探究

魏周秀¹, 伍东², 李文德¹, 华军³

(1. 张掖市经济作物技术推广站 甘肃张掖 734000; 2. 张掖市农业科学研究院 甘肃张掖 734000;
3. 张掖市农业技术推广站 甘肃张掖 734000)

摘要: 针对西北干旱区娃娃菜水氮管理瓶颈问题, 探究集成张掖绿洲娃娃菜高效生产的水氮耦合技术, 设置灌水量(3600、4050、4500 m³·hm⁻²)与施氮量(375、412.5、450 kg·hm⁻²)双因素试验, 测定娃娃菜农艺、生理生化、水分利用效率、氮肥偏生产力及土壤理化酶活性指标, 运用耦合生产函数与隶属函数进行综合评价。结果表明, 适宜水氮耦合能协同提升娃娃菜的光合作用与抗氧化能力, 提升农艺性状, 增加各器官的养分积累, 增加娃娃菜产量。并且能够改善土壤的理化性质和酶活性。灌溉量 4050 m³·hm⁻²、施氮量 450 kg·hm⁻² 组合产量达 97 016.70 kg·hm⁻², 水分利用效率为 234.47 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 光合速率为 3.89 μmol·m⁻²·s⁻¹, 显著优于其他组合。试验建立的水氮生产函数 R²=0.825, 灌溉量 4050 m³·hm⁻²、施氮量 450 kg·hm⁻² 组合主成分得分 0.776, 隶属函数得分 0.612。综上所述, 基于生产函数和隶属函数综合研究水氮耦合效应, 灌水 4050 m³·hm⁻²+施氮 450 kg·hm⁻² 组合为最优水氮管理模式, 为西北绿洲娃娃菜水氮精准调控提供了技术参数。

关键词: 水氮耦合; 娃娃菜; 节水节肥; 旱区栽培; 土壤健康

中图分类号: S634.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-2871(2026)05-186-10

Research on water-nitrogen coupling technology for efficient production of baby cabbage in Zhangye Oasis

WEI Zhouxiu¹, WU Dong², LI Wende¹, HUA Jun³

(1. Economic Crops Technology Promotion Stations of Zhangye City, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. Zhangye Academy of Agricultural Sciences, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. Zhangye Agricultural Technology Extension Station, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: To address the bottleneck issues in water and nitrogen management for baby cabbage production in the arid regions of Northwest China, this study explored the water-nitrogen coupling technology suitable for efficient production of baby cabbage in Zhangye Oasis. A two-factor experiment was conducted with three irrigation amounts (3600, 4050, 4500 m³·hm⁻²) and three nitrogen application rates (375, 412.5, 450 kg·hm⁻²). The agronomic traits, physiological and biochemical indicators, water use efficiency, nitrogen partial factor productivity, as well as soil physicochemical properties and enzyme activities were measured. The production function and membership function were coupled for comprehensive evaluation. The results showed that appropriate water-nitrogen coupling synergistically enhanced the photosynthesis and antioxidant capacity, improved agronomic traits, promoted nutrient accumulation in various organs, and increased the yield of baby cabbage. Moreover, it also improved soil physicochemical properties and enzyme activities. The combination of 4050 m³·hm⁻² irrigation and 450 kg·hm⁻² nitrogen application had a yield of 97 016.70 kg·hm⁻², a water use efficiency of 234.47 kg·hm⁻²·mm⁻¹, and a photosynthetic rate of 3.89 μmol·m⁻²·s⁻¹, which was significantly better than other combinations. The established water-nitrogen production function had an R² value of 0.825, and the principal component score of the 4050 m³·hm⁻² irrigation and 450 kg·hm⁻² nitrogen application combination was 0.776, with a membership function score of 0.612. In conclusion, based on the comprehensive analysis of water-nitrogen coupling effects using the production function and membership function, the combination of 4050 m³·hm⁻² irrigation and 450 kg·hm⁻² nitrogen application represents the optimal water-nitrogen management model, providing technical parameters for precise water and nitrogen regulation in baby cabbage production in the Northwest Oasis.

Key words: Water-nitrogen coupling; Baby cabbage; Water and fertilizer conservation; Cultivation in arid areas; Soil health

收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2026-01-20

基金项目: 甘肃省陇原青年英才项目; 甘肃省科技计划资助项目(24CXNG003); 张掖市科技计划资助项目(ZY2024RC01)

作者简介: 魏周秀, 女, 高级农艺师, 主要从事蔬菜栽培技术示范推广工作。E-mail: 309464357@qq.com

通信作者: 伍东, 男, 高级农艺师, 主要从事农业技术推广工作。E-mail: 173272748@qq.com

高原夏菜产业现如今是张掖市四大百亿级产业之一,已成为该区农业增效和农民增收的重要支柱产业。在高原夏菜中,娃娃菜生长期较短、内叶嫩黄、质地脆嫩、口味极佳,富含多种矿物质和膳食纤维,具有很高的食用价值和经济价值,深受菜农喜爱^[1-3]。张掖市属于典型的资源型缺水地区,发展高水效农业已刻不容缓。目前,张掖地区现有的水肥耦合模式与张掖市娃娃菜的关联性较低,缺乏相应的理论研究,且对土壤理化性质、植株光合特性及生化特性的影响机制尚未明晰。分析张掖地区不同水肥耦合模式及对土壤理化性质、植株光合特性、农艺特性、生化特性的影响,对指导张掖娃娃菜产业健康发展具有重要作用。前人研究表明,水分和养分之间存在显著的交互效应^[4]。水分不足会限制肥效,而水分过多则易导致肥料淋溶损失^[5]。同样,施肥量也需适宜,过量或不足均会抑制植物对养分的吸收^[6]。因此,水肥配置不合理会导致氮肥和磷肥难以被植物充分吸收,造成肥料积累,甚至引发养分间的拮抗效应^[7-8]。周亚婷等^[9]发现,水肥供应显著影响甘蓝对氮、磷、钾的吸收,高肥水平可提升吸收量,而较低的肥料水平则不利于氮和钾的

累积。秦启杰等^[10]研究表明,水肥耦合显著影响紫甘蓝氮、磷、钾吸收,其中在田间最大持水量 60% 结合减肥 20% 的组合模式下,植株吸收的氮肥量和钾肥量均达到最大。杨彬等^[11]的研究也指出,优化灌水定额与施氮量组合能显著提高娃娃菜的经济产量,体现出水氮耦合的强互作效应。

本研究以娃娃菜为研究对象,综合考量不同水氮耦合模式对娃娃菜光合特性、农艺特性、生化特性,以及对土壤理化性质及酶活性的影响,基于生产函数和隶属函数综合研究水氮耦合效应,提出张掖地区娃娃菜高水效、高产量的产能提升模式,为西北旱区娃娃菜水氮精准调控提供技术参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

2023 年 3—10 月,试验点位于甘肃省张掖市甘州区党寨镇陈寨村,采用露地种植,基本土壤地力情况见表 1。该地区多年平均气温 7 °C,1 月平均气温 -9.2 °C;7 月平均气温 21.5 °C。年平均无霜期 156 d,全年降雨量 118.4 mm,降水集中在每年 6—9 月,全年日照 2550~3500 h。

表 1 土壤初始地力
Table 1 Initial soil fertility

指标 Index	pH	w(全氮) Total nitrogen content/ (g·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	土壤蔗糖酶活性 Soil sucrose activity/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	土壤脲酶活性 Soil urease activity/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	土壤过氧化氢酶活性 Soil catalase activity/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
数值 Value	8.23	0.82	230.13	20.89	11.68	23.11	0.321	2.04

1.2 试验设计

供试娃娃菜品种为当地主栽的金玉黄,由张掖市兆田生态农业有限公司提供。如表 2~3 所示,本试验采用灌水量(W)、施氮量(N)2 因素 3 水平,随

表 2 试验设计
Table 2 Experimental design

编号 No.	处理 Treatment	灌水量 Irrigation volume/(m ³ ·hm ²)	施氮量 Nitrogen application rate/(kg·hm ²)
1	W1N1	3600	375.0
2	W1N2	3600	412.5
3	W1N3	3600	450.0
4	W2N1	4050	375.0
5	W2N2	4050	412.5
6	W2N3	4050	450.0
7	W3N1	4500	375.0
8	W3N2	4500	412.5
9	W3N3	4500	450.0

机机组排列,试验设 9 个处理,3 次重复,共 27 个小区。每个小区面积为 7.0 m²(长 10 m×宽 0.7 m),行距 30 cm,株距 24.5 cm,每个小区定植 82 株。其余田间管理措施均与当地常规栽培模式保持一致。试验地周边设置保护行,以消除边际效应的影响。所有处理均统一采用穴盘育苗方式进行移栽。

1.3 测定项目

1.3.1 生长指标测定 参考焦兆祥等^[12]试验测定方法,用直尺测量植株自然状态下的株高(从基部至最高点)和开展度(植株外叶最宽处的直径);使用游标卡尺测量叶球横径与纵径,并计算球形指数(纵径/横径);通过手感分级法评估叶球紧实度。用电子秤称量采收后叶球的单球质量,并计算净菜率(净球质量/单球质量×100%)。最终,通过单球质量和单位面积定植株数折算单位面积产量。

1.3.2 生理生化指标测定 在娃娃菜成熟前期,每

表3 不同时期灌水量和施氮量

Table 3 Irrigation water volume and nitrogen application volume in different periods

时期 Period	灌水量 Irrigation volume/(m ³ ·hm ²)			施氮量 Nitrogen application rate/(kg·hm ²)		
	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3
种植前(基肥) Before planting(Base fertilizer)				75.00	82.50	90.00
定植期 Transplanting period	1200	1425	1650	30.00	33.00	36.00
莲座期 Rosette stage	675	750	825	90.00	99.00	108.00
结球初期 Early head-forming stage	825	900	975	90.00	99.00	108.00
叶球膨大期 Head expansion stage	900	975	1050	90.00	99.00	108.00
合计 Total	3600	4050	4500	372.00	412.50	450.00

个小区随机选取 5 株长势一致的娃娃菜,取相同部位相同面积的叶片鲜样,采用斐林试剂滴定法测定还原糖含量,采用 2,6-二氯酚测定维生素 C 含量。在娃娃菜结球后期,选择晴朗的上午 10:00—12:00,在各试验小区随机选取 5 株生长状况一致的植株,使用浙江托普云农公司生产的光合测定仪 TP-PM-2,统一选取从心叶(最内侧未展开叶)向下数的第 3 至第 5 片功能叶,测定叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、细胞间 CO_2 浓度(C_i)及气孔导度(G_s),每株测 3 片叶,测定 5 株取平均值。

在娃娃菜成熟前期,每个小区随机选择 5 株长势一致的娃娃菜,统一选取从心叶(最内侧未展开叶)向下数的第 3 片功能叶面积同样大小的鲜样,用液氮保存,带回实验室,采用生化指标测定方法^[13],测定每个处理的 POD、SOD 活性及 MDA 含量。

在成熟期,每个小区随机选择 5 株长势一致的娃娃菜,统一选取从心叶(最内侧未展开叶)向下数的第 3 片功能叶面积相同大小的叶片不同部位,用自来水清洗干净后,带回实验室,参照文献[14],采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法对植株样品消解后,分别用凯氏定氮法、钼蓝比色法和火焰光度法测定植株各部分的全氮、全磷和全钾含量。

1.3.3 土壤理化性质及酶活性测定 土壤样品于 2023 年 8 月按“S”形多点采样,取土壤表层 0~20 cm 的土壤样品,混合均匀,参照文献[13, 15-16],取一部分新鲜混合土样,风干过筛后,进行土壤有机质、土壤全氮、土壤有效磷、土壤速效钾含量和土壤 pH 值的测定,再取一部分新鲜混合土样过筛后,测定土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。

水分利用效率(WUE)^[12]计算公式如下:WUE= GY/ET ,式中,WUE 为水分利用效率(kg·hm²·mm⁻¹);GY 为产量(kg·hm²);ET 为耗水量(mm)。

氮肥偏生产力=产量/施纯氮量。

1.4 数据处理

试验采用 Microsoft Excel 进行试验数据整理,采用 SPSS 20.0 进行方差分析和主成分分析^[17],采用 Origin 24.0 进行相关分析和作图。

2 结果与分析

2.1 水氮调控对娃娃菜生长指标的影响

由表 4 可知,不同水氮耦合处理均能保证娃娃菜完成生长发育,但不同水肥处理下生育期长短具有差异。同一施氮水平下,灌水量越多,生育期越长;同一灌水处理下,施氮量越多,生育期越长。综合来看,水氮处理会影响到娃娃菜的生长发育,其中处理 9 生育期最长,为 58 d;处理 1 生育期最短,仅有 53 d;其余试验处理生育期为 54~57 d。不同水氮耦合处理主要影响到娃娃菜莲座期-结球期的发育,水肥供给越多,莲座期发育时间越长,使得娃娃菜结球越迟。

由表 5 可知,不同水氮处理,其娃娃菜农艺性状具有显著差异,在低、中灌水处理水平下,施氮量越多,农艺性状越好,植株高度、开展度、叶球纵径、叶球横径、球形指数各指标都有所增加,在高灌水量处理水平下,施氮量越多,农艺性状越差,呈现施氮抑制效应。在低、中施氮肥水平下,灌水量越多,农艺性状越优;在高施氮水平下,灌水量越多,农艺性状越差,出现养分淋溶现象。

由表 6 可知,不同灌水量与施氮量处理对娃娃菜产量、品质及资源利用效率具有显著影响,存在水氮互作效应。随灌水量增加,在相同施氮水平下,娃娃菜单球质量与产量总体呈上升趋势,水分利用效率则随灌水量增加呈先升后降的趋势,表明过量灌水可能导致水分利用效率降低。在低灌水条件下,增加施氮量使单球质量与产量呈先降后升趋势,维生素 C 含量提升,但还原糖含量下降;在中灌水

表4 不同处理娃娃菜生育期比较

Table 4 Comparison of growth stages of baby cabbage under different treatments

处理 Treatment	播种期 Sowing time	定植期 Planting date	莲座期 Lotus period	结球期 Heading stage	成熟期 Maturation stage	生育期 Growth period/d
1	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月25日 May 25th	6月14日 June 14th	7月3日 July 3rd	53
2	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月26日 May 26th	6月15日 June 15th	7月5日 July 5th	55
3	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月26日 May 26th	6月16日 June 16th	7月4日 July 4th	54
4	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月25日 May 25th	6月16日 June 16th	7月6日 July 6th	56
5	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月25日 May 25th	6月16日 June 16th	7月6日 July 6th	56
6	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月24日 May 24th	6月17日 June 17th	7月7日 July 7th	57
7	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月24日 May 24th	6月17日 June 17th	7月6日 July 6th	56
8	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月25日 May 25th	6月17日 June 17th	7月7日 July 7th	57
9	4月11日 April 11th	5月12日 May 12th	5月24日 May 24th	6月17日 June 17th	7月8日 July 8th	58

表5 不同处理娃娃菜农艺性状比较

Table 5 Comparison of agronomic traits of baby cabbage under different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	开展度 Spread/cm	叶球纵径 Bulb vertical diameter/cm	叶球横径 Bulb transverse diameter/cm	球形指数 Bulb shape index	紧实度 Compactness
1	32.7±1.56 f	47.7±1.88 f	19.3±1.56 h	14.7±1.03 e	1.51±0.23 f	半紧 Half-tight
2	33.8±1.78 e	47.1±3.01 g	20.0±2.03 g	14.7±0.88 de	1.50±0.33 g	紧 Tight
3	38.1±1.24 c	48.3±2.07 e	20.4±1.24 f	14.8±1.27 de	1.57±0.41 d	紧 Tight
4	40.0±2.66 b	50.5±2.33 b	21.1±1.77 d	15.3±0.97 a	1.62±0.19 b	紧 Tight
5	36.8±2.01 d	48.7±1.28 de	19.4±2.26 h	15.0±1.48 c	1.55±0.25 e	紧 Tight
6	43.5±3.11 a	50.8±2.77 b	22.3±1.12 a	15.4±1.56 a	1.65±0.11 b	紧 Tight
7	42.1±2.55 a	51.2±1.89 a	21.9±2.01 b	15.3±1.20 ab	1.66±0.29 a	紧 Tight
8	39.4±1.77 c	49.5±2.54 c	21.6±1.33 c	15.1±1.99 bc	1.62±0.38 bc	紧 Tight
9	39.3±2.01 b	49.0±1.74 d	21.0±1.56 e	14.9±2.11 d	1.60±0.26 c	紧 Tight

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

条件下,单球质量与产量同样呈先降后升趋势,处理6(灌水量 $4050 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 在产量、维生素 C 含量及水分利用效率上均表现突出;在高灌水条件下,单球质量、产量及水分利用效率均随施氮量增加而持续下降,但处理7(灌水量 $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的氮肥偏生产力最高。净菜率与维生素 C 含量总体随水氮供应增加呈先升高后降低趋势,还原糖含量呈降低趋势。

2.2 水氮调控对娃娃菜生理生化指标的影响

由表7可知,在低灌水条件下,净光合速率随施氮量增加呈逐步上升趋势;在中灌水条件下,净光合速率随施氮量增加表现为先降后升,于处

理6达到最高值;而在高灌水条件下,净光合速率随施氮量增加呈下降趋势。同一施氮水平下,净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均随灌水量的增加而整体提高。胞间 CO_2 浓度在不同水氮处理下差异不显著。

由表8可知,不同灌水量与施氮量处理对娃娃菜各生化指标具有显著影响。随灌水量增加,在相同施氮水平下,过氧化物酶活性总体呈上升趋势,超氧化物歧化酶活性亦随灌水增加而提高,丙二醛含量呈相反趋势,叶绿素含量则随灌水量增加呈先升后降趋势。过氧化物酶与超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量、叶绿素含量在处理6(灌水量

表6 不同处理对娃娃菜产量、品质性状及资源利用效率比较

Table 6 Comparison of yield, quality traits and resource utilization efficiency of baby cabbage under different treatments

处理 Treatment	单球质量 Individual ball mass/g	净菜率 Net vegetable rate/%	折合产量 Equivalent output/(kg·hm ²)	w(还原糖) Reducing sugar content/%	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·kg ⁻¹)	水分利用效率 Water use efficiency/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of nitrogen/(kg·kg ⁻¹)
1	456.49 e	51.1	83 963.85 c	3.37±0.11 a	5.19±0.27 ab	216.35 d	222.39 d
2	438.24 f	49.8	83 394.75 c	3.21±0.09 b	5.26±0.36 ab	217.67 d	203.55 h
3	482.35 d	53.2	90 593.70 b	2.89±0.17 d	5.48±0.19 a	228.61 b	201.32 i
4	534.87 a	56.5	93 131.55 ab	2.51±0.08 g	5.88±0.25 a	221.08 c	248.35 b
5	468.90 e	52.1	90 408.90 b	3.09±0.06 c	5.36±0.18 b	213.96 e	219.17 e
6	516.84 b	53.1	97 016.70 a	2.32±1.03 i	6.14±0.25 a	234.47 a	215.59 f
7	549.07 a	56.8	94 022.10 ab	2.44±1.27 h	6.02±0.18 a	203.24 f	250.73 a
8	523.58 b	55.7	92 829.90 b	2.76±0.03 f	6.01±0.25 a	199.16 g	225.04 c
9	501.20 c	53.7	92 364.90 b	2.77±0.07 e	5.77±0.12 a	197.34 g	205.26 g

表7 不同处理娃娃菜光合特性比较

Table 7 Comparison of photosynthetic character of baby cabbage under different treatments

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductivity/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	2.62±0.15 e	1.98±0.12 h	320±2.5 a	126±3.55 i
2	2.74±0.12 e	2.06±0.21g	317±3.2 ab	131±2.74 h
3	2.82±0.13 de	2.66±0.13 e	318±2.6 ab	158±2.66 f
4	3.48±0.22 cd	3.01±0.33 c	320±2.1 a	181±3.18 c
5	2.71±0.14 e	2.57±0.22 f	321±2.0 a	146±1.77 g
6	3.89±0.23 a	3.11±0.22 a	320±1.8 a	198±2.13 a
7	3.77±0.12 ab	3.04±0.14 b	319±1.6 a	186±3.14 b
8	3.52±0.34 bc	2.94±0.11 d	320±1.8 a	177±2.28 d
9	3.40±0.25 c	2.92±0.32 d	318±2.2 ab	164±1.77 e

表8 不同处理娃娃菜生化指标比较

Table 8 Comparison of biochemical indicators of baby cabbage under different treatments

处理 Treatment	过氧化物酶活性 Peroxidase activity/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	b(丙二醛) Malondialdehyde content/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	w(叶绿素) Chlorophyll content/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
1	21.68±1.12 g	3.02±0.08 d	1.73±0.03 a	0.44±0.08 i
2	26.48±0.88 f	3.25±0.11 d	1.66±0.07 a	0.47±0.03 h
3	31.88±0.38 c	4.14±0.03 c	1.32±0.01 b	0.77±0.04 f
4	33.85±0.77 b	5.14±0.14 b	0.35±0.03 d	0.96±0.05 c
5	30.63±1.24 d	4.02±0.13 c	0.77±0.08 c	0.58±0.02 g
6	35.17±0.94 a	5.89±0.10 a	0.20±0.02 e	1.22±0.05 a
7	34.14±0.38 b	5.38±0.08 b	0.25±0.04 e	1.08±0.03 b
8	31.46±1.08 c	5.05±0.04 b	0.38±0.02 d	0.90±0.03 d
9	30.26±1.25 e	4.28±0.12 c	0.45±0.03 d	0.84±0.02 e

4050 m³·hm⁻²、施氮量 450 kg·hm⁻²)达到峰值。

2.3 水氮调控对娃娃菜养分指标的影响

由表9可知,不同灌水量与施氮量处理对娃娃菜各部位氮素积累的调控规律存在显著差异。随

灌水量增加,在相同施氮水平下,娃娃菜结球初期与采收期的叶球、外叶及根系的氮素含量均呈现升高趋势,表明增加灌水量能持续促进氮素向各器官转运与积累。在低灌水处理下,增加施氮量可提高各部位氮素含量;在中灌水处理下,氮素含量随施氮量增加呈先降后升的变化,即在 412.5 kg·hm⁻²水平出现回落,至 450.0 kg·hm⁻²水平达到峰值;而在高灌水处理下,氮素含量随施氮量增加反而持续下降,表现为 375.0 kg·hm⁻²处理最高。此外,在所有处理中,氮素积累均表现出优先向叶球分配的趋势。

由表10可知,不同灌水量与施氮量处理对娃娃菜各部位磷素积累的影响表现出与氮素吸收相似的变化规律。随灌水量增加,在相同施氮水平下,娃娃菜结球初期与采收期的叶球、外叶及根系的磷素含量均整体呈上升趋势。在低灌水处理下,增加施氮量可提高各部位磷素含量;在中灌水处理下,磷素含量随施氮量增加呈先下降后上升的趋势;在高灌水处理下,磷素含量则随施氮量增加而持续降低。此外,磷素在植株中的分配也以叶球中

表9 不同处理娃娃菜不同时期不同部位氮素含量比较
Table 9 Comparison of nitrogen content in different parts of baby cabbage at different stages under different treatments

处理 Treatment	结球初期 Early stage of ball formation			采收期 Harvest period		
	叶球 Head	外叶 Outer leaf	根 Root	叶球 Head	外叶 Outer leaf	根 Root
1	4.83±0.12 g	4.33±0.24 g	4.18±0.20 h	9.29±0.13 g	8.19±0.22 g	7.96±0.22 g
2	4.98±0.27 h	4.58±0.17 h	4.33±0.13 i	9.88±0.15 f	8.66±0.13 h	8.14±0.18 f
3	5.37±0.11 e	5.01±0.08 e	4.78±0.09 f	10.56±0.07 d	9.47±0.10 e	8.88±0.25 d
4	5.69±0.08 c	5.33±0.11 b	5.02±0.13 c	11.56±0.06 b	9.63±0.23 c	9.42±0.32 b
5	5.26±0.24 f	4.95±0.13 f	4.66±0.05 g	10.32±0.23 e	9.30±0.14 f	8.62±0.24 e
6	6.03±0.18 a	5.58±0.15 a	5.18±0.15 a	12.11±0.18 a	10.08±0.28 a	9.69±0.17 a
7	5.88±0.14 b	5.42±0.22 b	5.09±0.07 b	12.05±0.20 a	9.88±0.31 b	9.55±0.16 b
8	5.53±0.24 d	5.29±0.18 c	4.93±0.09 d	11.48±0.17 b	9.61±0.27 cd	9.28±0.22 c
9	5.48±0.20 d	5.11±0.17 d	4.88±0.14 e	11.28±0.11 c	9.59±0.25 d	9.19±0.19 c

表10 不同处理娃娃菜不同时期不同部位磷素含量比较
Table 10 Comparison of phosphorus content in different parts of baby cabbage at different stages under different treatments

处理 Treatment	结球初期 Early stage of ball formation			采收期 Harvest period		
	叶球 Head	外叶 Outer leaf	根 Root	叶球 Head	外叶 Outer leaf	根 Root
1	4.96±0.03 g	4.55±0.11 i	4.27±0.11 h	9.88±0.21 i	8.89±0.15 i	8.20±0.04 i
2	5.03±0.06 g	4.88±0.08 h	4.42±0.08 g	10.08±0.13 h	9.24±0.10 h	8.88±0.08 h
3	5.44±0.04 e	5.21±0.16 f	5.03±0.06 e	10.64±0.10 f	9.88±0.08 f	9.55±0.14 f
4	5.63±0.05 c	5.51±0.04 a	5.26±0.04 c	11.30±0.08 c	10.41±0.05 c	10.20±0.10 c
5	5.25±0.08 f	5.04±0.05 g	4.89±0.08 f	10.23±0.11 g	9.70±0.07 g	9.42±0.12 g
6	5.89±0.04 a	5.68±0.08 a	5.55±0.07 a	11.48±0.16 a	10.74±0.06 a	10.55±0.08 a
7	5.77±0.10 b	5.53±0.04 b	5.41±0.05 b	11.35±0.09 b	10.56±0.11 b	10.27±0.13 b
8	5.61±0.07 cd	5.44±0.10 d	5.19±0.09 d	11.09±0.20 d	10.26±0.06 d	10.15±0.09 d
9	5.58±0.06 d	5.30±0.13 e	5.15±0.03 d	10.77±0.08 e	10.10±0.12 e	9.76±0.08 e

的含量最高。

由表 11 可知,不同灌水量与施氮量处理对娃娃菜各部位钾素积累的影响表现出与氮、磷吸收相似的规律。随灌水量增加,在相同施氮水平下,娃娃菜结球初期与采收期的叶球、外叶及根系的钾素

含量均呈现整体上升趋势。在低灌水条件下,增加施氮量可稳定提高各部位钾素含量;在中灌水条件下,钾素含量随施氮量增加呈先下降后上升趋势;在高灌水条件下,钾素含量则随施氮量增加呈持续下降趋势。此外,钾素在植株中的分配同样以叶球

表11 不同处理娃娃菜不同时期不同部位钾素含量比较
Table 11 Comparison of potassium content in different parts of baby cabbage at different stages under different treatments

处理 Treatment	结球初期 Early stage of ball formation			采收期 Harvest period		
	叶球 Head	外叶 Outer leaf	根 Root	叶球 Head	外叶 Outer leaf	根 Root
1	9.11±0.22 h	9.02±0.10 i	4.58±0.03 i	4.96±0.03 f	4.77±0.06 e	4.56±0.03 h
2	9.96±0.14 g	9.18±0.08 h	4.71±0.06 h	5.06±0.05 f	4.86±0.04cd	4.78±0.05 g
3	11.01±0.08 e	10.25±0.12 f	5.02±0.05 f	5.46±0.04 d	5.28±0.10 c	5.05±0.08 e
4	11.79±0.11 c	11.03±0.11 c	5.66±0.06 c	5.74±0.06 b	5.52±0.05 b	5.42±0.04 b
5	10.58±0.06 f	10.08±0.07 g	4.88±0.08 g	5.22±0.02 e	5.19±0.07 b	5.00±0.09 f
6	12.44±0.13 a	11.66±0.10 a	6.01±0.04 a	5.97±0.08 a	5.82±0.08 a	5.58±0.01 a
7	12.26±0.10 b	11.28±0.08 b	5.78±0.09 b	5.80±0.05 b	5.70±0.12 a	5.46±0.06 b
8	11.62±0.09 c	10.77±0.17 d	5.42±0.04 d	5.65±0.06 c	5.47±0.09 b	5.36±0.09 c
9	11.38±0.14 d	10.38±0.08 e	5.30±0.06 e	5.58±0.03 c	5.36±0.06 c	5.30±0.03 d

中的含量最高。

2.4 水氮调控对农田土壤环境的影响

由表 12 可知,不同水氮处理对土壤基本理化性质有显著影响。随着施氮量增加,土壤有机质、

全氮、有效磷、速效钾含量在相同灌水量水平处理下均呈逐渐升高趋势,随着灌水量增加,土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量在相同施氮量水平处理下均呈逐渐降低趋势,水氮耦合下,其中处理 3

表 12 不同处理对土壤基本理化性质的影响

Table 12 Effects of different treatments on the basic physical and chemical properties of soil

处理 Treatment	pH	w(全氮) Total nitrogen content/ (g·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)
1	8.29±0.02 a	0.91±0.01de	231.89±3.13 c	21.92±2.23 bc	12.88±1.44 c
2	8.28±0.01 a	0.95±0.02 b	232.01±4.09 b	21.93±1.02 b	13.74±1.29 b
3	8.27±0.01 b	0.97±0.01 a	232.13±2.65 a	21.95±2.25 a	13.82±1.33 a
4	8.22±0.02 d	0.90±0.01 e	230.88±5.06 h	21.91±1.02 cd	12.65±1.29 f
5	8.24±0.02 c	0.93±0.01 c	231.73±3.14 e	21.92±2.23 bc	12.68±1.30 e
6	8.23±0.01 d	0.95±0.01 b	231.84±7.07 d	21.93±4.01 b	12.79±0.88 d
7	8.19±0.02 e	0.89±0.02 e	230.68±4.65 i	21.89±2.42 d	12.39±0.94 h
8	8.22±0.01 d	0.92±0.01 d	231.03±3.23 g	21.91±1.23 bcd	12.52±0.56 g
9	8.25±0.02 c	0.94±0.02 b	231.47±3.11 f	21.92±3.42 bc	12.63±0.59 f

对全氮和有机质的提升效果最突出。

由表 13 可知,不同水氮处理对土壤酶活性有显著影响。土壤酶活性变化与土壤基本理化性质变化趋势保持一致。随着施氮量的增加,土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性在相同灌水量水平处理下均呈逐渐升高趋势,随着灌水量的增加,土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性在相同施氮量水平处理下均逐渐降低,水氮耦合下,处理 3 酶活性最强,处理 7 酶活性最弱,酶活性变化趋势与全氮、有机质含量高度同步,印证了土壤养分提升可驱动微生物代谢增强。这表明水氮耦合通过“增肥促酶、增水抑酶”双路径调控土壤酶活性,过量灌水可能稀

释底物浓度或降低氧气扩散速率,抑制酶反应。

2.5 水氮施用量与娃娃菜各项指标的相关性分析

通过不同水氮耦合处理对娃娃菜各项指标的相关性分析表明(图 1),各指标间存在不同程度的相关性。灌水量与生育期、株高、开展度、叶球纵径、叶球横径、维生素 C 含量、净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性、叶绿素含量、产量、水分利用效率呈正相关,与施氮量、还原糖含量、丙二醛含量、pH、全氮含量、全钾含量、全磷含量、有机质含量、土壤蔗糖酶活性、土壤脲酶活性、土壤过氧化氢酶活性呈负相关。施氮量与生育期、株高、叶球纵径、叶球横径、维生素 C 含量、蒸腾速率、气孔导度、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性、叶绿素含量、产量、pH、全氮含量、速效钾含量、有效磷含量、有机质含量、土壤蔗糖酶活性、土壤脲酶活性、土壤过氧化氢酶活性呈正相关,与开展度、叶球横径、还原糖含量、胞间 CO₂ 浓度、水分利用效率呈负相关。综合来看,各项指标响应水氮的敏感性存在差异,说明农艺性状、光合指标、生化指标、养分指标、土壤理化性质、产量指标对水氮响应的重要程度不同,还需要进一步采用多元分析方法进行综合评价。

2.6 基于生产函数的水氮耦合效应研究

水氮耦合生产函数(water-nitrogen coupling production function)是一种描述水分(W)和氮肥(N)

表 13 不同处理土壤酶活性的比较

Table 13 Comparison of soil enzyme activity under different treatments (mg·g⁻¹·h⁻¹)

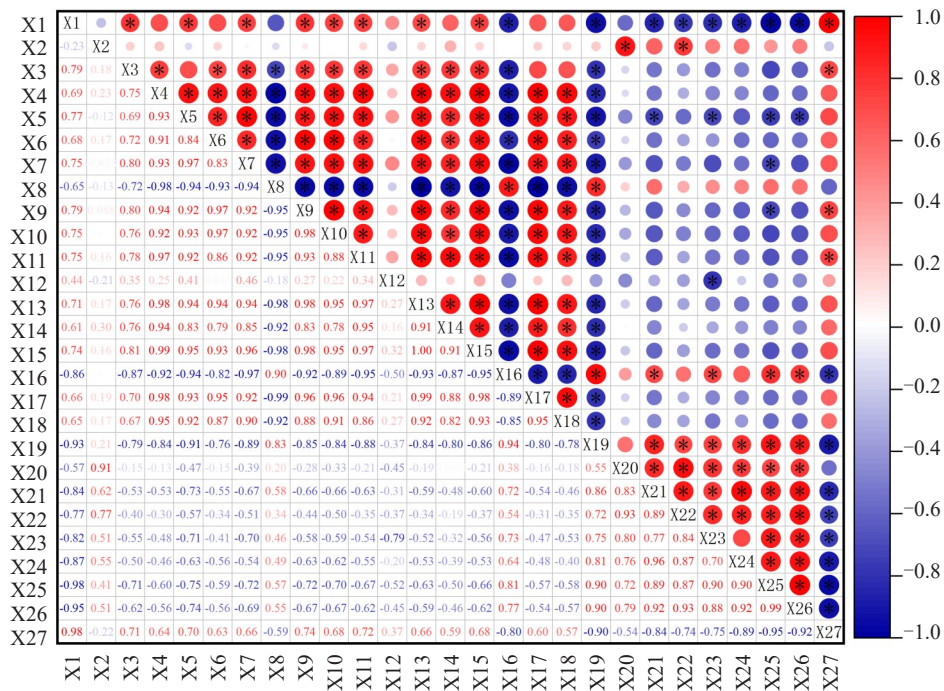
处理 Treatment	土壤蔗糖酶活性 Soil sucrose activity	土壤脲酶活性 Soil urease activity	土壤过氧化氢酶活性 Soil catalase activity
1	24.87±0.13 a	0.482±0.011 c	3.13±0.04 c
2	24.91±0.08 a	0.501±0.014 b	3.26±0.03 b
3	25.03±0.11 a	0.512±0.008 a	3.35±0.05 a
4	24.29±0.08 a	0.435±0.012 f	2.86±0.04 f
5	24.84±0.10 a	0.442±0.008 e	2.93±0.03 e
6	24.92±0.09 a	0.452±0.011 d	3.02±0.02 d
7	23.81±0.07 bc	0.386±0.010 i	2.47±0.06 i
8	23.96±0.08 c	0.393±0.009 h	2.68±0.05 h
9	24.11±0.09 bc	0.411±0.014 g	2.73±0.04 g

投入如何共同影响作物产量(Y)的数学模型。常用的函数形式是二次响应面模型(quadratic response surface model),包括线性项、平方项和交互项(耦合项),以捕捉水和氮的单独效应及其交互作用(耦合效应)。为减少多重共线性并提高模型稳定性,对变量数据进行中心化处理,使用最小二乘法进行多元线性回归,再将中心化变量转换回原始变量最终得出完整的水氮耦合生产函数: $Y=-0.005\ 333W^2+0.008WN-0.082N^2+54.21W+122.45N-54\ 979.8$ 。其中,耦合系数 $\beta_5=0.008$ 为正值,表明水和氮肥存在耦合效应:水分在 $4050\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时平均产量最高,氮肥在 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时平均产量最高,在 $W=4050\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $N=450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量达到最高值 $97\ 016.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。如表14所示,各处理的模型预测产量和实际产量趋势一致。决定系数 $R^2=0.835$,均方根误差(RMSE)= $2\ 678.42\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综合来看,在实际生产中,建议将水分灌溉量控制在约 $4050\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥施用量控

制在约 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,以最大化产量,预计产量可达 $97\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,过度灌溉或施肥可能导致产量下降,因此需精细管理。

2.7 基于隶属函数的水氮耦合模糊评价

娃娃菜的农艺性状、光合指标、生化指标、产量指标以及土壤的基本理化性质由多个指标组成,且各指标具有不同的差异性和相关性,直接进行综合评价会产生信息重复,影响评价结果。因此,利用主成分分析法将具有相关性的指标组合成一组新的互无关联的综合指标,再进行综合评价,可提高评价的可靠性^[18]。本研究采用主成分分析法对娃娃菜的农艺、光合、生化、产量及土壤理化等27项指标进行降维与综合评价,以消除信息重复,共提取5个主成分,累计贡献率93.04%,其中第1主成分主要反映品质与生理活性,第2主成分关联产量与土壤氮素及pH,第3主成分与生育进程及抗氧化胁迫能力相关,第4、第5主成分分别主要代表土壤酶



注: X1. 灌水量, X2. 施氮量, X3. 生育期, X4. 株高, X5. 开展度, X6. 叶球纵径, X7. 叶球横径, X8. 还原糖含量, X9. 维生素 C 含量, X10. 光合速率, X11. 蒸腾速率, X12. 胞间 CO₂ 浓度, X13. 气孔导度, X14. 过氧化物酶活性, X15. 超氧化物歧化酶活性, X16. 丙二醛含量, X17. 叶绿素含量, X18. 产量, X19. pH, X20. 全氮含量, X21. 速效钾含量, X22. 有效磷含量, X23. 有机质含量, X24. 土壤蔗糖酶活性, X25. 土壤脲酶活性, X26. 土壤过氧化氢酶活性, X27. 水分利用效率。

Note: X1. Irrigation amount, X2. Nitrogen fertilizer rate, X3. Growth period, X4. Plant height, X5. Spread, X6. Bulb vertical diameter, X7. Bulb transverse diameter, X8. Reducing sugar content, X9. Vitamin C content, X10. Photosynthetic rate, X11. Transpiration rate, X12. Intercellular CO₂ concentration, X13. Stomatal conductance, X14. Peroxidase activity, X15. Superoxide dismutase, X16. Malondialdehyde content, X17. Chlorophyll content, X18. Yield, X19. pH, X20. Nitrogen content, X21. Available potassium content, X22. Available phosphorus content, X23. Organic matter content, X24. Soil sucrase activity, X25. Soil urease activity, X26. Soil catalase activity, X27. Water use efficiency.

图1 水氮施用量与各指标的相关性热图

Fig. 1 Heat map of the correlation between water and nitrogen application rates and various indicators

表 14 各样本的预测值与实际值对比

Table 14 Comparison of predicted values and actual values for each sample

样本 Sample	灌水量 Irrigation volume/ (m ³ ·hm ⁻²)	施氮量 Nitrogen application rate/(kg·hm ⁻²)	实际产量 Actual yield/ (kg·hm ⁻²)	预测产量 Predicted yield/ (kg·hm ⁻²)	残差 Residual/ (kg·hm ⁻²)
1	3600	375.0	83 394.75	83 648.32	-253.57
2	3600	412.5	83 963.85	86 145.23	-2 181.38
3	3600	450.0	90 593.70	88 329.69	2 264.01
4	4050	375.0	93 131.55	92 524.18	607.37
5	4050	412.5	90 408.90	94 585.61	-4 176.71
6	4050	450.0	97 016.70	96 334.59	682.11
7	4500	375.0	94 022.10	93 985.59	36.51
8	4500	412.5	92 829.90	95 611.54	-2 781.64
9	4500	450.0	92 364.90	96 925.04	-4 560.14

表 15 主成分的特征值、贡献率及累计贡献率

Table 15 Eigenvalues, contribution rates, and cumulative contribution rates of principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
PC1	12.85	47.60	47.60
PC2	5.32	19.70	67.30
PC3	3.18	11.78	79.08
PC4	2.01	7.44	86.52
PC5	1.76	6.52	93.04

活性及水肥利用效率(表 15)。根据各处理主成分得分与综合评价值(D)排序(表 16),水氮耦合效应最高的为处理 6,其次为处理 7 和处理 4,效应最低的为处理 1,表明灌水量 4050 m³·hm⁻²、施氮量 450 kg·hm⁻²的水氮组合更有利于促进娃娃菜综合

表 16 不同水氮处理的综合指标得分及综合评价值

Table 16 Comprehensive index score and comprehensive evaluation value for different water and nitrogen treatments

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score					F	隶属函数值 Subordinate function value					D	排名 Rank
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅		μ(X1)	μ(X2)	μ(X3)	μ(X4)	μ(X5)		
1	-1.320	0.450	-0.870	0.120	-0.230	-0.695	0.000	0.648	0.105	0.539	0.303	0.186	9
2	-1.050	0.620	-0.420	0.340	0.180	-0.379	0.074	0.722	0.295	0.671	0.586	0.256	7
3	0.180	0.710	1.250	-0.450	0.310	0.360	0.413	0.763	1.000	0.198	0.676	0.526	5
4	1.920	-0.850	-0.030	0.670	-0.560	0.647	0.893	0.075	0.460	0.868	0.076	0.565	3
5	-0.060	-0.910	-1.120	-0.230	0.440	-0.387	0.347	0.049	0.000	0.329	0.766	0.241	8
6	2.310	-1.020	0.980	0.890	-0.670	0.776	1.000	0.000	0.886	1.000	0.000	0.612	1
7	1.780	1.250	-0.450	-0.120	0.780	0.753	0.854	1.000	0.283	0.395	1.000	0.610	2
8	0.670	1.080	0.330	0.560	-0.330	0.496	0.549	0.925	0.612	0.802	0.234	0.551	4
9	-0.430	-0.330	0.330	-0.780	0.120	-0.264	0.245	0.304	0.612	0.000	0.545	0.263	6

生产性能的提升。

3 讨论与结论

灌水量和氮素水平是影响作物生长的两个关键因子,合理的水肥搭配可显著提高植物的产量和品质^[19]。笔者筛选出的灌水组合能够最大化提升光合效能、抗氧化能力,促进农艺性状指标变优,提高水分利用效率。这些研究结果与在大麻、辣椒、冬小麦中的研究结果具有一致性^[20-22]。马凯等^[23]的研究进一步揭示,适宜的水氮供应可显著增强 SOD、POD 等抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,从而减轻膜脂过氧化损伤,维持细胞膜结构的完整性。此外。薛丽华等^[24]指出,水氮协同可通过优化气孔行为与光合碳同化路径,同步实现作物高产与水分高效利用,这些都与本试验结果一致。张国英^[25]对水稻的研究揭示,过量施氮会抑制氮代谢关键酶活性,阻碍氮素的同化过程,并引发碳氮代谢失衡。

于肖等^[26]进一步研究发现,水氮失调会破坏植株体内的内源激素平衡,特别是降低细胞分裂素含量,进而抑制细胞的正常分裂与扩张。

土壤养分是作物生长发育的物质基础,其有效性受水氮管理的显著调控。马彦霞等^[6]、李双双^[27]和詹昌峰^[28]均证实水氮耦合可提升土壤有机质及养分含量,需要注意的是王子健等^[29]和尹航等^[30]研究指出,适宜的水氮配比可通过促进微生物增殖、增强土壤酶活性、改善团粒结构等途径,加速有机质分解与养分转化,这与本研究结果一致。

本研究表明,筛选出的灌水量 4050 m³·hm⁻²、施氮量 450 kg·hm⁻²组合 R²=0.825,主成分得分 0.776,隶属函数得分 0.612,能够显著提升娃娃菜的光合作用与抗氧化能力,降低丙二醛含量,促进农艺性状改良,增加各器官的养分积累,同时改善土壤的理化性质和酶活性,最终驱动产量提升,是最佳水氮组合,在张掖绿洲娃娃菜种植中具有一定的

推广价值。

参考文献

- [1] 华军,王勤礼,王鼎国,等.张掖市娃娃菜品种比较试验[J].中国瓜菜,2016,29(8):38-41.
- [2] 李文德,张文斌,张荣,等.张掖市高原夏菜产业现状与发展建议[J].甘肃农业科技,2014,(7):47-49.
- [3] 陶莲,杨永英,赵大芹,等.娃娃菜引种试验初报[J].耕作与栽培,2008(5):56-57.
- [4] 李慧,王旭敏,刘朋召,等.耦合效应弥补水氮减量对夏玉米养分吸收和利用的不利影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(7):1283-1296.
- [5] 代顺冬,韦树谷,赖佳,等.水、氮、磷、钾耦合效应对大白菜产量的影响[J].四川农业大学学报,2020,38(3):299-304.
- [6] 马彦霞,张玉鑫,王晓巍.河西绿洲区大棚甘蓝产量、品质和养分吸收对不同水肥组合的响应[J].水土保持学报,2018,32(5):270-276.
- [7] 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21):70-80.
- [8] GU L M, LIU T N, ZHAO J, et al. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2): 374-388.
- [9] 周亚婷,张国斌,王丽君,等.不同水肥供应对结球甘蓝干物质积累、养分吸收及产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2015,50(3):73-79.
- [10] 秦启杰,吕剑,冯致,等.高原夏季露地紫甘蓝产量、品质及养分吸收对不同水肥组合的响应[J].甘肃农业大学学报,2020,55(5):56-65.
- [11] 杨彬,陈修斌,钟玉凤,等.水氮互作对黑河中游娃娃菜光合特性与水氮利用的影响[J].土壤通报,2017,48(1):162-168.
- [12] 焦兆祥,张芮,张小艳,等.膜下滴灌水肥耦合对高原夏菜娃娃菜产量及水肥利用效率影响[J].水利规划与设计,2023(5):121-126.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [15] 刘祖汀,王丽萍,屈忠义,等.引黄春灌对盐碱土区地下水动态及理化性质的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(2):101-108.
- [16] 王燕红,王丽萍,任恩良,等.不同土壤改良剂对土壤理化性质及酶活性的影响[J].北方园艺,2025(11):148-156.
- [17] 肖继兵,刘志,辛宗绪,等.基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J].干旱地区农业研究,2022,40(6):34-44.
- [18] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等.基于温室番茄产量和果实品质对加气灌溉处理的综合评价[J].中国农业科学,2020,53(11):2241-2252.
- [19] GUO X L, LI S S, WANG D L, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the physiological characteristics and growth of rabbiteye blueberry[J]. PLoS One, 2021, 16(7): e0254013.
- [20] 邓欣,陈信波,龙松华,等.水肥耦合对不同生育时期大麻株高及生物量的影响[J].华北农学报,2015,30(增刊1):395-399.
- [21] 柴文臣,阎世江.水肥耦合效应对辣椒幼苗生长发育及生理指标的影响[J].北方园艺,2025(13):28-34.
- [22] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):301-308.
- [23] 马凯,王振华,王天宇,等.水氮耦合对微咸水膜下滴灌棉花光合特性及产量的影响[J].西北农业学报,2022,31(5):559-568.
- [24] 薛丽华,赵连佳,孙诗仁.水氮耦合对滴灌冬小麦光合特性、产量及水氮利用效率的影响[J].中国农学通报,2018,34(30):12-19.
- [25] 张国英.不同氮素水平处理对水稻碳氮代谢关键酶GS和GDH活性及表达的影响[D].福州:福建农林大学,2012.
- [26] 于肖,牛佳红,陈二影,等.水氮处理对谷子内源激素脱落酸和光合作用特性的影响[J].中国土壤与肥料,2024(4):190-198.
- [27] 李双双.水肥耦合对蓝莓生长发育及果实的影响效应[D].贵阳:贵州大学,2017.
- [28] 詹昌峰.水肥耦合对沙葱产量、品质及土壤理化性质的影响[D].吉林延边:延边大学,2022.
- [29] 王子健,王鹤鹏,王江丽,等.水氮互作对焉耆盆地滴灌春小麦根系形态及土壤酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2025,43(2):116-127.
- [30] 尹航,王丹,申丽霞,等.汾河灌区玉米膜下滴灌水氮互作对土壤水氮分布及利用效率的影响[J].节水灌溉,2025(4):81-87.