

# 宁南山区设施芹菜水氮耦合效应研究

张建国<sup>1</sup>, 张晓娟<sup>2</sup>, 关耀兵<sup>2</sup>, 张倩男<sup>2</sup>

(1. 固原市原州区水务局 宁夏固原 756000; 2. 宁夏农林科学院固原分院 宁夏固原 756000)

**摘要:** 针对宁南山区水资源短缺、设施芹菜生产中水肥管理粗放、水肥利用效率低等问题, 采用二因素二次通用旋转组合设计, 通过田间试验和室内分析研究了设施芹菜生长发育、产量和品质对灌水量和施氮量的水肥耦合效应, 为宁南山区设施芹菜高产、优质、高效、安全生产提供科学依据。结果表明, 水氮耦合能显著促进芹菜的生长发育, 增加植株的株高和茎粗, 随着芹菜生育期的延长, 株高和茎粗呈明显增加趋势, 且不同试验组合间存在显著差异, SPAD 值生育期内整体呈现缓慢上升的趋势, 且组合间存在显著差异; 水氮耦合对提高芹菜产量和改善品质有显著正效应, 水氮组合 1 产量最高, 为 94.82 t·hm<sup>2</sup>, 比产量最低的组合 5 增产 9.26%, 且水氮组合 1 的品质最好。过量的施用氮肥和灌水, 反而会抑制芹菜品质的提升。在本试验条件下, 经主效应分析得出水是影响芹菜产量的主要因素, 由水肥耦合效应方程可得出最佳水和氮肥组合为灌水量 1395 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>+氮肥施肥量 337.5 kg·hm<sup>-2</sup>, 此组合可推广成为该地区设施芹菜的水肥管理制度。

**关键词:** 宁南山区; 设施芹菜; 水氮耦合; 综合效应

中图分类号: S636.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)12-141-08

## Study on coupling effect of water and nitrogen of celery plant in mountainous area of southern Ningxia

ZHANG Jianguo<sup>1</sup>, ZHANG Xiaojuan<sup>2</sup>, GUAN Yaobing<sup>2</sup>, ZHANG Qiannan<sup>2</sup>

(1. Water Bureau of Yuanzhou District, Guyuan 756000, Ningxia, China; 2. Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan 756000, Ningxia, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of shortage of water resources, extensive management of water and fertilizer and low utilization efficiency of water and fertilizer in the production of celery. The design of two-factor quadratic universal rotation combination was adopted. Through field experiment and laboratory analysis, the effects of irrigation amount and nitrogen application amount on the growth, yield and quality of celery and the coupling effect of water and fertilizer were studied. The objective was to provide scientific basis for the high yield, high quality, high efficiency and safe production of celery in the mountainous area of southern Ningxia. The results showed that the coupling of water and nitrogen significantly promoted the growth and development of celery, and increased plant height and stem diameter. With the extension of the growth period of celery, plant height and stem diameter showed obvious increasing trend, and the difference among different experimental combinations was significant. SPAD value showed a slow rising trend during the growth period, and the difference was not significant during the growth period, but the difference between the combinations was significant. The coupling of water and nitrogen had significant positive effects on increasing the yield and improving the quality of celery. The coupling of water and nitrogen had significant positive effect on increasing the yield and improving the quality of celery. The highest yield of water-nitrogen combination 1 was 94.82 t·hm<sup>2</sup>, which was 9.26% higher than that of combination 5 with the lowest yield. Water and nitrogen combination 1 has the best quality. Excessive application of nitrogen fertilizer and irrigation could inhibit the improvement of celery quality. Under the conditions of this experiment, the main effect analysis shows that water is the main factor affecting celery yield and plays the main effect role in the formation of celery yield. According to the coupling effect equation of water and fertilizer, the optimal combination of water and nitrogen fertilizer of celery in facilities could be obtained as follows: irrigation amount of 1395 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>+ nitrogen fertilizer amount of 337.5 kg·hm<sup>-2</sup>, this combination can be extended to celery water and fertilizer management system for facilities in this area.

**Key words:** Mountainous area of south Ningxia; Facilities celery; Water and fertilizer coupling; Combined effect

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-10-21

基金项目: 固原市科技研发类计划项目(2021GYFYF035)

作者简介: 张建国, 男, 高级水利工程师, 主要从事农业水利工程与灌溉工作。E-mail: 894061615@qq.com

通信作者: 张倩男, 女, 助理研究员, 主要从事蔬菜育种与栽培工作。E-mail: 2306107420@qq.com

蔬菜作为我国园艺第一大类农作物,是关系国计民生的重要农产品,是人们日常生活的必需品,占食物消费总量的41%<sup>[1]</sup>。冷凉蔬菜是宁夏“六特”产业之一,宁夏南部山区是典型的高寒山区,气候冷凉,夏秋多雨,昼夜温差大,拥有种植冷凉蔬菜的气候资源优势,成为冷凉蔬菜产业的主战场,该区域冷凉蔬菜品牌在国内外具有一定的品牌优势和产业优势,远销马来西亚、韩国及中国的港、澳、台等多个国家或地区,被中国特产协会授予“中国冷凉蔬菜之乡”<sup>[2-3]</sup>。蔬菜生产已成为该区域农业增效和农民增收的有效途径。

然而,蔬菜是喜肥喜水作物,肥水是设施蔬菜生产中生产资料成本的主要构成因素,影响蔬菜的产量与品质,直接决定设施蔬菜的产出效益<sup>[4]</sup>。在设施蔬菜高投入高产出的刺激下,农民实行“粪大水勤,不用问人”、“肥随水走,一水一肥”的水肥管理模式,施肥量远远高出作物的需肥量,普遍存在过量施肥灌水现象,但是高水肥的投入不仅没有起到增产作用,反而造成水肥资源的浪费、土壤次生盐渍化、养分失衡和蔬菜品质下降等一系列问题<sup>[5-6]</sup>。水分与肥料对作物生长的影响不是孤立的,而是相互作用的,肥料与水分之间存在着耦合效应<sup>[7-8]</sup>。因此,如何同步实现蔬菜高产优质和水肥高效利用、有效缓解蔬菜生产对环境及产品污染将成为今后我国蔬菜产业发展过程中急待解决的主要问题之一<sup>[9]</sup>。

目前,关于设施栽培水肥耦合方面的研究,主

要集中在水肥对蔬菜生长发育<sup>[10-11]</sup>、产量<sup>[12-13]</sup>、品质<sup>[14-15]</sup>及水分利用效率<sup>[16-17]</sup>等方面。由于蔬菜种类的复杂性,使得不同蔬菜产量和品质对不同的水肥条件反应不同,其耦合效应也有差异,合理的水肥搭配才能促进相应的蔬菜生长发育<sup>[18]</sup>。芹菜作为宁南山区的骨干冷凉蔬菜,生产中存在过量施肥和灌水的现象,水肥利用率低,尚未形成科学合理的水肥管理制度,灌水和施肥随意性较大。因此,开展设施芹菜对不同氮肥施肥量和灌水量的研究,探索宁南山区设施芹菜最佳氮肥施用量和灌水量,建立设施芹菜水肥协同调控的水肥管理体系,以期为保障宁南山区设施蔬菜产业可持续发展提供科学依据,从而实现设施芹菜节水节肥的高产高效和优质安全生产。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于宁夏固原市头营镇徐河村,该区域地势平坦开阔,气候冷凉,年平均气温6.5℃,昼夜温差大。年平均降水量425 mm,且集中分布于6—9月。温室坐北朝南,东西长80 m,跨度8 m,后墙高2.3 m,屋脊高3.5 m,墙体为土质;采光屋面采用日本进口无滴膜,夜间覆盖保温被。供试土壤为典型的黄绵土,土壤基本理化性质见表1,土壤有机质肥力为中等偏低的四级水平(10~20 g kg<sup>-1</sup>);速效性碱解氮为极低的六级水平(<30 mg kg<sup>-1</sup>);速效磷为三级水平(>15 mg kg<sup>-1</sup>);速效钾则为较丰富的二级水平(150~200 mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[19]</sup>,土壤肥力偏低。

表1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

深度 Soil depth/ cm	pH	w(全盐) Full salt content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(碱解氮) Available nitrogen content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(速效磷) Available phosphorus content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	容重 Soil bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(全磷) Total phosphorus content/(g·kg <sup>-1</sup> )
0~20	8.31	0.58	10.71	14.68	15.42	158.40	1.26	0.26	1.25
20~40	8.29	0.49	10.02	13.12	15.38	162.33	1.31	0.27	1.24

### 1.2 材料

供试芹菜品种为文图拉西芹,是美国培育的优良芹菜品种,由宁夏金穗农林有限公司提供,是当地主栽品种。于2023年5月28日定植,2023年10月1日收获,全生育期120 d左右,采用覆膜平垄双行栽培技术,垄宽0.6 m,株距20 cm,行距30 cm,每垄2行,小区面积10 m<sup>2</sup>,3次重复。使用肥料均为水溶肥,氮肥为尿素(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>),N含量(w,后同)46%;磷肥为重过磷酸钙(Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O),P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量46%;钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),K<sub>2</sub>O

含量50%,施有机肥15 t·hm<sup>-2</sup>作基肥,起垄前一次性基施,芹菜全生育期灌水7次,滴灌施肥4次,其他同一般温室日常管理。

### 1.3 设计

采用二因素二次通用旋转组合设计,小区随机排列,3次重复。参考袁志发等<sup>[20]</sup>的方法设计灌水量和施肥量,试验因素水平与编码如表2所示。二次通用旋转组合设计方案如表3所示。芹菜灌水量上限为1500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,下限为750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>;氮肥供应上限为450 kg·hm<sup>-2</sup>,下限为225 kg·hm<sup>-2</sup>。

表2 二因素二次通用旋转组合设计  
试验因子水平编码表

Table 2 Horizontal coding table of test factors for  
two-factor quadratic general rotary combination design

编码 Code	灌水量 Irrigation application amount/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>2</sup> )	氮肥施用量 Nitrogen application amount/(kg·hm <sup>2</sup> )
1.414 2	100	30.0
1	93	27.8
0	75	22.5
-1	57	17.2
-1.414 2	50	15.0
<i>A<sub>j</sub></i>	75	22.5

表3 灌水量和施氮量试验设计组合

Table 3 Experimental design combinations of irrigation  
and nitrogen application amount

编号 No.	$X_1$ (H <sub>2</sub> O)	$X_2$ (F)
1	1	1
2	1	-1
3	-1	1
4	-1	-1
5	-1.414 2	0
6	1.414 2	0
7	0	-1.414 2
8	0	1.414 2
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

## 1.4 测定指标及方法

1.4.1 样品采集方法 在定植前采集试验区基础土样,每个处理取两个点,采0~20、20~40 cm深度的土壤样品,装入塑料袋、标记密封,带回实验室自然风干,处理后测定其物理指标、化学指标。在芹菜整个生育期内不同生育时期测量植株株高、茎粗和叶片 SPAD 值等生长指标。

1.4.2 土壤理化性质测定 采用 SH-3 精密酸度计测定 pH;采用 DDS-11 电导率仪测定土壤全盐含量,采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量,采用碱解扩散法测定碱解氮含量;采用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提,钼锑抗比色法测定速效磷含量;采用 1 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度法测定速效钾含量<sup>[21-22]</sup>;采用环刀法测定容重和田间持水量<sup>[23]</sup>。

1.4.3 生长指标测定 于芹菜不同生育时期,每次

重复选取 10 株长势均一的植株,测定其株高、茎粗和叶片 SPAD 值。其中,采用卷尺测量株高,采用数显游标卡尺测量茎粗,采用手持 502 型 SPAD 计测量叶绿素含量(SPAD 值)。

1.4.4 产量和品质测定 采收时分别记载各小区产量、单株产量,并计算出不同组合的产量;采收时采取新鲜芹菜植株样品测定品质指标,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,采用硫酸水杨酸比色法测定硝酸盐含量,采用 2,4-二硝基苯肼比色法测定维生素 C 含量<sup>[21]</sup>。

## 1.5 统计分析

采用 Excel 2022 软件和 SPSS 27.0 软件进行数据处理与统计分析,采用 Origin 2024 b 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥组合对设施芹菜生长发育的影响

不同水肥组合对设施芹菜生长发育的影响见表 4。水氮协同能显著促进芹菜的生长发育,增加植株的株高和茎粗,随着芹菜生育期的延长,株高和茎粗呈明显的增加趋势,且不同试验组合间存在显著差异,SPAD 值生育期内整体呈现缓慢上升的趋势,组合间存在显著差异,水氮组合高于无水无氮组合(组合 5),且在整个生长发育期间,水氮组合 1 的株高(幼苗期除外)、茎粗和 SPAD 值均最高。芹菜生长前期即幼苗期,芹菜株高在 19.50~20.67 cm,茎粗在 8.84~10.07 mm,SPAD 值在 34.80~45.70;在立心期,芹菜株高在 30.80~44.10 cm,茎粗在 22.02~37.71 mm,SPAD 值在 36.90~42.53;在心叶生长期,即芹菜生长中后期,水氮组合的株高和茎粗增加幅度大,叶绿素含量也明显增加,芹菜株高在 47.10~61.88 cm,茎粗在 49.32~66.39 mm,SPAD 值在 36.90~51.78。

### 2.2 不同水肥组合对设施芹菜产量的影响

不同水肥组合对设施芹菜产量的影响见图 1。不同水氮组合对设施芹菜的产量存在显著差异。13 个试验组合产量排序为:1>9>10>12>13>8>6>11>2>3>4>7>5,产量最高的 3 个组合分别为组合 1、组合 9 和组合 10,产量依次为 94.82 t·hm<sup>-2</sup>、94.19 t·hm<sup>-2</sup>和 94.02 t·hm<sup>-2</sup>,分别比产量最低的组合 5 显著增产 9.26%、8.54%和 8.34%。试验组合 1 对应的灌水量为 1395 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,氮肥施用量为 417.0 kg·hm<sup>-2</sup>。

### 2.3 产量目标函数数学模型的建立与检验

以芹菜产量为目标函数( $y$ ),以灌水量( $x_1$ )和氮

表4 不同水肥组合对设施芹菜生长发育的影响

Table 4 Effects of different water and fertilizer combinations on the growth and development of facility celery

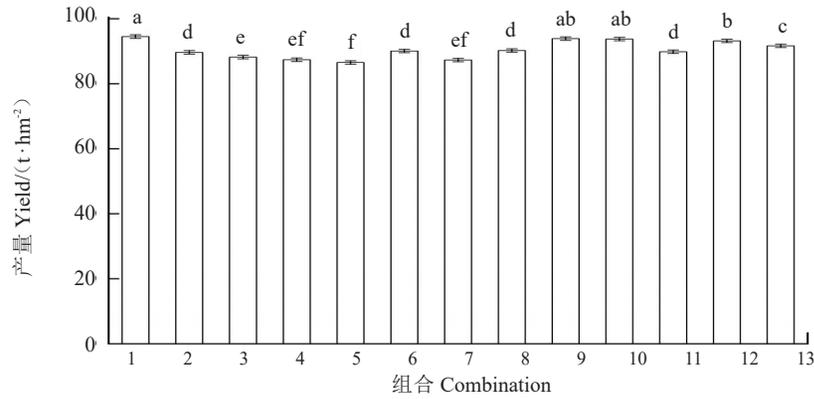
生育时期 Fertile period	试验组合 Test combination	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	SPAD 值 SPAD value
幼苗期 Seedling period	1	20.63±1.00 a	10.07±0.53 a	45.70±0.69 a
	2	20.10±0.30 ab	9.23±0.23 bc	41.83±2.26 bc
	3	19.67±0.42 ab	9.75±0.35 ab	41.47±2.28 bc
	4	19.50±0.40 b	8.84±0.18 d	37.67±0.38 cd
	5	19.60±0.62 ab	9.09±0.13 ab	34.80±0.76 d
	6	20.20±0.10 ab	9.63±0.32 b	42.13±2.32 bc
	7	20.20±0.70 ab	9.20±0.17 bc	39.87±0.35 c
	8	20.20±0.26 ab	9.55±0.40 bc	42.43±0.29 bc
	9	20.67±0.32 a	10.01±0.79 a	43.10±1.73 ab
	10	20.50±1.47 ab	9.95±0.49 a	43.53±1.69 ab
	11	19.77±0.86 ab	9.40±1.12 bc	41.73±4.13 bc
	12	20.50±0.10 ab	9.86±0.17 ab	42.93±2.56 b
	13	20.47±0.25 ab	9.88±0.51 ab	42.87±1.38 b
立心期 Heart-setting period	1	44.10±0.39 a	37.71±1.23 a	42.53±4.83 a
	2	38.67±1.99 bc	25.82±0.46 d	39.50±0.26 bc
	3	38.30±0.72 c	30.20±1.87 c	37.47±1.74 bc
	4	35.67±6.17 cd	29.82±1.21 cd	37.17±0.49 c
	5	30.80±2.61 d	22.02±2.18 e	36.90±0.52 c
	6	38.77±3.66 bc	31.80±0.94 bc	40.60±2.69 ab
	7	35.53±0.57 cd	25.89±0.21 d	37.00±0.95 c
	8	38.83±3.33 bc	33.43±0.93 b	41.07±2.72 ab
	9	42.67±1.07 ab	37.54±3.98 ab	42.17±4.43 a
	10	42.50±0.39 ab	36.92±2.18 ab	41.43±1.61 a
	11	38.60±0.36 bc	31.88±0.37 bc	40.07±2.16 abc
	12	42.17±2.31 ab	36.33±1.82 ab	41.40±0.60 a
	13	41.53±0.90 b	35.77±1.13 abc	41.20±1.66 ab
心叶生长期 Heart leaf growth period	1	61.88±0.85 a	66.39±5.54 a	51.78±1.60 a
	2	55.17±2.75 bc	59.27±0.30 bc	45.03±3.75 c
	3	51.83±3.65 c	57.66±10.21 c	43.30±2.16 cd
	4	51.60±2.82 c	55.18±7.47 cd	43.78±1.07 cd
	5	47.10±1.70 d	49.32±2.66 d	36.90±1.18 e
	6	56.25±5.50 bc	59.80±2.96 bc	45.80±2.30 c
	7	50.17±4.03 cd	54.78±4.09 cd	39.57±0.59 d
	8	56.83±1.89 bc	60.15±2.01 bc	46.70±0.40 c
	9	60.88±1.44 ab	62.85±4.43 ab	49.23±3.14 ab
	10	60.13±5.59 ab	62.24±3.29 ab	49.03±1.97 ab
	11	55.50±3.04 c	59.57±4.07 bc	45.43±0.68 c
	12	58.63±3.77 ab	61.69±6.00 b	48.48±1.92 bc
	13	57.15±2.73 b	61.87±4.23 b	48.17±1.96 bc

注: 同列不同小写字母表示同一发育时期的不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments of the same development period at 0.05 level. The same below.

肥( $x_2$ )两因素为控制变量,对数据进行统计模拟,得到两因素对设施芹菜产量的回归模型公式为: $y=92.54+1.71x_1+1.23x_2-1.63x_1^2-1.40x_2^2+1.02x_1x_2$ ,由公式可知,水和氮肥二因素中,水的影响大于肥的作

用,二次项系数均为负数表明各因子对产量的影响一致呈开口向下的抛物线效应,表明在试验处理条件下各因子对产量的贡献均存在最大值,过量灌水施肥会对产量产生负效应,而合理的水肥配合产生



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level.

图 1 不同水肥组合对设施芹菜产量的影响

Fig. 1 Effects of different combinations of water and fertilizer on the yield of facility celery

正效应。

水肥耦合试验对芹菜产量影响的方差分析见表 5,  $p=0.033$   $1 < p < 0.05$ , 表明方程回归关系达到显著水平, 很好地反映了当地实际情况;  $p=0.543$   $3 > p > 0.05$ , 差异未呈显著水平, 表明拟合结果较好, 可

以进行效应分析和模型优化。

### 2.4 模型寻优和频数分析

对肥效模拟方程公式中  $a=0.05$  显著水平下剔除不显著项后, 水肥对芹菜产量的肥效方程简化为:  $y=92.54+1.71x_1-1.63x_1^2-1.40x_2^2$ , 根据试验所得的

表 5 水肥耦合试验对芹菜产量影响的方差分析

Table 5 Variance analysis of the effect of water and fertilizer coupling test on celery yield

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	偏相关 Partial correlation	F 值 F value	p 值 p value
$x_1$	23.427 8	1	23.427 8	0.772 4	10.288 6	0.014 9
$x_2$	12.073 0	1	12.073 0	0.656 5	5.302 0	0.054 8
$x_1^2$	18.557 7	1	18.557 7	-0.735 5	8.149 9	0.024 5
$x_2^2$	13.558 0	1	13.558 0	-0.678 0	5.954 2	0.044 8
$x_1x_2$	4.196 4	1	4.196 4	0.456 5	1.842 9	0.216 8
回归 Regression	68.159 1	5	13.631 8	$F_2=5.986 60$		0.033 1
剩余 Remaining	15.939 4	7	2.277 1			
失拟 Lack of fit	5.865 7	3	1.955 2	$F_1=0.776 36$		0.543 3
误差 Error	10.073 7	4	2.518 4			
总和 Sum total	84.095 8	12				

回归方程, 每个因素取 5 个水平, 分别为: -1.4、-1.0、0、1.0 和 1.4, 用计算机对试验组合进行寻优, 得到设施芹菜达最高产量时, 水和氮肥两因子水平分别为 1 和 0; 在本试验条件下, 设施芹菜最高理论产量可达  $92.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其相应的水肥组合为灌水量  $1395 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  + 氮肥施用量  $337.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从简化肥效方程公式中可以看出, 在本试验条件下, 灌水量是决定设施芹菜产量的最主要影响因素, 这可能是因为芹菜为喜水蔬菜, 生育期较短, 对水分的要求较高。

试验组合变量取值频率分布见表 6, 在所有试验组合中, 芹菜产量高于  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的组合共有 7 个。灌水量从低水平到高水平, 芹菜产量达到  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的量纲出现在 0~1.414 2, 即设施芹菜整个生育期灌水量应控制在  $1125 \sim 1500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 而氮肥水平从低到高, 产量达到  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的量纲出现在 -1~1, 即设施芹菜整个生育期施肥量适宜范围在  $258 \sim 417 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此可见, 水和氮肥的合理组合是实现设施芹菜高产高效的重要手段。

进一步对高产条件下水和氮肥的取值范围进

行模拟,结果见表7。在所有试验组合中,芹菜产量高于  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的灌水量水平为  $0.214 \sim 1.047$ , 施肥量水平为  $-0.560 \sim 0.560$  时,通过二者的协同配合,

表6 产量大于  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的7个试验组合变量取值频率分布

Table 6 Value frequency distribution of 7 combined variables with yields greater than  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$

水平 Level	$x_1$	频率 Frequency	$x_2$	频率 Frequency
-1.414 2	0	0	0	0
-1	0	0	2	0.285 7
0	3	0.428 6	3	0.428 6
1	3	0.428 6	2	0.285 7
1.414 2	1	0.142 9	0	0

设施芹菜有 95% 的可能性产量都高于  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

### 2.5 因子效应分析

将回归模型中的 1 个因子固定为“0”水平时,水和氮肥不同用量对设施芹菜产量影响的单因素效应如图 2 所示。在本试验范围内,不同灌水量与芹菜产量之间呈抛物线关系。灌水量水平由 -1.414

表7 产量大于  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的7个方案中各因子的频率  
Table 7 Frequency of each factor in 7 schemes with yields greater than  $90.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$

因子 Divisor	加权均数 Weighted mean	标准误 Standard error	95% 的分布区间 95% distribution interval
$x_1$	0.631	0.213	0.214~1.047
$x_2$	0	0.286	-0.560~0.560

增加到 0.5 水平时,芹菜产量逐步升高;超过 0.5 水平后产量开始下降。不同施肥水平与芹菜产量之间也呈典型抛物线关系,施肥水平由 -1.414 增加到 0 水平时,芹菜产量逐步升高;超过 0 水平时芹菜产量下降。以上结果表明,适宜的灌水量和施肥量是芹菜高产的保证。

经无线量纲线性编码代换,其偏回归系数已经标准化,故可以直接从其一次项绝对值的大小来判断各因素对目标函数的相对重要性。由肥效拟合模型反映出两因素均与产量存在相关性,对产量影响程度为  $x_1 > x_2$ , 即在本试验条件下,决定设施芹菜产量的水和氮肥因素中主效应作用顺序为先水后肥。

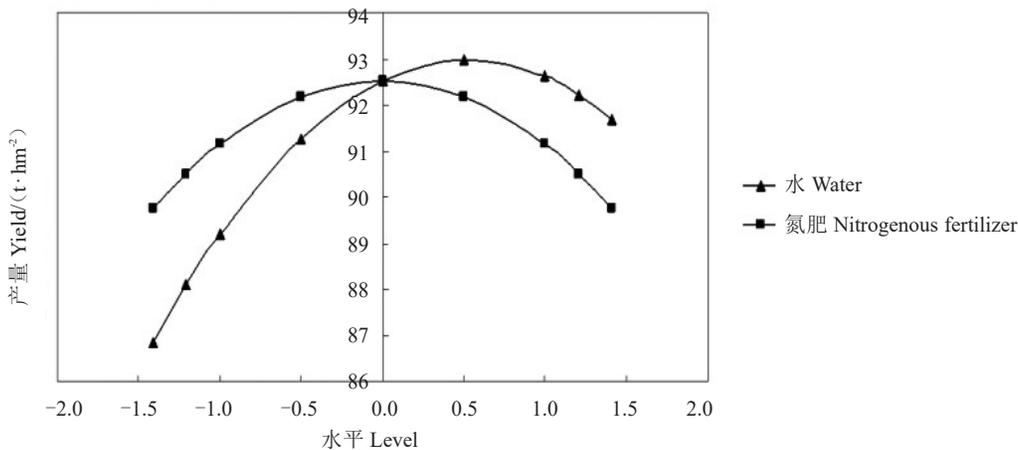


图2 设施芹菜水和氮肥耦合单因素产量分析

Fig. 2 Single factor yield analysis of plant celery coupled with water and nitrogen fertilizer

### 2.6 不同水肥组合对设施芹菜品质的影响

不同水肥组合对设施芹菜品质的影响见表8。不同水氮组合对设施芹菜品质有显著影响,维生素C含量在  $79.76 \sim 120.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,可溶性糖含量在  $0.74\% \sim 1.08\%$ ,硝酸盐含量在  $615.53 \sim 778.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,水氮组合1的品质最好,过量的施用氮肥和灌水,反而会降低芹菜的品质。

## 3 讨论与结论

民间流传“有收没收在于水,收多收少在于肥”

的说法,可见水分和肥料是作物生长发育的两大重要因素<sup>[24]</sup>。蔬菜汁多、细嫩,是需水量较大的作物,本身含水量也高,为  $79\% \sim 97\%$ <sup>[4]</sup>。在蔬菜生产过程中,水在蔬菜的整个生长和生理活动过程中起着更为重要的作用,但是灌水方式、灌水频率和灌水量都会影响蔬菜的生长发育<sup>[25]</sup>。氮素营养在植物整个生命活动过程中起着重要作用,是矿质元素中的核心元素,被喻为“生命元素”,缺氮使植物生长速度缓慢,植株瘦弱,茎干细小,叶片小且黄,但施氮过多时,又会使作物贪青徒长,影响其生殖生长<sup>[26]</sup>。陈

表8 不同水肥组合对设施芹菜品质的影响  
Table 8 Effects of different water and fertilizer combinations on the quality of facility celery

试验组合 Test combination	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(硝酸盐) Nitrate content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
1	111.12±2.21 ab	1.08±0.00 a	778.58±28.63 a
2	120.35±2.21 a	0.89±0.00 c	690.84±6.74 bc
3	93.71±1.32 de	0.85±0.01 cd	639.50±6.53 e
4	97.14±0.88 bc	0.86±0.01 cd	657.51±4.64 e
5	90.28±2.64 e	0.74±0.01 de	619.20±5.26 f
6	104.93±1.32 b	0.82±0.00 c	691.23±2.89 bc
7	96.51±0.88 cd	0.76±0.02 d	615.53±7.30 f
8	90.15±1.87 e	0.92±0.01 bc	670.54±20.89 d
9	88.41±1.25 f	0.89±0.06 c	765.17±6.08 ab
10	79.76±0.00 g	0.94±0.03 b	760.19±10.68 ab
11	98.38±0.62 b	0.86±0.02 cd	640.65±4.03 e
12	102.43±1.56 bc	0.85±0.02 cd	701.19±7.39 b
13	102.23±0.31 bc	0.89±0.04 c	695.44±5.31 bc

碧华等<sup>[27]</sup>研究认为,番茄植株的株高、茎粗、叶宽、叶片数与施肥量和灌水量之间呈正相关,其中施肥量的影响大于灌水量,说明施肥效应大于灌水效应。这与本试验的研究结果并非完全一致,合理的水肥管理有助于促进设施芹菜生长发育,在一定范围内,蔬菜产量与灌溉量和施肥量呈正相关,但是过多或过少的水分和肥料都会对芹菜生长发育产生不利影响。

蔬菜对不同水肥条件的响应因蔬菜种类、品种特性和生长环境而不同。赵义涛等<sup>[28]</sup>研究发现,灌水和施肥对灌溉水利用效率的交互作用是相互拮抗的,增加灌水量会降低灌溉水利用效率,施肥能提高灌溉水利用效率。张俊威<sup>[29]</sup>研究发现,不同水肥耦合对番茄产量有显著的影响,产量对灌溉量和施肥量的响应也随地区和茬次而不同,这与本研究结果一致,本试验中,水为影响芹菜产量的主效应因子。综上所述,不同试验研究的土壤环境、蔬菜种类、水肥梯度及管理方式不同,导致水和肥料对蔬菜产量的贡献作用大小存在差异,甚至出现一些相反的结论。水肥耦合是以水促肥、以肥调水,最大可能地激发水肥之间的协同效应来达到提质增产及提高水肥利用效率的目的<sup>[30]</sup>。

有研究表明,肥料施用量和灌溉控水下限土壤水吸力值显著影响番茄果实品质,而且两者之间的交互作用达到了极显著水平<sup>[31]</sup>。一般而言,水含量少时,植物体内的纤维素就会累积,产品组织开始硬化,苦味产生,从而影响品质;水含量过多时,糖、

盐的相对浓度降低,产品风味变淡,耐贮性、抗病性降低,产量和经济效益降低<sup>[32]</sup>。李邵<sup>[33]</sup>研究表明,水肥耦合效应对黄瓜瓜条商品率与果实的可溶性蛋白、游离氨基酸及可溶性固形物含量均有显著影响。祝洋<sup>[34]</sup>研究表明,水氮耦合对番茄生长、产量和品质的正效应最大,有利于提升产量和改善果实品质,而且水肥利用效率最高。大量研究认为,在水分条件充足的前提下,芹菜中维生素 C 和可溶性糖含量随施氮量的增加呈现升高的趋势,但超过一定的施氮范围,维生素 C 和可溶性糖含量开始降低<sup>[4,15,25]</sup>。在本试验中也验证了这一结论,随施氮量的增加,芹菜维生素 C 和可溶性糖含量先升高后降低。

综上所述,合理的水氮耦合不仅有利于设施芹菜生长发育,增加单位面积产量和改善营养品质,还能缓解水肥资源浪费及其导致的土壤污染等环境问题。在本试验条件下,对水和氮肥两个因素与芹菜产量建立产量目标函数,模拟得到方程: $y=92.54+1.71x_1+1.23x_2-1.63x_1^2-1.40x_2^2+1.02x_1x_2$ 。由方程可得出其相应的水、肥组合为:灌水量 1395 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>+氮肥施用量 337.5 kg·hm<sup>-2</sup>,芹菜理论最高产量可达 92.62 t·hm<sup>-2</sup>。经主效应分析,水是影响芹菜产量的主要因素,在芹菜产量形成中发挥主效应作用,其次为氮肥。因此,适宜的灌水量和氮肥施用量是宁南山区设施芹菜高产优质的保证。

### 参考文献

- [1] 招浩欣,黄越,贺梅英,等.中国蔬菜出口美国现状和竞争力分析[J].中国蔬菜,2023(2):1-6.
- [2] 张晓娟,李玉莲,王晓军,等.固原市冷凉蔬菜产业发展现状分析[J].黑龙江农业科学,2016(5):152-154.
- [3] 李程,杜慧莹,杨冬艳,等.宁夏蔬菜产业发展现状和实现高质量发展的对策及建议[J].宁夏农林科技,2023,64(9):23-29.
- [4] 张海粟.栽培措施与水分胁迫对高原夏菜芹菜地土壤环境及产量品质的影响研究[D].兰州:甘肃农业大学,2023.
- [5] 李天来.设施蔬菜产业发展(一)我国设施蔬菜产业发展现状及展望[J].中国蔬菜,2023(9):1-6.
- [6] 周向阳,张银定.宁夏蔬菜产业现状与高质量发展对策研究[J].北方园艺,2024(15):141-145.
- [7] WOLFE D W, HENDERSON D W, HSAIO T C. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. I. leaf area duration, nitrogen distribution, and yield[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(6): 859-864.
- [8] 沈荣开,王康,张瑜芳,等.水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J].农业工程学报,2010,17(5):35-38.
- [9] JIANG T C, LIU J, GAO Y J, et al. Simulation of plant height of winter wheat under soil water stress using modified growth func-

- tions[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232: 106066.
- [10] 张威贤. 不同灌水方式对温室芹菜生长及产量的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [11] 郭勇. 水分调控对滴灌设施芹菜生长的影响及灌溉制度优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [12] 田伟, 冯海萍. 宁夏六盘山区芹菜栽培对氮肥施用量的响应差异[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(6): 126-134.
- [13] 尹志荣, 桂林国, 何进勤, 等. 不同灌水量对膜下滴灌芹菜生长及产量的影响[J]. *宁夏农林科技*, 2015, 56(4): 1-3.
- [14] 祁焕军, 雷晓婷, 雷金银, 等. 灌水量及灌水 pH 值对宁南山区土壤养分及芹菜产量品质的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(9): 29-34.
- [15] 贾丽丽. 不同氮磷钾浓度对水培芹菜生长及品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- [16] 郭勇, 马娟娟, 郑利剑, 等. 滴灌水分调控对设施芹菜生长与水分利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2022(9): 9-16.
- [17] 杨军, 廉晓娟, 王艳, 等. 滴灌条件下不同灌溉量对芹菜耗水量和水分利用效率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(3): 656-661.
- [18] 许晓瑞. 宁南山区冷凉蔬菜水肥需求规律研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [19] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [20] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 孙权. 农业资源与环境质量分析方法[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2004.
- [24] 聂斌. 宁南山区设施芹菜适宜灌水量和施氮量研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
- [25] 陈晨, 贾丽丽, 陈雪琼, 等. 不同浓度氮、磷、钾对水培芹菜生长及叶绿素含量的影响[J]. *蔬菜*, 2022(10): 31-37.
- [26] 李俊良, 金圣爱, 陈清. 蔬菜灌溉施肥新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [27] 陈碧华, 郜庆炉, 杨和连, 等. 日光温室膜下滴灌水肥耦合技术对番茄生长发育的影响[J]. *广东农业科学*, 2008(8): 63-65.
- [28] 赵义涛, 梁运江, 许广波. 水肥耦合对保护地辣椒水分利用效率的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2007, 29(5): 523-527.
- [29] 张俊威. 基于不同生态区的温室番茄水肥高效利用机制研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [30] 傅鸿妃, 郭赛赛, 郑积荣, 等. 山地长季节设施辣椒需肥规律研究及水肥耦合对养分吸收的影响[J]. *北方园艺*, 2023(11): 60-67.
- [31] 刘有民, 朱建强, 张国森, 等. 酒泉戈壁日光温室口感型番茄水肥一体化高效栽培技术[J]. *北方园艺*, 2024(19): 155-158.
- [32] 陈静茹, 王晓巍, 马彦霞, 等. 河西冷凉灌区膜下滴灌娃娃菜产量和品质对水肥耦合的响应[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 159-166.
- [33] 李邵. 水肥耦合对温室黄瓜产量与品质形成的影响及其生理机制[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2010.
- [34] 祝洋. 水肥耦合对设施番茄生长、产量与品质的影响[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2023.