

水肥耦合对河西冷凉灌区春茬娃娃菜生长和光合特性的影响

马彦霞¹, 陈静茹², 牛成达³, 任亚丽⁴, 常涛⁵, 张莉⁵

(1. 甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 金昌市农艺研究院, 甘肃 金昌 737100; 4. 通渭县农业技术推广中心, 甘肃 通渭 743300; 5. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为寻求河西冷凉灌区春茬娃娃菜(*Brassica pekinensis*)适宜的水肥管理模式, 以当地春茬主栽娃娃菜品种耐寒金黄后为试材, 研究了不同水肥组合对娃娃菜叶球生长和叶片光合参数的影响。结果表明, 灌水量、施肥量及水肥交互作用均不同程度影响娃娃菜生长和光合特性, 且施肥量的影响最大, 水肥交互作用的影响次之。相同施肥条件下随着灌溉量的增大叶球横径和纵径均表现出明显的上升趋势, 超过一定范围后逐渐下降; 灌水下限控制在田间持水量的70%(中水)和80%(高水)处理后娃娃菜叶球横径和纵径随着施肥量的升高均呈先增加后减小的趋势。全生育期施肥量为 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm² 的施肥条件下增大灌水量, 叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Cond)、蒸腾速率(Tr)均呈先增大后减小的趋势, 而叶片胞间 CO₂ 浓度(Ci)呈先减小后增大的趋势; 灌水下限控制在田间持水量的70%的灌溉水平下增加施肥量, 提高了娃娃菜叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Cond)、蒸腾速率(Tr), 降低了娃娃菜叶片胞间 CO₂ 浓度(Ci)。随着施肥量的增加, 莲座期、结球期和采收期叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Cond)和蒸腾速率(Tr)均呈先升高后降低的趋势, 而叶片胞间 CO₂ 浓度(Ci)先降低后升高。不同水肥耦合模式以中水中肥处理(灌水下限控制在田间持水量的70%, 施 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²)表现最优, 较低水高肥处理(灌水下限控制在田间持水量的60%, 施 N 380 kg/hm²、P₂O₅ 224 kg/hm²、K₂O 518 kg/hm²)娃娃菜叶球横径和纵径分别提高了18.72%、10.98%, 中心柱长则降低了31.89%; 叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率分别提高了13.10%、27.52%、22.26%, 叶片胞间 CO₂ 浓度降低了8.07%。综合考虑娃娃菜生长状况和光合利用特性, 认为甘肃河西冷凉灌区春茬娃娃菜最为适宜的水肥组合模式是灌水下限控制在田间持水量的70%, 全生育期施肥量为 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²。

关键词: 娃娃菜; 水肥耦合; 隶属函数; 生长; 光合特性; 河西冷凉灌区

中图分类号: S634.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)02-0117-07

doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2025.02.004

Effects of Water and Fertilizer Coupling on Plant Growth and Photosynthetic Properties of Spring Baby Cabbages in the Hexi Cold Irrigation Areas

MA Yanxia¹, CHEN Jingru², NIU Chengda³, REN Yali⁴, CHANG Tao⁵, ZHANG Li⁵

(1. Vegetable Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 3. Jinchang Agricultural Research Institute, Jinchang Gansu 737100, China; 4. Tongwei Agricultural Technology Extension Centre, Tongwei Gansu 743300, China; 5. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China.)

Abstract: This study aimed to identify an optimal water and fertilizer management model for spring baby cabbages (*Brassica pekinensis*) in the Hexi cold irrigation area. Using the local spring baby cabbage variety Cold-resistant Gold Queen as the experimental material, effects of different water-fertilizer combinations on the growth of leaf head and leaf photosynthetic parameters were investigated. Results showed that irrigation capacity, fertilization rate, and water-fertilizer interaction all significantly affected cabbage growth and photosynthetic characteristics, with fertilization rate having the greatest impact, followed by water-fertilizer interaction. Under the same fertilization conditions, as irrigation capacity increased, both the horizontal and vertical diameters of cabbage heads increased significantly, but they began to decrease after reaching a certain threshold. When the irrigation lower limit

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(32060678); 甘肃省自然科学基金(22JR5RA761); 甘肃省农业科学院重点研发计划(2022GAAS26)。

作者简介: 马彦霞(1982—), 女, 甘肃定西人, 副研究员, 博士, 主要从事蔬菜轻简化栽培与水肥高效利用研究工作。Email: mayx1982@126.com。

was controlled at 70% (medium water) and 80% (high water) of the field water holding capacity, the horizontal and vertical diameters of cabbage heads showed an initial increase followed by a decrease as fertilization rate increased. When the fertilization rate was N 330 kg/ha, P₂O₅ 195 kg/ha, and K₂O 450 kg/ha, increasing irrigation capacity caused net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Cond), and transpiration rate (Tr) to initially increase and then decrease, while intercellular CO₂ concentration (Ci) initially decreased and then increased. Under the irrigation level where the lower limit was controlled at 70% of field water holding capacity, increasing the fertilization rate improved the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance(Cond), and transpiration rate (Tr) of cabbage leaves, while reducing the intercellular CO₂ concentration (Ci). As the fertilization rate increased, the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Cond), and transpiration rate (Tr) of the leaves during rosette, head formation, and harvesting stages all showed an initial increase followed by a decrease, while the intercellular CO₂ concentration (Ci) initially decreased and then increased. Among the different water–fertilizer coupling models, the medium water and medium fertilizer treatment (irrigation lowerlimit controlled at 70% of field water holding capacity, fertilization of N 330 kg/ha, P₂O₅ 195 kg/ha, and K₂O 450 kg/ha) performed the best. The lower water and high fertilizer treatment (irrigation lower limit controlled at 60% of field water holding capacity, fertilization of N 380 kg/ha, P₂O₅ 224 kg/ha, and K₂O 518 kg/ha) increased the horizontal and vertical diameters of cabbage heads by 18.72% and 10.98%, respectively, while the center column length decreased by 31.89%. The leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate increased by 13.10%, 27.52%, and 22.26%, respectively, while the intercellular CO₂ concentration decreased by 8.07%. Considering the growth conditions and photosynthetic utilization characteristics of baby cabbage, it is concluded that the most suitable water–fertilizer combination model for spring baby cabbage in the Hexi cold irrigation area of Gansu is the irrigation lower limit controlled at 70% of field water holding capacity, with a fertilization rate of N 330 kg/ha, P₂O₅ 195 kg/ha, and K₂O 450 kg/ha throughout the growth period.

Key words: Baby cabbage; Water and fertilizer coupling; Membership function; Growth; Photosynthetic property; Hexi cold irrigation area

近年来,甘肃高原夏菜产业发展迅速^[1]。娃娃菜(*Brassica Pekinensis*)是高原夏菜主栽蔬菜种类,也是河西走廊冷凉灌区实现乡村振兴的支柱产业^[2-3],但生产中大多采用传统的水肥管理方式,导致水肥资源利用率低,环境污染严重,影响娃娃菜产业的健康可持续发展^[4]。水和肥是作物生长发育及提高生产力水平的重要物质基础^[5],协调好水肥关系有利于促进作物生长,节约水肥资源,增加收入^[6-7]。适宜的水肥组合可显著提高娃娃菜叶球的生长,水肥耦合具有较强的互作效应^[8];马新超等^[9]研究表明,水肥耦合对甘蓝叶球的生长影响显著,适宜的水肥管理可使甘蓝叶球的横径和纵径增大,中心柱缩短。光合作用是植物生长的重要生理过程之一,合理的水肥组合可在一定程度上促进植物的光合作用^[10];水肥耦合对光合参数存在显著的正效应,水肥的交互作用存在一定阈值,光合速率随灌溉上限的升高而增大,超过一定范围后开始下降^[11]。虽然迄今国内外关于此方面的研究较多,但针对河西走廊冷凉灌区春茬娃娃菜水肥耦合对叶球生长和叶片光合特性影响的研究相对较少。鉴于此,本试验以春茬娃娃菜为研究对象,设置不同的水肥组合处理,研究娃娃菜叶球生长和光合参数对不同处理的响应,拟筛选出适宜春茬娃娃菜的最佳水肥耦合模式,为河西冷凉灌区娃娃菜水肥管理提供理

论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在河西走廊冷凉灌区典型代表地段金昌市永昌县城关镇大坝村进行。供试品种为当地春茬娃娃菜主栽品种耐寒金皇后;供试肥料选择平衡复合肥(N-P₂O₅-K₂O为15-15-15)、尿素(含N 46%)和硫酸钾(含K₂O 51%)。采用平畦膜下滴灌种植模式,畦宽1.4 m,畦间距0.2 m,畦上铺设两根滴灌带,定植4行娃娃菜。采用穴盘育苗移栽方式,4月中旬温室内育苗,5月下旬露地定植,7月中旬采收。

1.2 试验方法

试验采用二因素多水平设计,设置灌溉量和施肥量2个因素,其中灌溉量设3个水平,分别将灌水下限控制在田间持水量(θ_f)的60%(W1,低水)、70%(W2,中水)和80%(W3,高水),当土壤含水量降到灌水下限时灌水至田间持水量;施肥量以当地大田施肥标准(全生育期总施肥量1122 kg/hm²,N:P:K=1:0.59:1.36)为基础,设3个施肥水平,分别为低肥(F1,施N 281 kg/hm²、P₂O₅ 166 kg/hm²、K₂O 383 kg/hm²)、中肥(F2,施N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²)、高肥(F3,施N 380 kg/hm²、P₂O₅ 224 kg/hm²、K₂O 518 kg/hm²)。试验共设9个处理,分别为W1F1、W1F2、W1F3、

W2F1、W2F2、W2F3、W3F1、W3F2、W3F3。结合整地基施 20.0%N、35.0%P₂O₅、15.0% K₂O, 剩余肥料分别在缓苗结束后随水追施 8.0%N、6.5% P₂O₅、8.5% K₂O, 莲座期随水追施 24.0% N、19.5% P₂O₅、25.5% K₂O, 结球初期随水追施 24.0% N、19.5% P₂O₅、25.5% K₂O, 叶球膨大期随水追施 24.0% N、19.5% P₂O₅、25.5% K₂O。缓苗结束后开始用土壤含水量监测系统 (EM50 数据采集器, Decagon, GS1, 美国)逐日监测不同处理田间土壤含水量, 计算灌水量^[12], 按需灌水, 灌水量采用水表记录。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶球横径、纵径和中心柱长测定 达到采收标准后, 每小区随机取 5 个叶球, 用卷尺测定叶球横径、纵径和中心柱长, 重复 3 次。

1.3.2 叶片光合参数测定 于莲座期、结球期、采收期取娃娃菜功能叶用便携式光合仪 (美国, LI-6400XT)测定叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Cond)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO₂ 浓度(Ci)。每处理每次随机选 5 株, 每株选 1 片娃娃菜最里层外缘平展的功能叶测定^[13]。

1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2010、SPSS 23.0、Origin

22.0 对试验数据进行整理和统计分析。采用隶属函数法对娃娃菜各项指标进行综合评价, 计算方法如下^[14]。

$$\mu(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$$

式中, $\mu(X_{ij})$ 表示第 i 个处理第 j 个指标的隶属函数值; X_{max} 表示第 j 个指标的最大值; X_{min} 表示第 j 个指标的最小值, 下式同上。

胞间 CO₂ 浓度与灌水量、施肥量和水肥交互为逆向指标, 运用反隶属函数计算其隶属函数值。

$$\mu(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$$

2 结果与分析

2.1 不同水肥耦合处理对娃娃菜生长形态指标的影响

纵横径和中心柱长是反映娃娃菜植株生长的重要指标之一, 其长势状况一定程度上可以衡量作物营养状况的强弱。由表 1 可以看出, W2F2 处理横径最大, 但与 W2F3、W3F2、W3F3 处理均无显著性差异, 较横径最小的 W1F3 处理提高了 18.72%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$); 在中水(W2)和高水(W3)灌溉条件下, 娃娃菜横径随施肥量增加呈先上升后下降的趋势, 且灌水量处理和施肥处理对横径均有极显著的影响。纵径变化范围为 20.03 ~ 22.23 cm, W2F2 处理最大, 比最小的 W1F3

表 1 不同处理的娃娃菜叶球生长形态指标^①

处理	横径	纵径	中心柱长
W1F1	12.13±0.513 de	20.57±0.404 cd	4.67±0.153 bc
W1F2	12.10±0.458 de	20.23±0.321 d	4.83±0.115 b
W1F3	11.43±0.252 e	20.03±0.208 d	5.33±0.379 a
W2F1	12.70±0.300 bcd	21.27±0.643 bc	4.50±0.265 bc
W2F2	13.57±0.321 a	22.23±0.404 a	3.63±0.586 d
W2F3	13.27±0.306 ab	21.50±0.173 ab	4.47±0.208 bc
W3F1	12.37±0.551 cd	21.17±0.862 bc	4.60±0.173 bc
W3F2	13.47±0.503 a	21.70±0.200 ab	4.27±0.252 c
W3F3	12.90±0.200 abc	21.30±0.600 bc	4.50±0.173 bc
W1	11.89±0.132 b	20.28±0.159 a	4.94±0.097 a
W2	13.18±0.132 a	21.67±0.159 b	4.20±0.097 b
W3	12.91±0.132 a	21.39±0.159 b	4.46±0.097 b
F1	12.40±0.132 b	21.00±0.159 a	4.59±0.097 a
F2	13.04±0.132 a	21.39±0.159 a	4.24±0.097 b
F3	12.53±0.132 b	20.94±0.159 a	4.77±0.097 b
双因素方差分析			
W	**	**	**
F	**		*
W×F			

①表中同列小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著; W 表示灌水; F 表示施肥, 下同。

处理高 10.98%；低水(W1)处理与中水(W2)、高水(W3)处理间存在显著差异($P < 0.05$)，而各施肥处理间无显著差异。中心柱长以 W1F3 处理最长，为 5.33 cm；W2F2 处理最短，为 3.63 cm，较 W1F3 处理降低了 31.89%，且与其他处理间存在显著性差异($P < 0.05$)；低水(W1)条件下，高肥(F3)处理与低肥(F1)、中肥(F2)处理的娃娃菜中心柱长的差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.2 不同水肥耦合处理对娃娃菜光合特性的影响

2.2.1 叶片净光合速率(Pn) 不同水肥处理下娃娃菜叶片净光合速率的变化情况如图 1 所示。可以看出，娃娃菜叶片 Pn 在结球期达到最高水平，在莲座期处于最低水平，随生育期的推进总体呈先增大后减小的变化趋势。同一生育期娃娃菜叶片 Pn 除结球期、采收期 W1 时均表现为同一灌水条件下，娃娃菜随施肥量的增加先增后减；同一施肥条件下，娃娃菜叶片 Pn 随灌水量的增加呈先增后减的趋势，即在水肥耦合条件下，全生育期娃娃菜叶片 Pn 的最大值为 W2F2 处理，较 W3F1 处理提高了 13.10%，且差异显著($P < 0.05$)，但各生育期 W2F2 处理与 W3F2 处理均无显著性差异($P > 0.05$)。可见，不同水肥组合对娃娃菜叶片净

光合速率的影响较大，适宜的水肥组合有利于娃娃菜的光合作用。

2.2.2 叶片蒸腾速率(Tr) 由图 2 可知，娃娃菜叶片 Tr 在结球期达到最高水平，各处理平均为 7.35 mmol H₂O/(m²·s)；莲座期处于最低水平，各处理平均为 4.55 mmol H₂O/(m²·s)。随生育期的推迟，叶片 Tr 呈现先增大后减小的变化趋势。莲座期、结球期和采收期当灌水量相同时，叶片 Tr 均随施肥量的增大呈先升后降的趋势；当施肥量相同时，叶片 Tr 均随灌水量的增大也呈先升后降的趋势；水肥耦合条件下，所有生育阶段均以 W2F2 处理叶片 Tr 最大，但其均与 W3F2 处理无显著性差异；莲座期和结球期均以 W1F3 处理叶片 Tr 最小，采收期以 W1F1 处理叶片 Tr 最小。总体看来，全生育期娃娃菜 W2F2 处理平均叶片 Tr 较 W1F3 处理提高了 22.26%。

2.2.3 叶片气孔导度(Cond) 气孔导度是反映气孔运动的一种生理指标。如图 3 所示。叶片 Cond 随娃娃菜的生长发育呈现先增后减的变化趋势。莲座期、结球期和采收期均在 W2F2 处理达到最大值，分别为 0.44、0.67、0.61 mmol H₂O/(m²·s)，平均较 W1F3 处理提高了 27.52%。不同生育期内

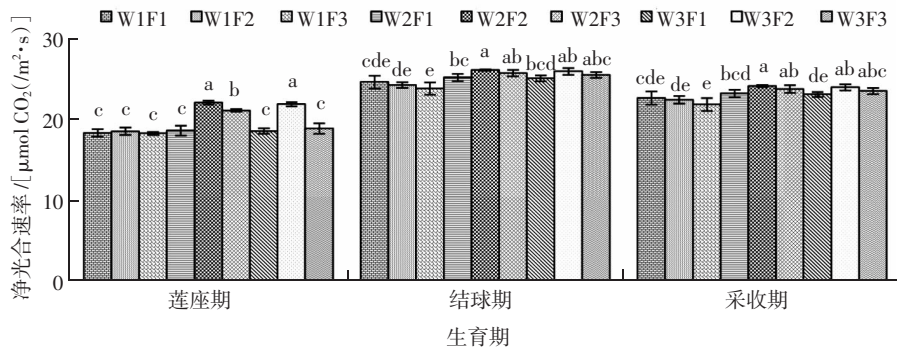


图 1 不同水肥耦合处理的娃娃菜不同生育期叶片净光合速率

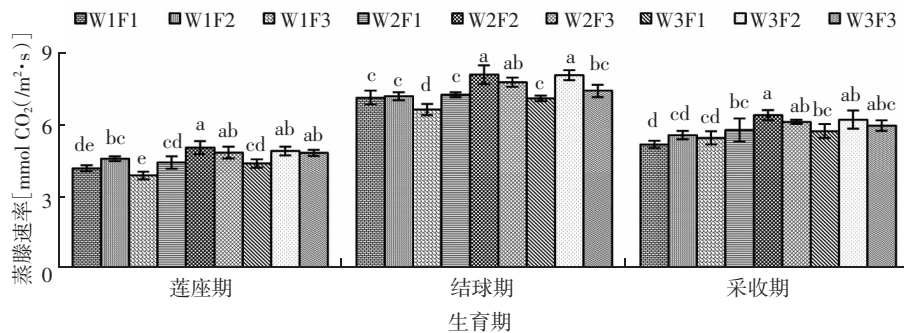


图 2 不同水肥耦合处理的娃娃菜不同生育期叶片蒸腾速率

叶片 Cond 在不同水肥处理下的表现均与 Pn 和 Tr 一致。

2.2.4 叶片胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 由图 4 可知, 叶片 Ci 的大致变化趋势与 Pn、Tr、Cond 相反, 说明在正常生长范围, Ci 越低, 光合作用越强。各处理叶片 Ci 随生育期的推进均呈先降后升的趋势。莲座期叶片 Ci 介于 236.65 ~ 255.67 μmol CO₂/mol, 中水(W2)处理下低肥(F1)与中肥(F2)处理间叶片 Ci 存在显著性差异; 结球期各处理的叶片 Ci 表现为 W1F3 > W3F1 > W1F2 > W1F1 > W2F1 > W3F3 >

W2F3 > W3F2 > W2F2; 采收期各处理叶片 Ci 均值为 232.16 μmol CO₂/mol。总体看来, 全生育期娃娃菜平均叶片胞间 CO₂ 浓度(Ci)W2F2 处理较W1F3 处理降低了 8.07%。同一生育期内叶片 Ci 在相同施肥量处理下, 随灌水量的增加呈开口向上的抛物线变化趋势, 而同一灌水量处理下 Ci 随施肥量的增加呈先降后升的趋势。

2.3 水肥施用量与各项指标的相关性分析

灌水量和施肥量与娃娃菜各项指标间的相关性分析结果如图 5 所示。灌水量与叶球横径和纵

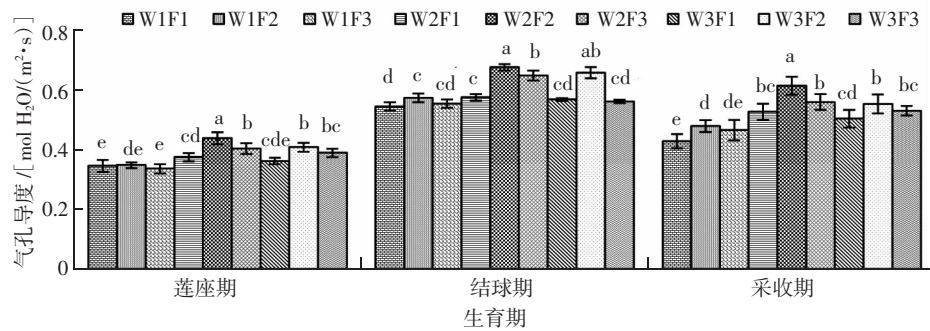


图 3 不同水肥耦合处理的娃娃菜不同生育期叶片气孔导度

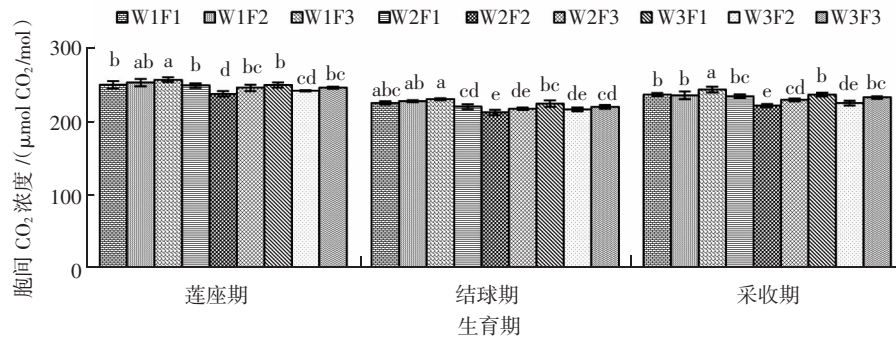
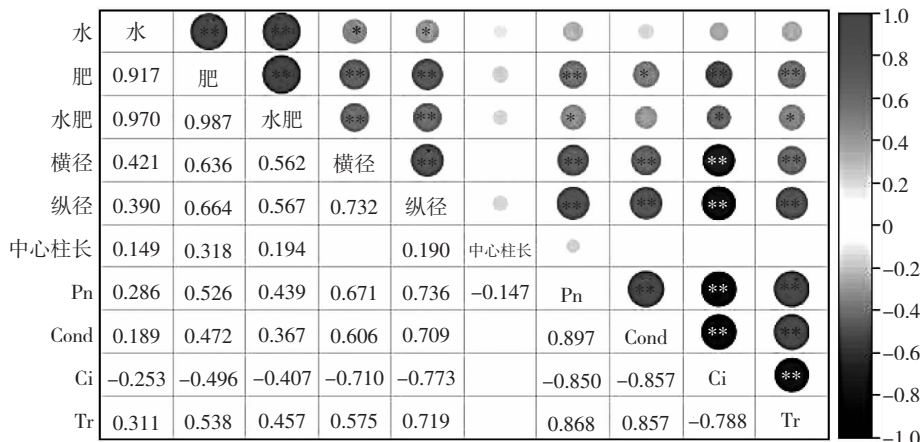


图 4 不同水肥耦合处理的娃娃菜不同生育期叶片胞间 CO₂ 浓度



*p<0.05 **p<0.01

图 5 水肥施用量与娃娃菜生长及光合特性指标的相关性分析

表 2 不同水肥处理各指标的隶属函数值

处理	横径	纵径	中心柱长	P_n	$Cond$	C_i	Tr	D_i	平均值排名
W1F1	0.511	0.333	0.190	0.333	0.113	0.350	0.232	0.295	7
W1F2	0.156	0.157	0.143	0.284	0.254	0.286	0.408	0.241	8
W1F3	0.089	0.118	0.762	0.156	0.163	0.095	0.149	0.219	9
W2F1	0.733	0.608	0.571	0.474	0.392	0.461	0.429	0.524	5
W2F2	0.933	0.824	0.429	0.929	0.894	0.882	0.820	0.816	1
W2F3	0.533	0.863	0.524	0.776	0.670	0.603	0.669	0.662	3
W3F1	0.778	0.608	0.476	0.446	0.312	0.362	0.387	0.481	6
W3F2	0.844	0.686	0.381	0.877	0.693	0.725	0.748	0.708	2
W3F3	0.511	0.706	0.667	0.557	0.401	0.523	0.577	0.563	4

径均呈显著正相关, 与其他指标均无相关性。施肥量与叶球横径和纵径及叶片 P_n 、 Tr 均呈极显著正相关, 与 $Cond$ 呈显著正相关, 与 C_i 呈极显著负相关。水肥施用量与叶球横径和纵径均呈极显著正相关, 与 P_n 、 Tr 均呈显著正相关, 与 C_i 呈显著负相关。可见, 水、肥施用量对娃娃菜各项指标均有一定程度的影响, 其中施肥量与各项指标的关联度较大。

2.4 水肥耦合效应综合评价

由表 2 可知, 叶球横径和叶片 P_n 、 $Cond$ 、 C_i 、 Tr 的隶属函数值均以 W2F2 处理为最大, 分别为 0.933、0.929、0.894、0.882、0.820; 叶球纵径的隶属函数值以 W2F3 处理最大, 为 0.863; 中心柱长生物的隶属函数值以 W1F3 处理最大, 为 0.762。不同处理各指标隶属函数平均值(D_i)由大到小依次表现为 W2F2、W3F2、W2F3、W3F3、W2F1、W3F1、W1F1、W1F2、W1F3。可见, 中水中肥(W2F2)处理的隶属函数平均值最大, 为 0.816; 低水高肥(W1F3)处理的隶属函数平均值最小, 为 0.219。

3 讨论与结论

灌溉和施肥是影响植物生长的主要因素, 且两者间存在显著的耦合效应^[15]。本试验灌溉量和施肥量及水肥交互作用均不同程度地影响着娃娃菜叶球横径和纵径, 且施肥量的影响最大, 水肥交互作用次之, 灌溉量影响最小。水肥耦合存在阈值效应, 本试验在相同施肥条件下随着灌溉量的增大叶球横径和纵径均表现出明显的上升趋势, 超过一定范围后逐渐下降; 灌水下限控制在田间持水量的 70%(中水)和 80%(高水)处理后娃娃菜叶球横径和纵径随着施肥量的升高均呈先增加后

减小的趋势, 这与在秋茬娃娃菜上的研究结果相似^[13]。可见, 适宜的水肥耦合模式是保证娃娃菜叶球生长的重要因素, 在不同水肥耦合模式下, 中水中肥处理(灌水下限控制在田间持水量的 70%, 施 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²)较低水高肥(灌水下限控制在田间持水量的 60%, 施 N 380 kg/hm²、P₂O₅ 224 kg/hm²、K₂O 518 kg/hm²)处理娃娃菜叶球横径和纵径分别提高了 18.72%、10.98%, 中心柱长则降低了 31.89%。

光合作用是保证蔬菜生理和生长的前提条件, 合理的水肥调控对提高光合作用具有重要作用^[16]。本研究随着生育期的推进, 娃娃菜叶片净光合速率(P_n)、气孔导度($Cond$)、蒸腾速率(Tr)均呈先增大后减小的变化趋势, 而叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)变化趋势则相反, 呈先减小后增大的变化趋势。全生育期施肥量为 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm² 的施肥条件下增大灌水量, 娃娃菜所有生育期的叶片净光合速率(P_n)、叶片气孔导度($Cond$)和蒸腾速率(Tr)均呈先增大后减小的趋势, 而叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)呈先减小后增大的趋势; 灌水下限控制在田间持水量的 70% 的灌溉水平下, 增加施肥量提高了娃娃菜叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度($Cond$)和蒸腾速率(Tr), 但高肥(施 N 380 kg/hm²、P₂O₅ 224 kg/hm²、K₂O 518 kg/hm²)处理均低于中肥(施 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²)处理; 而叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)的变化则相反。随着施肥量的增加, 莲座期、结球期和采收期大部分叶片净光合速率(P_n)、气孔导度($Cond$)和蒸腾速率(Tr)均呈先升高后降低的趋势, 而叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)先降低后升高。说明合理的水肥耦合可提高娃娃

菜的光合能力, 其中中水中肥处理(灌水下限控制在田间持水量的 70%, 施 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²) 较低水高肥(灌水下限控制在田间持水量的 60%, 施 N 380 kg/hm²、P₂O₅ 224 kg/hm²、K₂O 518 kg/hm²) 处理娃娃菜叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(Cond)、蒸腾速率(Tr)分别提高了 13.10%、27.52%、22.26%, 叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)降低了 8.07%。

作物对水肥的响应是个复杂过程, 单独某些指标并不能全面反映, 而综合评价方法可以取长补短, 通过多方面的数据信息来优化评价结果^[2]。前人采用隶属函数法对向日葵等作物的各项指标进行综合评价, 提出了最优水肥耦合模式^[17]。本研究结果表明, 水肥耦合作用下中水中肥处理(灌水下限控制在田间持水量的 70%, 全生育期施肥量为 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²) 的各项指标的隶属函数平均值高于其他处理, 为本试验条件下最优的水肥组合模式, 这与在秋茬娃娃菜上得到的研究结果相一致^[2, 13, 18]。

灌水量、施肥量及其交互均不同程度影响娃娃菜生长和光合特性, 且施肥量的影响最大, 水肥交互作用的影响次之。水肥耦合模式下, 中水中肥处理(灌水下限控制在田间持水量的 70%, 施 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 195 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²) 较低水高肥(灌水下限控制在田间持水量的 60%, 施 N 380 kg/hm²、P₂O₅ 224 kg/hm²、K₂O 518 kg/hm²) 处理娃娃菜叶球横径和纵径分别提高了 18.72%、10.98%, 中心柱长则降低了 31.89%; 叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率分别提高了 13.10%、27.52%、22.26%, 叶片胞间 CO₂ 浓度降低了 8.07%。

参考文献:

- [1] 马彦霞, 蒯佳琳, 张俊峰, 等. 娃娃菜尾菜堆肥发酵菌筛选[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(5): 470-475.
- [2] 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.
- [3] 蒯佳琳, 侯 栋, 马彦霞, 等. 基于微生物菌剂配施化肥对高原露地娃娃菜的效应研究[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(11): 1063-1067.
- [4] 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.
- [5] LIU X, LI M, GUO P, et al. Integrated optimization of water and fertilizer coupling system under uncertainty[J]. Desalination and Water Treatment, 2018, 126:268-277.
- [6] 王虎兵, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 温室番茄植株养分和光合对水肥耦合的响应及其与产量关系[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1761-1771.
- [7] 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(1): 5456.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 马新超, 周 宇, 刘 青, 等. 水肥耦合对黄沙炉渣复合基质栽培黄瓜光合荧光特性、产量及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(3): 597-608.
- [11] 石培君, 刘洪光, 何新林, 等. 水肥耦合对滴灌矮化密植大枣生理变化及产量影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 177-187.
- [12] 毕丽霏. 灌水下限和施肥量对榆林沙地马铃薯生长和水肥利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [13] 马彦霞, 陈静茹, 王晓巍, 等. 灌水下限和施肥量对膜下滴灌小型大白菜耗水及光合特性的影响[J/OL]. 中国农业科技导报, 1-11(2024-08-12). <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023.0597>.
- [14] 张 腾, 邢英英, 谢 奎, 等. 水肥调控对马铃薯块茎品质及水肥利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(5): 842-850.
- [15] 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.
- [16] 宋修超, 仇美华, 郭德杰, 等. 水肥处理对基质栽培西瓜生长、水分利用效率及光合特性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(2): 284-289.
- [17] 鲁耀泽, 夏玉红, 乌兰其其格, 等. 不同水肥模式对盐渍化农田向日葵生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(7): 36-40; 45.
- [18] 马彦霞, 陈静茹, 王晓巍, 等. 水肥耦合对娃娃菜叶球养分吸收和土壤理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(6): 131-139.