

# 水肥耦合对娃娃菜产量和品质的影响

马彦霞<sup>1</sup>, 陈静茹<sup>2</sup>, 王晓巍<sup>1</sup>, 蒯佳琳<sup>1</sup>, 张俊峰<sup>1</sup>

(1.甘肃省农业科学院 蔬菜研究所, 兰州 730070; 2.甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070)

**摘要:**【目的】探究河西走廊冷凉灌区膜下滴灌条件下娃娃菜适宜的水肥耦合模式。【方法】以当地秋茬主栽品种金皇后为供试材料, 设置3个灌溉水平和3个施肥水平, 共计9个处理, 测定不同处理下的娃娃菜叶球纵径和横径、产量及品质指标。通过主成分分析筛选关键指标, 基于隶属函数和标准差系数权重法来评价灌水量和施肥量对娃娃菜各项指标的耦合效应。【结果】灌水量、施肥量及水肥交互效应均在不同程度上影响娃娃菜的产量和品质, 水肥交互效应的影响高于灌水量和施肥量。水肥耦合模式下, H2F2处理(中水中肥)可显著提高娃娃菜单株净质量、净菜率、产量、可溶性固形物量和Vc量, 增加叶球紧实度, 降低硝酸盐量。基于主成分分析将生长性状、产量、品质等12个指标转换为3个独立的综合指标, 其累积贡献率高达91.87%。H2F2处理下的基于隶属函数与标准差系数权重法取得的水肥耦合效应综合得分最高。【结论】河西走廊冷凉灌区娃娃菜适宜的水肥耦合模式为灌水下限为田间持水率的70%、施肥量N为330 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为195 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O为450 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 河西冷凉灌区; 娃娃菜; 水肥耦合; 主成分分析; 隶属函数法

中图分类号: S635

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023093

OSID:



马彦霞, 陈静茹, 王晓巍, 等. 水肥耦合对娃娃菜产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 40-45.

MA Yanxia, CHEN Jingru, WANG Xiaowei, et al. The Combined Effect of Water and Fertilizer on Yield and Quality of Mini Chinese Cabbage in Cold-cool Irrigation Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 40-45.

## 0 引言

【研究意义】河西走廊冷凉灌区日照资源丰富、昼夜温差较大, 具有种植娃娃菜得天独厚的自然条件; 加之该区域灌溉依靠祁连山冰川和积雪融水, 生产的娃娃菜品质佳、口感好。近年来, 娃娃菜产业已成为当地实现乡村振兴的一大支柱性产业。然而, 当地菜农仍沿用“高水高肥”的管理模式, 导致水肥资源浪费严重, 生态环境遭到破坏。目前, 河西走廊的膜下滴灌水肥一体化技术可通过精准控制灌水量和施肥量来提高水肥利用效率<sup>[1]</sup>, 但该技术在当地起步较晚, 尚缺乏可供娃娃菜应用的水肥管理制度。因此, 探究冷凉灌区膜下滴灌娃娃菜的合理灌溉施肥制度已成为亟待解决的问题。【研究进展】膜下调亏灌溉是一种节水灌溉技术, 适宜的调亏灌溉模式具有明显的增产、提质效果<sup>[2]</sup>。施肥是影响植物生长发育和产量、品质的重要因素, 只有协调好水肥关系才能提高产量和品质<sup>[3-4]</sup>。杨彬等<sup>[5]</sup>研究表明, 采用优化的灌水定额与施氮量组合可显著提高娃娃菜的经济产量, 水氮耦合表现出较强的互作效应。陈修斌等<sup>[6]</sup>研究表明,

适宜的水氮耦合可显著提高膜下滴灌娃娃菜的横径和纵径长度; 代顺东等<sup>[7]</sup>研究发现, 合理调节水肥用量能显著提高白菜产量, 且灌水量的影响大于施肥量。水肥耦合对甘蓝叶球的农艺性状、产量和品质影响显著, 合理的水肥调控可增大甘蓝叶球纵径、横径及叶球紧实度, 提高产量和品质<sup>[8]</sup>。【切入点】尽管围绕水肥耦合对蔬菜生长发育、产量和品质影响的研究较多, 但针对河西冷凉灌区膜下滴灌条件下的夏秋娃娃菜的适宜水肥耦合模式研究甚少。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以当地秋茬主栽品种金皇后为供试材料, 探明不同水肥耦合模式对娃娃菜生长及产量、品质的影响, 筛选出最优的水肥耦合模式, 为当地娃娃菜水肥管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2021年7—10月在甘肃省农业科学院永昌试验站(38°26'N, 101°92'E)进行, 该试验站位于甘肃河西走廊中部的金昌市永昌县。试验区海拔1998 m, 年平均气温为5.5℃, 年平均降水量为221.0 mm, 年平均蒸发量为2067.9 mm, 无霜期为121 d, 日照时间在2800 h以上。试验期间的日平均气温和降水量如图1所示。试验地土壤类型为灌漠土, 作物定植前0~20 cm土层的土壤pH值为8.26, EC为0.517 mS/cm, 有机质量为12.81 g/kg, 全氮量为0.65 g/kg, 碱解氮

收稿日期: 2023-03-13 修回日期: 2023-04-25 网络出版日期: 2023-09-14  
基金项目: 国家自然科学基金项目(32060678); 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA761); 甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2022GAAS26)  
作者简介: 马彦霞(1982-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事蔬菜轻简化栽培与水肥高效利用技术研究。E-mail: mayx1982@126.com  
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

量为 101.60 mg/kg, 全磷量为 3.02 g/kg, 速效磷量为 50.60 mg/kg, 全钾量为 81.54 g/kg, 速效钾量为 152.86 mg/kg。

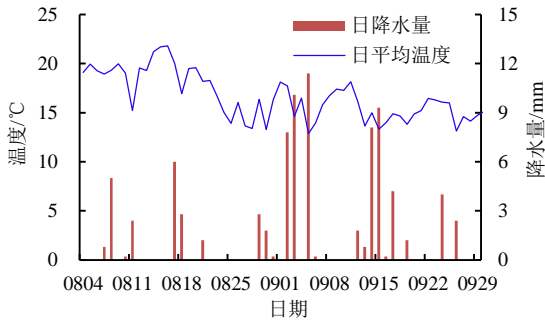


图 1 娃娃菜生育期内日降水量和平均温度变化

Fig.1 Diurnal variation of rainfall and average temperature during the growth period of mini Chinese cabbage

## 1.2 试验设计

以当地秋茬娃娃菜主栽品种金皇后为供试材料, 肥料选取复合肥 (15-15-15)、尿素 (N 46%) 和硫酸钾 ( $K_2O$  51%)。娃娃菜于 7 月 6 日育苗, 8 月 4 日定植, 9 月 29 日采收。种植方式为膜下滴灌 1 膜 2 管 4 行, 种植畦宽为 1.4 m, 畦间距为 0.2 m, 单株定植, 株间距为 20 cm, 行间距为 35 cm, 定植密度为 12.5 万株/ $hm^2$ , 目标产量为 150 t/ $hm^2$ 。

试验采用双因素随机区组设计, A 因素为灌水下限, 设置 3 个水平, 分别为 H1 (60% $\theta_f$ , 低水)、H2 (70% $\theta_f$ , 中水)、H3 (80% $\theta_f$ , 高水), 灌水上限统一设定为田间持水率 ( $\theta_f$ ), 当土壤含水率下降到灌水下限时即灌水至上限; B 因素为施肥量, 设置 3 个水平, 分别为 F1 (N 为 281 kg/ $hm^2$ ,  $P_2O_5$  为 166 kg/ $hm^2$ ,  $K_2O$  为 383 kg/ $hm^2$ , 低肥)、F2 (N 为 330 kg/ $hm^2$ ,  $P_2O_5$  为 195 kg/ $hm^2$ ,  $K_2O$  为 450 kg/ $hm^2$ , 中肥)、F3 (N 为 380 kg/ $hm^2$ ,  $P_2O_5$  为 224 kg/ $hm^2$ ,  $K_2O$  为 518 kg/ $hm^2$ , 高肥), 共计 9 个处理。每个处理设置 1 个小区, 小区面积为 73.6  $m^2$ , 每个小区分为 3 个子区作为 3 个重复。在整地时施入基肥, 氮、磷、钾肥分别占总施肥量的 20%、35%、15%, 缓苗结束后随水追施剩余肥量的 10%, 莲座期、结球初期和叶球膨大期均追施剩余肥量的 30%。缓苗结束时各处理统一灌水 1 次, 之后开始试验处理, 娃娃菜生育期内的灌水量如图 2 所示。试验前测定土壤饱和含水率, 试验期间逐日监测各处理的田间土壤含水率, 并于降水后和灌水前、后加测土壤含水率, 计算每次的灌水量 ( $M$ )。灌水量的计算式为:

$$M=10\times\gamma\times H\times\rho\times(\theta_f-\theta), \quad (1)$$

式中:  $M$  为灌水量 (mm);  $\gamma$  为 0~20 cm 土层的土壤平均体积质量 ( $g/cm^3$ );  $H$  为计划湿润层深度 (cm);  $\rho$  为土壤湿润比;  $\theta_f$  为田间持水率;  $\theta$  为土壤质量含

水率。

## 1.3 测定项目及方法

采收时于每个小区随机选取 5 个叶球测定单株毛质量, 剥去外层叶片后测定单株叶球纵径、横径和产量。采收时测定生物量和经济产量, 折算为总产量, 计算净菜率和叶球紧实度<sup>[8]</sup>。

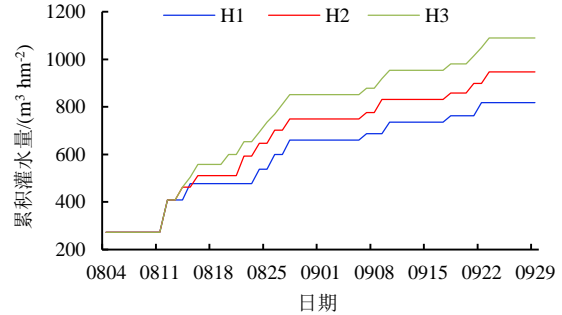


图 2 娃娃菜生育期内不同灌水水平下的累积灌水量

Fig.2 Cumulative irrigation amount of different irrigation levels during the growth period of mini Chinese cabbage

达到采收标准后, 测定娃娃菜可食用部分的可溶性固形物量、硝酸盐量、可溶性糖量、可溶性蛋白质量和 Vc 量, 其中可溶性固形物量采用 PAL-BX|ACID F5 手持测糖仪测定; 硝酸盐量参照 NY/T 1279—2007 标准测定; 可溶性蛋白质量、可溶性糖量和 Vc 量分别采用考马斯亮蓝法、蒽酮法、2,6-二氯靛酚钠法测定<sup>[9]</sup>。

## 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行整理和隶属函数分析, 利用 SPSS 23.0 进行方差分析和主成分分析<sup>[10]</sup>, 采用 Origin 22.0 进行相关分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对叶球生长性状的影响

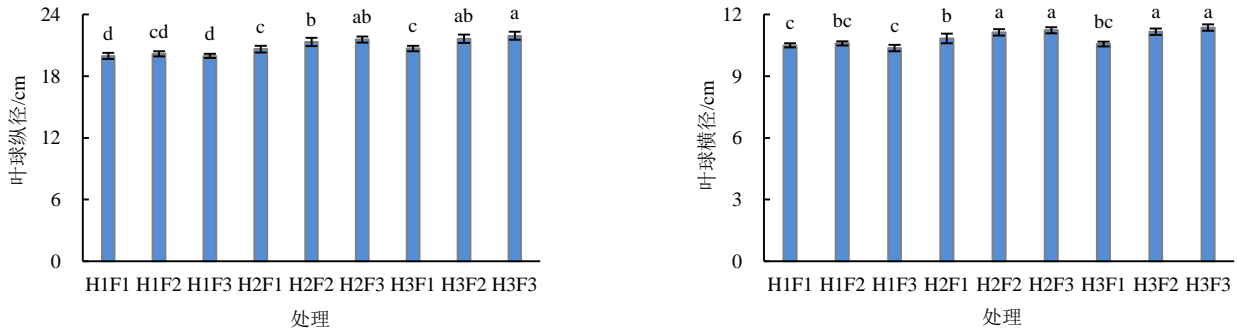
不同处理对叶球纵径和横径的影响如图 3 所示。随着施肥量的增加, 叶球纵径和横径在 H1 水平下呈先升高后降低的趋势, 在 H2、H3 水平下逐渐升高。随着灌水量的增加, F1 水平下叶球纵径逐渐升高, 而横径呈先上升后降低的趋势; 在 F2 和 F3 水平下, 叶球纵径和横径均随灌水量的增大呈上升趋势。水肥交互作用下, H3F3 处理下的叶球纵径最大, 达到 21.93 cm, 相比最小的 H1F1 处理高 9.85%, 但 H3F3 处理与 H2F3、H3F2 处理间无显著差异; H3F3 处理下的叶球横径最大, H2F3 处理次之, 但 H3F3 处理与 H2F2、H2F3、H3F2 处理间无显著差异。

### 2.2 不同处理对产量的影响

不同处理对娃娃菜产量的影响如表 1 所示。H3F3 处理下的娃娃菜毛质量最高, 但与 H3F2、H2F2 处理间无显著差异。水肥交互作用下, 娃娃菜净质量、净

菜率、叶球紧实度和产量均以 H2F2 处理为最高, H1F1 处理最小。与 H1F1 处理相比, H2F2 处理的单株毛质量、净质量、净菜率、叶球紧实度和产量分别提高了 33.01%、61.41%、21.40%、10.77%、33.72%。随着施肥量的增加, H1 水平下的单株毛质量和叶球紧实度逐渐升高, 单株净质量、净菜率和产量均先升高后降低; H2 水平下 5 个指标均随施肥量的增加呈先上升后下降的变化趋势; H3 水平下, 随着施肥量

的增加, 除了单株毛质量逐渐升高外, 其他指标均呈先升高后降低的趋势。随着灌水量的增加, F1 水平下的单株毛质量先上升后下降, 其他指标均呈上升趋势; F2 水平下, 随着灌水量的增大, 单株毛质量逐渐升高, 而其他指标均呈先升高后下降的趋势; F3 水平下, 随着灌水量的增加, 单株毛质量、净质量及产量均呈上升趋势, 净菜率先升高后降低, 叶球紧实度逐渐下降。



注 图中小写字母表示不同处理间在 5% 水平上差异显著, 下同。

图 3 不同处理对娃娃菜叶球纵径和横径的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the longitudinal diameter and transverse diameter of mini Chinese cabbage

表 1 不同处理下娃娃菜单株质量、净菜率、叶球紧实度及产量

Table 1 Effects of water and fertilizer treatments on single plant weight, net vegetable rate and yield of mini Chinese cabbage

处理	单株毛质量/kg	单株净质量/kg	净菜率/%	叶球紧实度	产量/(kg hm <sup>-2</sup> )
H1F1	1.020±0.010 e	0.476±0.005 g	46.7±0.173 d	0.463±0.009 c	115 316.5±2 027.0 f
H1F2	1.073±0.015 d	0.549±0.004 e	51.2±0.494 c	0.474±0.011 bc	119 242.2±1 349.4 e
H1F3	1.083±0.012 d	0.533±0.006 f	49.2±1.068 c	0.505±0.021 a	118 219.8±1 228.8 ef
H2F1	1.177±0.021 c	0.580±0.010 d	49.3±0.651 c	0.486±0.020 abc	124 926.2±1 421.9 d
H2F2	1.357±0.032 ab	0.768±0.012 a	56.7±1.468 a	0.513±0.021 a	154 205.1±3 620.5 a
H2F3	1.350±0.030 b	0.739±0.011 c	54.8±1.797 ab	0.496±0.015 ab	147 089.9±2 388.3 b
H3F1	1.163±0.031 c	0.590±0.008 d	50.8±0.959 c	0.503±0.014 ab	131 264.5±3 435.0 c
H3F2	1.367±0.025 ab	0.761±0.012 ab	55.7±1.739 ab	0.507±0.021 a	151 301.8±2 485.0 a
H3F3	1.390±0.030 a	0.748±0.010 bc	53.9±1.208 b	0.491±0.003 abc	150 606.6±2 713.7 ab

注 表中同列小写字母表示不同处理间在 5% 水平上的差异显著性, 下同。

### 2.3 不同处理对娃娃菜品质的影响

不同处理下的娃娃菜品质指标见表 2。可溶性固形物量和可溶性蛋白质质量在 H1 水平下随施肥量的增加均呈下降趋势, 可溶性糖量、硝酸盐量和 Vc 量随施肥量的增大而增大; H2、H3 水平下, 随着施肥量的增大, 硝酸盐量和可溶性蛋白质质量逐渐升高, 可溶性固形物量、可溶性糖量和 Vc 量均呈先升高后降低的变化趋势。相同施肥水平下, 随着灌水量的增大,

可溶性蛋白质质量逐渐升高, 硝酸盐量逐渐下降, 而 Vc 量则先升高后降低。H2F2 处理下的可溶性固形物量最大, H3F2 处理次之, 但二者间差异不显著; H2F2 处理下的 Vc 量显著高于其他处理, H1F1 处理显著低于其他处理, H2F2 较 H1F1 处理提高了 44.24%; H3F3 处理下的可溶性蛋白质质量最大, 但与 H2F2、H2F3、H3F1、H3F2 处理间无显著差异。

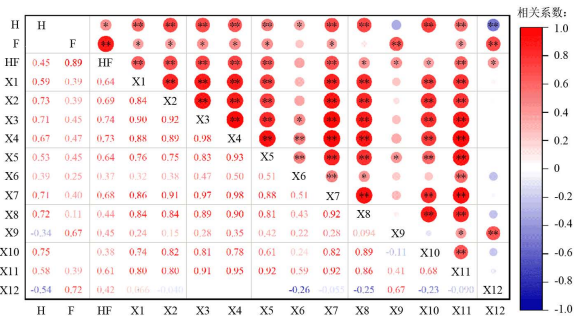
表 2 不同水肥处理下的娃娃菜品质指标

Table 2 Effects of different water and fertilizer treatments on the quality of mini Chinese cabbage

处理	可溶性固形物量	可溶性糖量/%	Vc 量/(mg g <sup>-1</sup> )	可溶性蛋白质量/(mg g <sup>-1</sup> )	硝酸盐量/(mg kg <sup>-1</sup> )
H1F1	4.00±0.000 d	2.43±0.018 cd	1.434±0.009 g	1.959±0.004 c	205.7±1.509 b
H1F2	3.93±0.058 d	2.49±0.036 c	1.583±0.015 f	1.918±0.011 d	206.1±2.330 b
H1F3	3.73±0.058 e	2.64±0.025 a	1.613±0.013 f	1.888±0.009 d	212.4±1.449 a
H2F1	4.13±0.058 c	2.39±0.030 d	1.713±0.017 d	1.976±0.022 bc	187.3±2.214 d
H2F2	4.60±0.100 a	2.61±0.045 ab	2.069±0.043 a	2.016±0.011 a	196.0±3.017 c
H2F3	4.43±0.058 b	2.58±0.037 ab	1.894±0.030 c	2.023±0.021 a	211.7±3.835 a
H3F1	4.23±0.058 c	2.25±0.030 e	1.661±0.028 e	1.994±0.017 ab	175.0±2.330 e
H3F2	4.53±0.058 ab	2.57±0.045 b	1.941±0.028 b	2.025±0.029 a	195.3±3.575 c
H3F3	4.43±0.058 b	2.45±0.030 cd	1.859±0.029 c	2.028±0.031 a	206.6±4.408 b

### 2.4 水肥施用量与娃娃菜生长、产量、品质指标的相关分析

水肥施用量与娃娃菜生长、产量、品质指标的相关性如图 4 所示。水肥交互与叶球纵径、横径、单株毛质量、净质量、净菜率、产量及 Vc 量均呈极显著正相关，与可溶性固形物量、可溶性糖量、可溶性蛋白质量和硝酸盐量均呈显著正相关。水肥交互条件下单株毛质量的相关系数最大，单株净质量次之，叶球紧实度的相关系数最小。可见，各项指标对水肥条件的敏感性存在差异，说明娃娃菜各指标对水肥响应的重要程度不同，需要进一步采用多元分析方法进行综合评价。



注 图中 H、F、HF、X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9、X10、X11、X12 分别表示灌水、施肥、水肥互作、叶球横径、叶球纵径、单株毛质量、单株净质量、净菜率、叶球紧实度、产量、可溶性固形物量、可溶性糖量、可溶性蛋白量、Vc 量、硝酸盐量。

图 4 水肥施用量与娃娃菜生长和产量、品质指标的相关性

Fig.4 Correlation marker heat map of water and fertilizer application rate with growth, yield and quality indexes of baby cabbage

表 4 不同处理的综合指标得分值、隶属函数值及综合评价值

Table 4 The values of comprehensive index, subordinate functions and comprehensive evaluation of different treatments

处理	综合指标得分			隶属函数值			D	排名
	F1	F2	F3	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$		
H1F1	-3.820	-0.070	-1.260	0.106	0.640	0.011	0.375	9
H1F2	-2.750	0.777	-0.397	0.230	0.708	0.156	0.681	7
H1F3	-3.200	1.913	1.477	0.155	0.951	0.596	0.561	8
H2F1	-1.207	-1.163	-0.270	0.380	0.363	0.331	0.968	5
H2F2	3.447	0.383	0.967	0.833	0.717	0.710	2.103	1
H2F3	2.523	1.030	-0.543	0.773	0.879	0.470	1.992	4
H3F1	-0.850	-2.960	0.760	0.395	0.057	0.571	0.945	6
H3F2	3.097	-0.090	0.357	0.815	0.693	0.621	2.056	2
H3F3	2.760	0.187	-1.087	0.818	0.669	0.390	2.054	3

### 3 讨论

水、肥是影响蔬菜产量的重要因素，水分和养分之间存在显著的耦合效应<sup>[11]</sup>。本研究发现，灌水量和施肥量及其交互作用均对娃娃菜的叶球纵径和横径、单株毛质量和净质量、净菜率及产量有显著影响，且水肥交互作用的影响最大，灌水量次之，施肥量最小。以往对于番茄<sup>[12]</sup>的研究也表明，灌水量对产量的影响

### 2.5 水肥耦合效应综合评价

利用主成分分析法对不同水肥处理下的娃娃菜生长性状、产量和品质指标进行分析，各指标主成分的特征值、贡献率和累积贡献率如表 3 所示。根据主成分因子累积贡献率大于 80% 的准则提取 3 个主成分因子，从而将 12 个单项指标转化为 3 个相互独立的综合指标，累积方差贡献率为 91.87%。第 1 主成分特征值为 8.149，贡献率为 67.91%；第 2 主成分特征值为 1.875，贡献率为 15.622%；第 3 主成分特征值为 1.001，贡献率为 8.338%。

表 3 主成分的特征值、贡献率和累积贡献率

Table 3 Eigenvalue, contribution rate and cumulative contribution rate of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
第 1 主成分	8.149	67.91	67.91
第 2 主成分	1.875	15.622	83.532
第 3 主成分	1.001	8.338	91.87

不同处理的综合指标得分值、隶属函数值及综合评价结果见表 4。相同灌水量条件下，随着施肥量的增加，综合得分呈先升高后降低的趋势；低肥和中肥水平下，中水处理的综合得分高于低水和高水处理，而高肥水平下，高水处理的综合得分最高；水肥耦合模式下，综合得分排在前 3 位的分别是 H2F2、H3F2、H3F3 处理，排在后 3 位的分别是 H1F2、H1F3、H1F1 处理。

大于施肥量。水肥耦合存在阈值效应，在阈值范围内，水肥交互作用的增产效应显著，超过一定范围，水肥施用量的增加则会降低产量<sup>[13]</sup>。本试验中，F2 水平下的娃娃菜单株净质量、净菜率、叶球紧实度和产量均随灌水量的增大呈明显的上升趋势，超过一定范围后开始下降；H2 水平下，随着施肥量的增大，单株毛质量和净质量、净菜率、叶球紧实度及产量均先上升后下降的变化趋势，这与前人<sup>[14-15]</sup>研究结果相似。

品质是衡量蔬菜营养和商品价值的重要指标,与水肥因素关系密切。本研究发现,随着灌水量的增大,娃娃菜的可溶性糖量、硝酸盐量降低,可能是由于增大灌水量对可溶性糖量和硝酸盐量产生了稀释作用。当灌水量相同时,硝酸盐量总体随施肥量的增加而增大,这可能是由于硝酸根离子随着土壤中氮素供给能力的增强而逐渐增强,以往针对大白菜<sup>[14]</sup>的研究也得出了相似的结论。当施肥量相同时,娃娃菜的硝酸盐量随灌水量的增大而减小,这与以往围绕黄瓜<sup>[16]</sup>的研究结论相似。在 H1 水平下, Vc 量随施肥量的增大而增大,而在 H2 和 H3 水平下, Vc 量随施肥量的增加先升高后下降,这在甘蓝<sup>[8]</sup>的研究中也得到了验证。

前人采用主成分分析法对白萝卜的产量、品质等指标进行了综合评价,提出了适宜的水肥耦合模式<sup>[17]</sup>;陈潇洁等<sup>[18]</sup>通过主成分分析法和隶属函数法综合评价了番茄的产量和品质,筛选出适宜的水肥组合。本研究通过主成分分析筛选出 3 个综合指标,再利用主成分的隶属函数结合权重对娃娃菜各项指标响应水肥耦合的效应进行了综合评价,结果表明,相同灌水量条件下,综合得分随施肥量的增加呈先升高后降低的趋势: F1 水平和 F2 水平下的 H2 处理综合得分最高,而 F3 水平下的 H3 处理得分最高;水肥耦合模式下,中水中肥(H2F2)处理的综合得分高于其他处理,为本试验条件下最优的水肥组合。

## 4 结论

灌水量、施肥量及其交互作用均在不同程度上影响娃娃菜的生长指标、产量和品质,且水肥交互作用的影响高于灌水量和施肥量的单独影响。

水肥耦合模式下, H2F2 处理可提高娃娃菜的单株净质量、净菜率、产量、可溶性固形物量和 Vc 量,增加结球紧实度,降低硝酸盐量。

综合考虑娃娃菜生长性状、产量和品质指标,灌水下限控制在田间持水率的 70%、施肥量设定 N 为 330 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 195 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 为 450 kg/hm<sup>2</sup> 为较优的娃娃菜水肥管理模式。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献:

- MA Shimeng, TONG Ling, KANG Shaozhong, et al. Optimal coupling combinations between dripper discharge and irrigation interval of maize for seed production under plastic film-mulched drip irrigation in an arid region[J]. *Irrigation Science*, 2022, 40(2): 177-189.
- 马彦霞, 王晓巍, 张玉鑫, 等. 戈壁荒漠区基质槽培辣椒耗水特征及产量品质对水分调控的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(11): 1-8. MA Yanxia, WANG Xiaowei, ZHANG Yuxin, et al. The impacts of controlled irrigation on water consumption, yield and fruit quality of substrate-cultivated pepper (*Capsicum annuum*) in Gobi Desert[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(11): 1-8.
- LIU Xiao, LI Mo, GUO Ping, et al. Integrated optimization of water and fertilizer coupling system under uncertainty[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 126: 268-277.
- RATHORE V S, NATHAWAT N S, BHARDWAJ S, et al. Optimization of deficit irrigation and nitrogen fertilizer management for peanut production in an arid region[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 5 456.
- 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. YANG Bin, CHEN Xiubin, ZHONG Yufeng, et al. Effects of water and nitrogen interaction on photosynthetic characteristics and water-nitrogen utilization of baby cabbage in middle reaches of Hei River[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1): 162-168.
- 陈修斌, 杨彬, 钟玉凤, 等. 水氮耦合对河西绿洲娃娃菜生长与生理生化指标的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 251-256. CHEN Xiubin, YANG Bin, ZHONG Yufeng, et al. Effects of water and nitrogen coupling on growth and physiological and biochemical indexes of baby cabbage in Hexi oasis[J]. *Soils*, 2019, 51(2): 251-256.
- 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. DAI Shundong, WEI Shugu, LAI Jia, et al. Effects of water and N, P, and K fertilizer combined application on Chinese cabbage yield[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38(3): 299-304.
- 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. MA Yanxia, ZHANG Yuxin, WANG Xiaowei. Response of yield, quality and nutrients absorption of greenhouse cabbage to different combinations of water and fertilizer in Hexi oasis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 270-276.
- 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. LI Hesheng. *Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- 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. XIAO Jibing, LIU Zhi, XIN Zongxu, et al. Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(6): 34-44.
- 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): e0 254 013.
- WANG X K, XING Y Y. Evaluation of the effects of irrigation and fertilization on tomato fruit yield and quality: A principal component analysis[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 350.
- 何振嘉, 刘全祖. 水肥耦合对贺兰山东麓滴灌酿酒葡萄产量和品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(5): 65-74. HE Zhenjia, LIU Quanzu. The combined effects of water and fertilizer on yield and quality of wine grapes under drip fertigation in Eastern foot of Helan Mountain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(5): 65-74.
- 黄欣莉, 张小帅, 岑剑涛. 充分灌溉条件下不同肥量处理对大白菜产量和品质的影响[J]. *农业工程*, 2022, 12(1): 79-82. HUANG Xinli, ZHANG Xiaoshuai, CEN Jiantao. Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of Chinese cabbage under optimal irrigation system[J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(1): 79-82.
- WANG Wenjuan, WANG Tieliang, LI Bo. Effects of different water and fertilizer couplings on the yield and soil environment of greenhouse tomatoes in Liaoning, China[J]. *Nature Environment and Pollution*

- Technology, 2016, 15(1): 141.
- [16] 蒋静静, 屈锋, 苏春杰, 等. 不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 86-97.
- JIANG Jingjing, QU Feng, SU Chunjie, et al. Effects of different water and fertilizer coupling on yield and quality of cucumber and partial factor productivity of fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(1): 86-97.
- [17] 范海燕, 潘兴瑶, 胡秀君, 等. 基于主成分分析的露地白萝卜滴灌施肥制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S1): 87-93.
- FAN Haiyan, PAN Xingyao, HU Xiujun, et al. Study on drip irrigation and fertilization system of white radish in open field based on principal component analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S1): 87-93.
- [18] 陈潇洁, 吕德生, 王振华, 等. 加气灌溉及水氮耦合滴灌对加工番茄产量及品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 191-200.
- CHEN Xiaojie, LYU Desheng, WANG Zhenhua, et al. Effects of water and nitrogen coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated irrigation[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 191-200.

## The Combined Effect of Water and Fertilizer on Yield and Quality of Mini Chinese Cabbage in Cold-cool Irrigation Area

MA Yanxia<sup>1</sup>, CHEN Jingru<sup>2</sup>, WANG Xiaowei<sup>1</sup>, KUAI Jialin<sup>1</sup>, ZHANG Junfeng<sup>1</sup>

(1. Vegetable Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

2. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** 【Objective】 Mini Chinese cabbage is a cash crop in Hexi Corridor in northwestern China, but its production relies on irrigation and fertilization. The objective of this paper is to investigate the combined effect of water and fertilizer on its yield and quality. 【Method】 The experiment was conducted in a film-mulched field, with the variety Golden Queen used as the model plant. The crop was drip irrigated. There were three irrigation treatments and three fertilization treatments, which combine making total nine treatments. In each treatment, we measure yield and quality of the cabbage. The key indexes was screened using the principal component analysis, and comprehensive evaluation of the combined effect of water and fertilizer was analyzed using the membership function and the weighted standard deviation coefficient method. 【Result】 Irrigation and fertilization jointly affected growth index, yield and quality of the cabbage, albeit the effect varied with their combinations. Combination of water and fertilizer affected crop growth and yield more greatly than irrigation and fertilization working independently. Moderate irrigation and fertilization increased the net weight per plant, net vegetable rate, yield, soluble solids, Vc content and heading compactness, but reduced nitrate content. Principal component analysis reduced the 12 indicators into three independent comprehensive indicators, with their cumulative contribution rate being 91.87%. The comprehensive score for the coupled effect of water and fertilizer was the highest when irrigation and fertilization were both at moderate level. 【Conclusion】 Comprehensive analysis showed that a suitable irrigation and fertilization for autumn mini Chinese cabbage in Hexi Corridor region is: keeping soil water content higher than 70% of the field capacity, and applying 330 kg/hm<sup>2</sup> of N, 195 kg/hm<sup>2</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 450 kg/hm<sup>2</sup> of K<sub>2</sub>O.

**Key words:** cold-cool irrigated areas of Hexi Corridor; *Brassica pekinensis*; water and fertilizer coupling; principal component analysis; membership function method

责任编辑：韩 洋