



焦雅楠, 李娟, 王花, 陈书霞. 不同水肥供应对设施基质栽培黄瓜产量、品质和水肥利用率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(8):12-24.
JIAO Yanan, LI Juan, WANG Hua, CHEN Shuxia. Effects of different water and fertilizer supply levels on the yield, quality and water and fertilizer utilization efficiency of cucumber grown on facility substrate culture[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(8):12-24.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.02

不同水肥供应对设施基质栽培黄瓜产量、品质和水肥利用率的影响

焦雅楠 李娟 王花 陈书霞*

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要 为筛选设施基质栽培黄瓜适宜的水肥供应水平,以‘津优35’黄瓜为试材,采用完全随机区组试验设计,以设施内20 cm标准蒸发皿的累计蒸发量(E_p)为依据设置3 008.03(1.2 E_p , W_1)、1 790.96(0.8 E_p , W_2)和1 002.67 m³/hm²(0.4 E_p , W_3)3个总灌水量处理,根据目标产量计算所需施肥量设置高肥(116%施肥量, F_1)、中肥(89%施肥量, F_2)和低肥(62%施肥量, F_3)3个施肥水平,共计9个水肥供应组合,以当地常规灌水量(1.0 E_p)和施肥量(100%施肥量)为对照(CK),测定黄瓜果实的含糖量、VC、可溶性蛋白、脂肪酸、挥发性物质含量、产量及水肥利用率,并通过主成分分析对不同水肥组合的黄瓜产量、品质指标及水肥利用率进行综合评价。结果表明: W_2F_3 、 W_3F_1 和 W_3F_3 的黄瓜产量显著低于CK; W_3F_1 的果实总糖含量最高,为CK的1.27倍, W_2F_2 果实的风味品质最好,其挥发性物质总含量比CK增加165%($P<0.05$);同一灌水量下, F_3 的氮、磷、钾肥利用率均为最高;同一施肥水平, W_3 的水分利用率最高;主成分分析结果显示, W_3F_3 排名第一,其次为 W_2F_2 ,但 W_2F_2 的产量是 W_3F_3 的1.24倍,因此, W_2F_2 为最佳水肥组合。综上,在本试验条件下,滴灌水平为1 790.96 m³/hm²(0.8 E_p , W_2)、生育期施氮肥量为301.66 kg/hm²、磷肥量为95.85 kg/hm²、钾肥量为344.19 kg/hm²(89%施肥量, F_2)为设施基质栽培黄瓜高产优质生产的最佳水肥管理组合。

关键词 黄瓜;设施栽培;产量;品质;水肥利用率;主成分分析

中图分类号 S642.2

文章编号 1007-4333(2025)08-0012-13

文献标志码 A

Effects of different water and fertilizer supply levels on the yield, quality and water and fertilizer utilization efficiency of cucumber grown on facility substrate culture

JIAO Yanan, LI Juan, WANG Hua, CHEN Shuxia*

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract To select the optimal water and fertilizer supply levels for cucumber grown facility substrate culture, a completely randomized block experiment design was adopted. Cucumber cultivar ‘Jinyou 35’ was taken as the study material. Based on the cumulative evaporation (E_p) of the 20 cm standard evaporating dish in the facility, three different total irrigation amounts of 3 008.03 (1.2 E_p , W_1), 1 790.96 (0.8 E_p , W_2) and 1 002.67 m³/hm² (0.4 E_p , W_3) were designed. According to the target yield method, 3 fertilization levels of high fertilizer (116% fertilizer, F_1), medium fertilizer (89% fertilizer, F_2) and low fertilizer (62% fertilizer, F_3) were set, and a total of 9 water and fertilizer supply combinations were set. The local conventional irrigation amount (1.0 E_p) and fertilizer application amount (100% fertilizer) were used as the control (CK). The content of sugar, VC,

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 陕西省重点研发计划(2021ZDLNY03-04)

第一作者: 焦雅楠(ORCID:0009-0008-9759-6977),硕士研究生, E-mail: yananjiao@163.com

通讯作者: 陈书霞(ORCID:0000-0002-3090-847X),教授,主要从事蔬菜生理与生物技术研究, E-mail: shuxiachen@nwsuaf.edu.cn

soluble protein, fatty acids, volatile substances, yield and water and fertilizer utilization ratio of cucumber were determined. The yield, quality index and water and fertilizer utilization ratio of cucumber with different combinations of water and fertilizer were comprehensively evaluated by principal component analysis. The results showed that: The cucumber yields of W_2F_3 , W_3F_1 and W_3F_3 were significantly lower than that of CK; The total sugar content of W_3F_1 fruit was the highest, which was 1.27 times that of CK. The flavor quality of W_2F_2 fruit was the best, and the total volatile substances content of W_2F_2 fruit was increased by 165% compared with CK ($P < 0.05$). Under the same irrigation quantity, the utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer in F_3 were all the highest. At the same fertilization level, W_3 had the highest water utilization rate. The results of the principal component analysis showed that W_3F_3 ranked first, followed by W_2F_2 . Since the yield of W_2F_2 was 1.24 times that of W_3F_3 , W_2F_2 was determined to be the best combination of water and fertilizer. In summary, under the conditions of this experiment, the drip irrigation level was $1\ 790.96\ m^3/hm^2$ ($0.8\ E_p$, W_2), the nitrogen fertilizer amount was $301.66\ kg/hm^2$, the phosphorus fertilizer amount was $95.85\ kg/hm^2$, and the potassium fertilizer amount was $344.19\ kg/hm^2$ (89% fertilizer amount, F_2) is the best combination of water and fertilizer management for high-yield and high-quality production of cucumber through substrate-based cultivation.

Keywords cucumber; facility cultivation; quality; utilization rate of water and fertilizer; principal component analysis

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是一种喜温果菜,也是设施保护地栽培的主要作物^[1]。近年来,随着设施栽培面积的迅速增大,种植模式趋于单一、复种指数较高等特点,同时盲目施肥现象严重,导致设施内水肥过量投入,这不仅引发土壤理化性质发生改变、地力减退、土壤环境恶化及病虫害加剧等连作障碍现象^[2-3],还导致果实产量下降和品质变劣^[4-5],严重影响了园艺产品的经济价值。因此,亟需优化水肥供应体系,筛选更合适的水肥管理条件,以提高黄瓜的产量、品质及水肥利用率。

目前,已有许多关于提高园艺作物产量、品质等的水肥施用研究报道。韦泽秀等^[6]发现灌溉量和施肥量对日光温室黄瓜产量、水分利用率有显著影响,产量随灌溉量和施肥量的增加而增加,WUE与灌水量呈负相关。杨俊华等^[7]综合黄瓜品质和产量筛选出灌水量为 $3\ 600\ m^3/hm^2$ 、施肥量为 $N\ 525\ kg/hm^2 + P_2O_5\ 210\ kg/hm^2 + K_2O\ 546\ kg/hm^2$ 的水肥组合是温室沙地黄瓜栽培的最优水肥管理组合。刘冬楠等^[8]研究发现,随着施肥量的增加桃果实挥发性物质总含量较CK有不同程度的提升,施肥量为 $800\ g/株$ 时挥发性物质总含量达到最大值。施苏齐等^[9]研究表明,灌水量为 $210\ m^3/hm^2$,施肥量为 $300\ kg/hm^2$ 时,西瓜的产量和口感品质显著改善,水肥利用率显著增加。王丽学等^[10]研究发现,黄瓜产量随着不同灌水下限的提升而显著增加,随着施氮量和施钾量的增加呈现先上升后下降的趋势,黄瓜灌水下限为田间持水量的85%、施肥量为 $381.3\ kg/hm^2$ 、施钾量为 $600.7\ kg/hm^2$ 时产量

最高。杜殿文等^[11]通过设置相同施肥量下不同配比的水、有机肥用量占比的16种组合,发现有机肥占比相较于灌水量对果实品质会产生更大的影响。马新超等^[12]研究表明, $0.75\ E_p$ 的灌水量下,施入较高的氮钾肥和较低的磷肥有利于黄瓜单果重的提升,适当的降低灌水量会提高果实的产量和品质。

目前,虽然对黄瓜的水肥已有一些研究,但有关水肥供应影响设施基质栽培黄瓜的产量、品质(包括风味品质)及水肥利用率方面的研究鲜见报道。本试验以‘津优35’黄瓜为材料,通过设置设施基质栽培黄瓜的不同水肥处理,并测定黄瓜的VC、可溶性蛋白、糖分、脂肪酸、挥发性物质含量、产量和水肥利用率,采用主成分分析方法综合分析不同水肥处理对黄瓜产量、品质和水肥利用率的影响,旨在筛选出设施基质栽培黄瓜较优的水肥处理组合,以为设施保护地基质栽培黄瓜实现优质高产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄瓜品种为陕西省杨凌市保护地主栽品种‘津优35’,由杨凌裕丰种业公司提供;试验采用的肥料:尿素($N\ 46.4\ g/100\ g$)、过磷酸钙($P_2O_5\ 14\ g/100\ g$)和硫酸钾($K_2O\ 52\ g/100\ g$),基质(商用基质)和腐熟牛粪购自当地农资店,基质生产厂家为山东省聊城市莘县鲁源育苗基质有限公司。

试验于2021年3月16日(定植)—7月3日(拉秧)在陕西杨凌揉谷设施农业基地($34^{\circ}28'N$, $108^{\circ}07'E$, 海拔 $498.68\ m$)大跨度非对称内保温双层塑料薄膜覆

盖大棚(长 80 m,宽 20 m)内进行。试验田采用水泥栽培槽栽培,由基质与有机肥(腐熟牛粪)质量比按 1:2 混合后施入,其 pH 6.27、EC 为 0.59 mS/cm、全氮 11.76 mg/g、全磷 2.87 mg/g、全钾 9.21 mg/g、碱解氮 65 mg/kg、速效磷 10.5 mg/kg、速效钾 103.5 mg/kg。栽培槽长 7.2 m,宽 0.9 m,深 0.4 m,槽间过道宽 0.3 m。采用 72 孔穴盘在棚内进行育苗,幼苗长至两叶一心时进行定植,试验采用水肥一体化滴灌方式实施,滴灌流速为 1.6 L/h。

1.2 试验设计

设置灌水量和施肥量为试验因子。设置高水

($1.2 E_p, W_1$)、中水($0.8 E_p, W_2$)和低水($0.4 E_p, W_3$) 3 个灌水量,以设施内 20 cm 标准蒸发皿的累计蒸发量(E_p)为依据,不同生长时期灌水量根据下列公式进行计算:

$$W=K_{cp}\times A\times E_p$$

式中: W ,小区灌水量,L; K_{cp} ,蒸发皿系数,本试验中黄瓜苗期 0.56、开花坐果期 0.61、初果期 1.40、盛果期 1.03^[13]; A ,小区面积,m²; E_p ,2 次灌水间隔内的 20 cm 蒸发皿累积蒸发量,mm;灌水间隔为 1~3 d,具体依据天气及棚内蒸发情况进行调整;分别以 1.2、0.8、0.4 E_p 计算 W_1 、 W_2 、 W_3 的具体灌水量,见表 1。

表 1 累积灌溉次数和灌溉量

Table 1 The cumulative irrigation frequency and irrigation volume

日期 Date	灌溉次数 Irrigation number	累积灌溉量/(m ³ /hm ²) Irrigation amount			
		$W_1(1.2 E_p)$	$W_2(0.8 E_p)$	$W_3(0.4 E_p)$	CK ($1.0 E_p$)
04-01—04-30	9	447.28	298.19	149.09	372.73
05-01—05-31	9	955.72	422.75	318.57	796.43
06-01—06-24	9	1 605.03	1 070.02	535.01	1 337.53
合计 Total	27	3 008.03	1 790.96	1 002.67	2 506.69

施肥量也设置 3 个水平分别为高肥(F_1)、中肥(F_2)和低肥(F_3),具体施肥量见表 2, F_2 施肥量以 10 000 kg/667 m²(150 000 kg/hm²)为目标产量计算需氮量^[14-15],

参考 N、P₂O₅ 和 K₂O 的质量比为 1.00:0.32:1.14 设置 P₂O₅ 和 K₂O 的施用量^[16-17], F_1 施肥量为 F_2 施肥量的 1.30 倍, F_3 施肥量为 F_2 施肥量的 0.70 倍。

表 2 不同施肥水平的 N、P、K 的施肥量

Table 2 Fertilizing amount of N, P and K at different fertilization levels

施肥量 Fertilizing amount	F_1	F_2	F_3	CK
N	392.16	301.66	211.16	285.26
P ₂ O ₅	124.65	95.85	67.12	140.59
K ₂ O	447.45	344.19	240.93	406.67

注:CK, F_1 , F_2 , F_3 分别为 100%(对照), 116%(高肥), 89%(中肥), 62% 施肥量(低肥)。下同。
Note: CK, F_1 , F_2 and F_3 represent 100% (CK), 116% (high fertilizer), 89% (medium fertilizer), and 62% (low fertilizer) of the fertilizer application rate, respectively. The same below.

采用完全随机区组试验设计,灌溉量和施肥量组合共 9 个处理,以当地灌水量和施肥量为对照(CK)^[18],每个处理 3 次重复,小区面积为 25.2 m²,长 7.0 m×宽 3.6 m,双行种植,株行距为 40 cm×30 cm,各处理 3 次重复共定植 120 株。黄瓜定植前,将氮肥总量的 1/2、磷肥用量的全部和钾肥用量的 1/2 作为基肥施入,剩余的氮肥和钾肥分别在根

瓜期(15%)、腰瓜期(15%)、盛果期(20%)分 3 次通过滴灌系统施入^[19]。移栽后各处理进行统一管理,于缓苗期(约 15 d)后进行灌溉处理。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 产量测定

测产区内植株挂牌标记,于根瓜达到商品成熟期时采摘,记录每次采收重量,统计单株产量,计算

测产区面积内产量。

1.3.2 果实取样

于盛瓜期选取第14—16节位当日开放的雌花进行挂牌标记,记为第0天果实,上午9:00—10:00进行取样,每处理3次重复,选取生长均匀无病虫害的第10天果实共9根,用冰盒立即带回实验室切取上、中、下部位各一小段用液氮快速冷冻,粉碎机粉碎混匀放置-80℃冰箱保存,用于果实VC、可溶性蛋白、糖、脂肪酸和香气挥发性物质含量的测定。

1.3.3 品质测定

VC、可溶性蛋白含量分别采用钼蓝比色法^[20]、考马斯亮蓝G-250法^[20]测定。加入0.1 mL Ribitol核糖醇(4 mg/mL)内标溶液,参考杨静静^[21]方法进行前处理,使用西北农林科技大学园艺学院公共实验室的气质联用仪(ISQ & TRACE ISQ, Thermo Fisher Scientific 公司)进行糖分测定。

取0.3 g黄瓜果实样品于10 mL顶空瓶中,参照Sun等^[22]的方法测定黄瓜脂肪酸含量,使用美国Agilent Technologies Inc. 公司的气相色谱仪(7890B)进行脂肪酸含量的测定。香气挥发性物质的测定参照郝丽宁等^[23]的方法并加以改进:称取5 g黄瓜果实样品和1.5 g NaCl于10 mL萃取瓶中,加入10 μL内标溶液,进行萃取,使用日本Shimadzu Corporation公司的气相色谱质谱联用仪(GCMS-QP2010 SE)测定果实香气挥发性物质成分。

1.3.4 水肥利用率的测定

于盛瓜期对黄瓜植株和根系土壤取样,进行预处理,然后对元素含量进行测定,具体消解、元素测定方法及水分利用率和氮、磷、钾肥利用率计算方法参考毛丽萍等^[1]、吕青海^[24]的测定及计算方法,

具体公式为:

氮肥利用率(NUE)=植株氮吸收量/施氮量×100%;

植株氮吸收量=植株地上部重量×植株地上部N含量

水分利用率(WUE)=产量/耗水量×100%

耗水量=灌水量-试验初期和末期土壤水分变化量

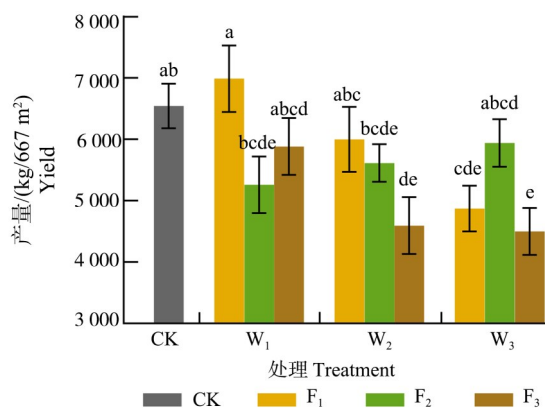
1.4 统计分析

采用SPSS 25.0软件进行数据分析,Duncan法对数据进行多重显著性比较。所有图表均采用GraphPad、Origin 2024制作。

2 结果与分析

2.1 不同水肥供应水平对黄瓜产量的影响

由图1可知,不同水肥供应水平下黄瓜产量在4 503.49~6 992.38 kg/667 m²,其中高水高肥处理(W₁F₁)下产量最高,为6 992.38 kg/667 m²,低水低肥处理(W₃F₃)产量最低,为4 503.49 kg/667 m²;W₂F₃、W₃F₁和W₃F₃的黄瓜产量分别比CK降低29.80%、25.56%、31.22%($P<0.01$)。在中高水量下,随施肥量减少,产量也逐步下降。



不同小写字母表示0.05水平下差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

图1 不同水肥供应水平下黄瓜的产量

Fig. 1 Yield of cucumber under different water and fertilizer supply levels

2.2 不同水肥供应水平对黄瓜营养品质的影响

由表3可知,9个水肥供应水平的黄瓜果实可溶性蛋白、VC含量与CK差异均不显著。9个处理的黄瓜果实可溶性蛋白含量均低于CK;W₂F₁的VC含量最高,为0.71 mg/g,是CK的1.51倍,低水高肥处理(W₃F₁)的VC含量最低,为0.38 mg/g,比CK低19.15%。

2.3 不同水肥供应水平对黄瓜果实风味品质的影响

2.3.1 对黄瓜果实糖分含量的影响

由图2可知,9个水肥供应水平的黄瓜果实内葡萄糖、蔗糖和可溶性总糖含量均存在显著差异。相同灌水量下,高(F₁)、中肥(F₂)黄瓜的葡萄糖和总糖含量均显著高于低肥(F₃);相同施肥水平下,各灌水量间无显著差异。黄瓜果实内果糖、葡萄糖和总糖含量最高的均为W₃F₁,分别较CK高24.96%、30.85%和27.24%

表3 不同水肥供应水平下黄瓜的营养品质指标

Table 3 Nutritional quality indexes of cucumber under different water and fertilizer supply levels mg/g					
处理 Treatment	可溶性蛋白 Soluble protein	VC	处理 Treatment	可溶性蛋白 Soluble protein	VC
CK	6.99±0.81 ^a	0.47±0.03 ^{ab}	W ₂ F ₂	4.78±1.16 ^a	0.51±0.07 ^{ab}
W ₁ F ₁	5.60±0.60 ^a	0.56±0.05 ^{ab}	W ₂ F ₃	4.97±0.15 ^a	0.53±0.02 ^{ab}
W ₁ F ₂	5.67±0.96 ^a	0.59±0.28 ^{ab}	W ₃ F ₁	5.37±0.56 ^a	0.38±0.02 ^b
W ₁ F ₃	5.30±1.23 ^a	0.47±0.02 ^{ab}	W ₃ F ₂	5.15±0.62 ^a	0.60±0.02 ^{ab}
W ₂ F ₁	4.98±1.60 ^a	0.71±0.28 ^a	W ₃ F ₃	5.07±0.66 ^a	0.49±0.07 ^{ab}

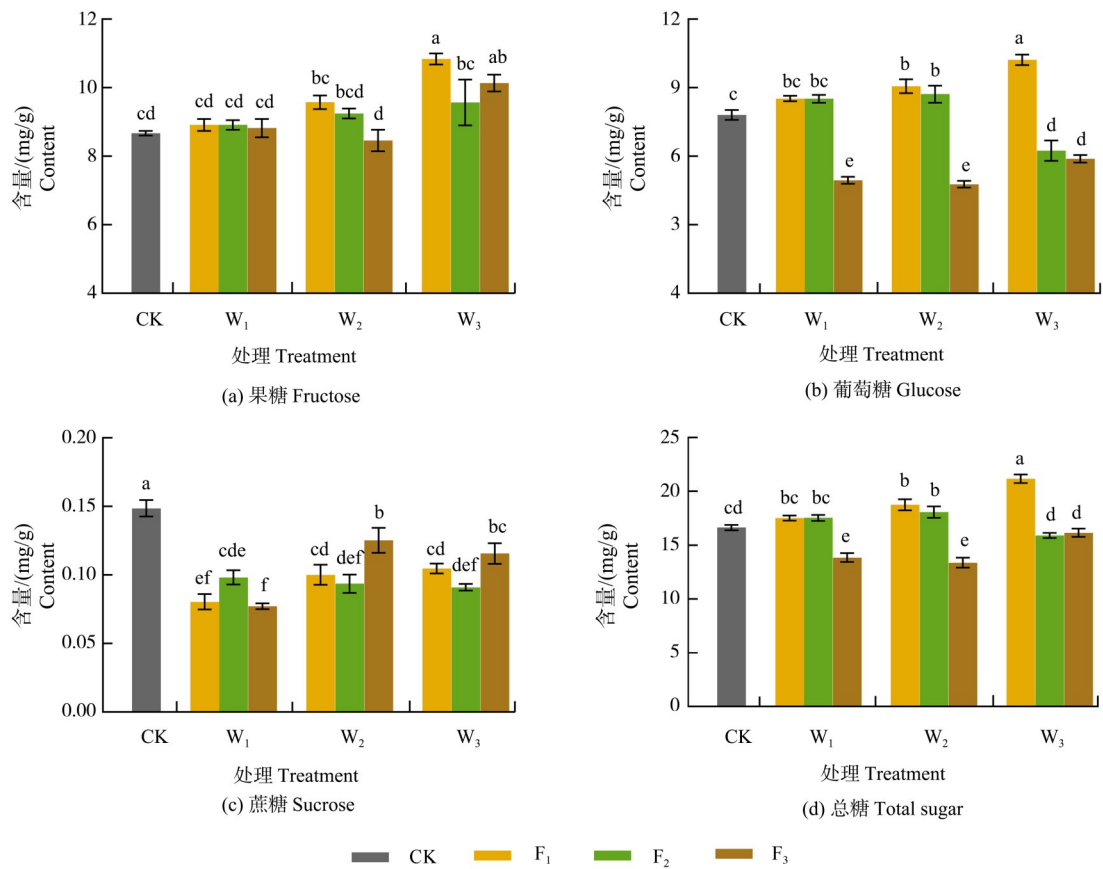


图2 不同水肥供应水平下黄瓜果实的糖含量

Fig. 2 Sugar content of cucumber fruit under different water and fertilizer supply levels

($P<0.01$),中水低肥处理(W₂F₃)总糖含量最低,比CK低19.68%($P<0.05$)。可见,低水高肥(W₃F₁)更有利于提高黄瓜果实果糖、葡萄糖和可溶性总糖含量。

2.3.2 对黄瓜果实不饱和脂肪酸含量的影响

由图3可知,9个水肥供应水平的黄瓜果实亚麻酸含量为303.55~478.77 μg/g、亚油酸含量为169.58~249.75 μg/g。W₂F₃(中水低肥)处理的亚油酸、亚麻酸含量均为最高,分别为CK的1.25、1.26倍;W₁F₁(高水高肥)均为最低,较CK分别低

15.09%和19.89%($P>0.05$)。W₂F₂的亚麻酸/亚油酸比值最高,比CK高4.66%($P<0.05$),而W₁F₃的比值最低,较CK低8.82%($P<0.05$)。可见,W₂F₃、W₂F₂更有利于促进黄瓜果实不饱和脂肪酸的合成和积累。

2.3.3 对黄瓜果实挥发性物质种类和含量的影响

由图4可知,检测到各处理黄瓜果实的挥发性物质共5大类,包括醛、醇、酮、烃和其他类。从种类上看,各处理醛类物质数量最多,不同处理醛类和烃类数量

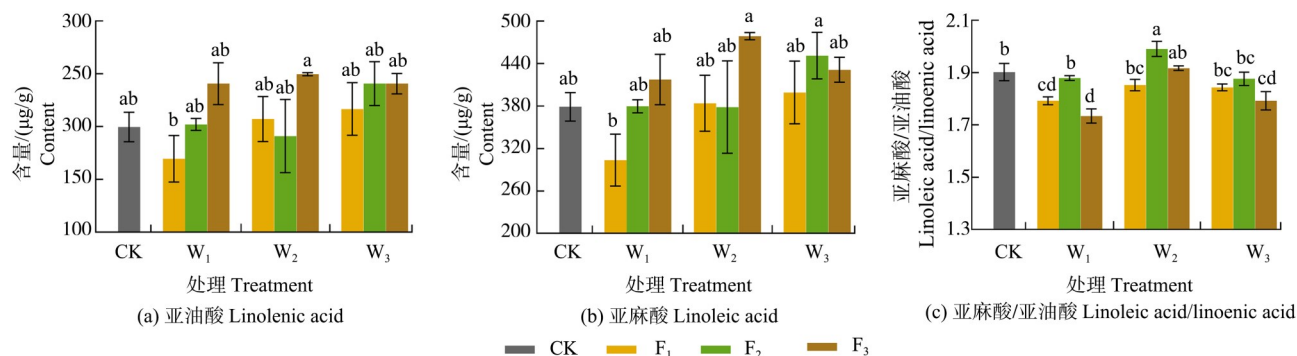


图 3 不同水肥供应水平下黄瓜的不饱和脂肪酸含量

Fig. 3 Unsaturated fatty acid contents of cucumber under different water and fertilizer supply levels

与CK相比均有增加,其中, W₂F₂和 W₁F₃增加最多且增加数量相同,分别增加4和7种。从含量上看,醛类

物质含量最高,醇类物质含量次之, W₂F₂醛类物质含量最高,为CK的3.12倍, W₃F₃次之,是CK的2.85倍。

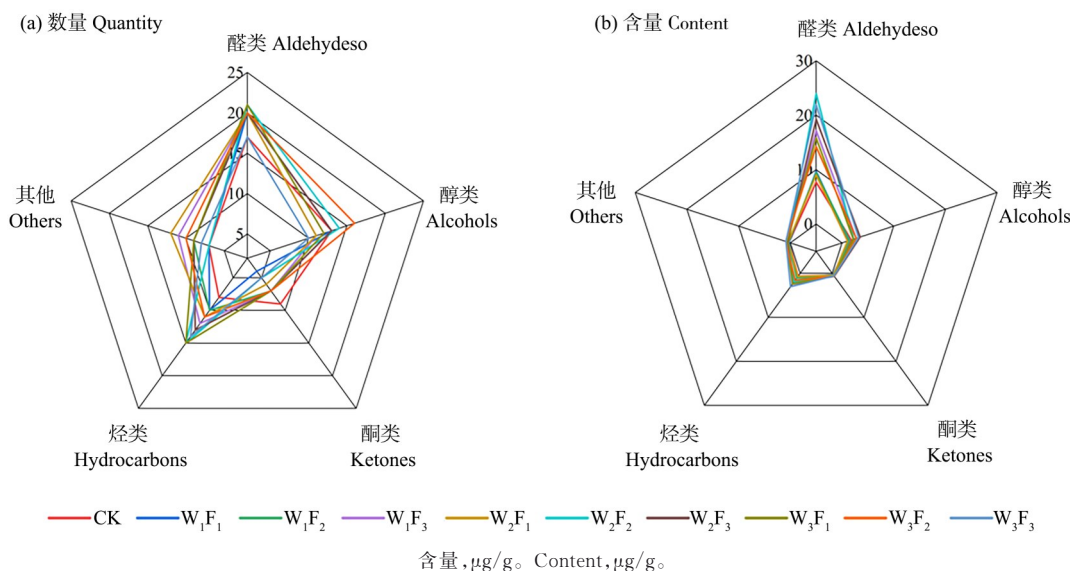


图 4 不同水肥供应水平下黄瓜果实的挥发性物质数量(a)和含量(b)

Fig. 4 Quantity (a) and content (b) of volatile substances in cucumber fruit under different water and fertilizer supply levels

2.3.4 对黄瓜果实挥发性物质总含量的影响

由图5可知,9个水肥供应水平的黄瓜果实香气挥发性物质总含量由高到低为 W₂F₂ > W₃F₃ > W₃F₂ > W₃F₁ > W₁F₃ > W₂F₃ > W₂F₁ > W₁F₁ > W₁F₂ > CK; W₂F₂ 挥发性物质总含量为CK的2.65倍, W₃F₃为CK的2.59倍。由此可见,春季大棚中高水高肥模式并不能促进黄瓜挥发性物质的合成,而中、低水肥供应量均可显著增加黄瓜果实的挥发性物质总含量,从而增加了果实的香气。

2.3.5 对黄瓜果实香气C6、C9类化合物影响

由图6可知,不同水肥供应水平的C6化合物总量在 W₁和 W₂水平下均随施肥量减少而增加,

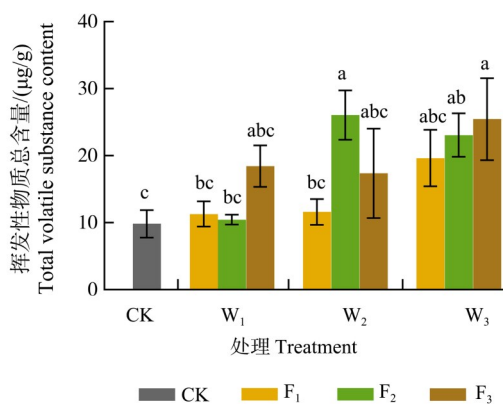


图 5 不同水肥供应水平下黄瓜果实挥发性物质总含量
Fig. 5 Total content of volatile substances in cucumber fruit under different water and fertilizer supply levels

其中 W_3F_2 的 C6 化合物总含量为 CK 的 1.83 倍, 含量最高, 各处理的 C6 总含量与 CK 无显著差异。不同水分灌溉量水平, 随施肥量的增加, C9 化合物总量变化规律不同, 其中 W_2F_2 、 W_3F_3 的 C9

化合物总量为 CK 的 3.68 和 3.22 倍; W_1F_2 的 C9 化合物总含量最低, 与 CK 含量持平。综合 C6、C9 化合物总和, W_2F_2 更有利于促进黄瓜果实风味物质的合成。

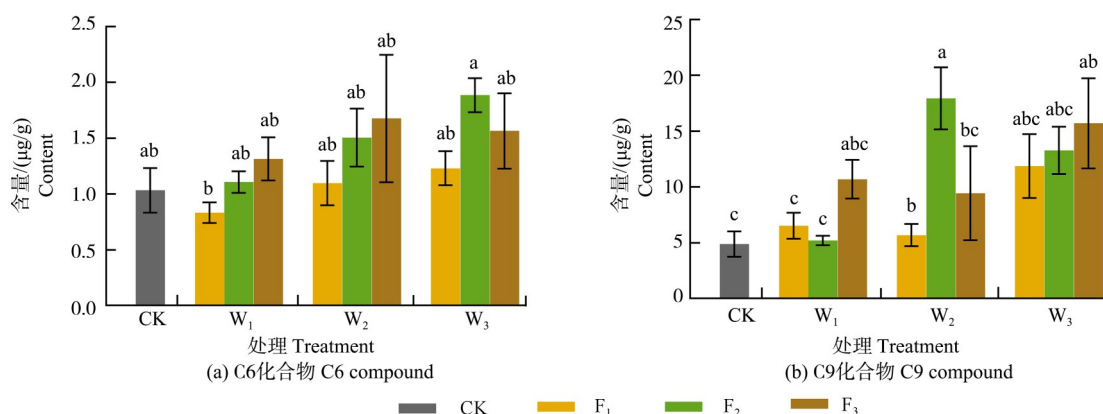


图6 不同水肥供应水平下黄瓜果实的 C6(a)、C9(b) 化合物含量

Fig. 6 The content of C6 (a) and C9 (b) compounds in cucumber fruits under different water and fertilizer supply levels

2.3.6 对黄瓜果实香气特征效应化合物的影响

由图7可知, W_2F_2 的(E,Z)-2,6-壬二烯醛含量最高, 比 CK 高 368% ($P < 0.01$), W_3F_3 次之, 比 CK

增加 262.32% ($P < 0.05$); W_3F_3 的(Z)-6-壬烯醛含量最高, 比 CK 高 211.67% ($P < 0.05$); W_3F_2 的 6-壬烯-1-醇含量最高, 为 CK 的 2.08 倍。

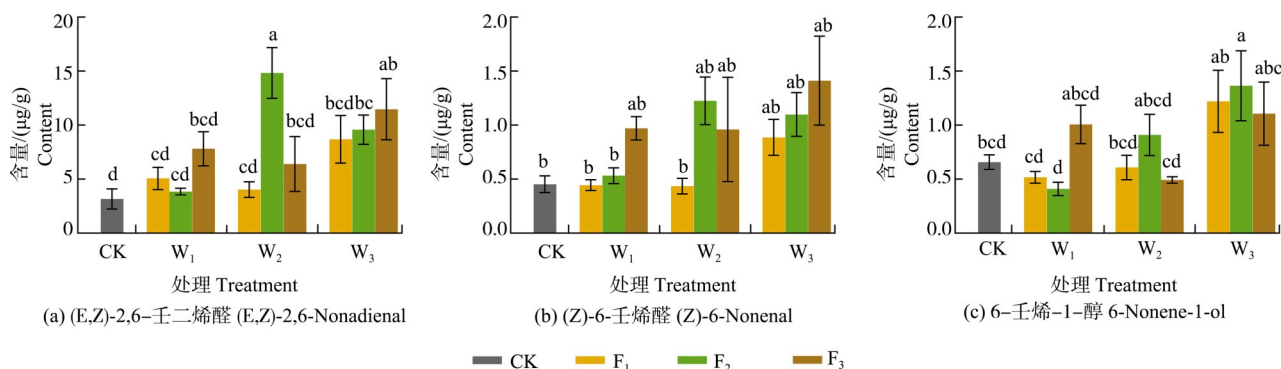


图7 不同水肥供应水平下黄瓜果实特征效应化合物的含量

Fig. 7 Content of characteristic effect compounds in cucumber fruits under different water and fertilizer supply levels

2.4 不同水肥供应对黄瓜水肥利用率的影响

由表4可知, W_3F_2 的水分利用率最高, 较 CK 增加 138.68% ($P < 0.05$), W_1F_2 的水分利用率 (WUE) 最低, 比 CK 低 29.56% ($P > 0.05$)。 W_3F_3 处理的氮肥利用率最高, 为 21.94%, 是 CK 的 2.42 倍; W_1F_3 的磷、钾肥利用率最高, 为 CK 的 3.14 和 2.75 倍, W_3F_1 最低, 比 CK 低 6.59% 和 15.97% ($P > 0.05$)。

2.5 不同水肥供应下黄瓜产量、品质及水肥利用率的相关性

由图8可知, 醛类挥发性物质与醇类、酮类挥发性物质、氮肥利用率 (NUE) 均呈显著正相关, 与 C6、C9 化合物总量和 (E,Z)-2,6-壬二烯醛呈极显著正相关。醇类挥发性物质与酮类物质呈显著正相关, 与 C6 挥发性物质总量、NUE 呈极显著正相关, 与产量、葡萄糖含量均呈显著负相关。酮类物质与 C6 挥发性物质总量

表 4 不同水肥供应水平下的黄瓜水肥利用率

Table 4 Water and fertilizer utilization of cucumber under different water and fertilizer supply levels

处理 Treatment	氮肥利用率/% NUE	磷肥利用率/% PUE	钾肥利用率/% KUE	水分利用率/(kg/m ³) WUE
CK	9.05±1.08 ^d	4.25±0.19 ^d	10.71±1.54 ^{de}	69.52±10.21 ^{cd}
W ₁ F ₁	12.40±2.50 ^{cd}	6.51±1.37 ^{bcd}	15.46±0.65 ^{bcd}	65.07±13.34 ^{cd}
W ₁ F ₂	12.92±1.23 ^{bcd}	9.30±0.94 ^{abc}	20.35±4.79 ^{bc}	48.97±12.08 ^d
W ₁ F ₃	20.78±5.43 ^{ab}	13.36±3.90 ^a	29.49±7.15 ^a	54.78±12.15 ^d
W ₂ F ₁	8.33±2.63 ^d	4.79±1.46 ^{cd}	12.40±1.70 ^{cde}	83.77±19.58 ^c
W ₂ F ₂	13.61±4.16 ^{bcd}	8.00±2.38 ^{bcd}	20.50±3.25 ^b	78.39±12.08 ^c
W ₂ F ₃	18.95±1.90 ^{bc}	10.18±1.33 ^{ab}	28.30±3.93 ^a	64.15±17.14 ^{cd}
W ₃ F ₁	8.63±3.04 ^{cd}	3.97±1.31 ^d	9.00±2.66 ^e	136.07±29.46 ^b
W ₃ F ₂	14.03±1.59 ^{bcd}	7.16±0.40 ^{bcd}	18.21±0.89 ^{bcd}	165.93±30.41 ^a
W ₃ F ₃	21.94±9.75 ^a	8.32±3.99 ^{ab}	17.04±2.49 ^{bcd}	125.72±30.13 ^b

呈极显著正相关,与产量呈极显著负相关。果糖与WUE呈极显著正相关。葡萄糖与NUE、钾肥利用率(KUE)呈显著负相关,与磷肥利用率(PUE)呈极显著负相关。产量与C6挥发性物质总量呈极显著负相关,C6挥发

性物质总量与C9挥发性物质总量、NUE均呈显著正相关。C9挥发性物质总量与(E,Z)-2,6-壬二烯醛呈极显著正相关。NUE与PUE呈极显著正相关,PUE与KUE呈极显著正相关。

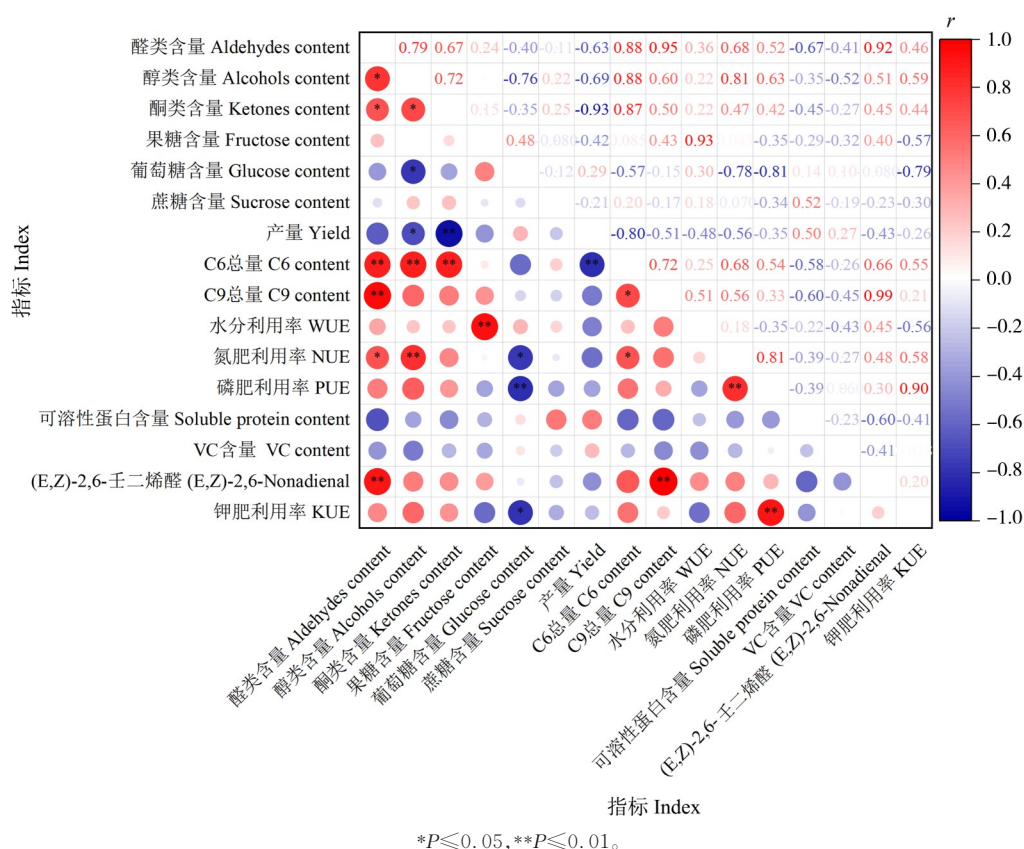


图 8 不同水肥供应水平下黄瓜产量、品质与水肥利用率的相关性

Fig. 8 The correlation of yield, quality and water and fertilizer utilization rate of cucumber under different water and fertilizer supply levels

2.6 基于主成分分析法的不同水肥供应模式综合评价

由表5可知,对不同水肥处理下的黄瓜果实产量、品质及水肥利用率进行主成分分析,从16个单项指标

中提取3个主成分因子,累计方差贡献率达到78.226%,第一主成分特征值为7.254,方差贡献率为45.335%;第二主成分特征值为3.335,方差贡献率为20.842%;第三主成分特征值为1.928,方差贡献率为12.049%。

表5 3个主成分的特征值、方差贡献率及累计方差贡献率

Table 5 Eigenvalues, variance contribution rates, and cumulative variance contribution rates of the three principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate
1	7.254	45.335	45.335
2	3.335	20.842	66.176
3	1.928	12.049	78.226

由表6可知,由主成分得分及相应的方差贡献率得到综合评价函数: $D_n=0.453PC_1+0.208PC_2+0.120PC_3$,各处理综合得分由高到低为: $W_3F_3>W_2F_2>$

$W_3F_2>W_2F_3>W_3F_1>W_1F_3>W_1F_2>W_2F_1>CK>W_1F_1$ 。虽然 W_3F_3 的综合得分最高,但由于其产量比 W_2F_2 低19.84%,因此推荐 W_2F_2 为最佳的水肥供应组合。

表6 主成分因子得分值以及综合得分

Table 6 Principal component factor scores and comprehensive scores

处理 Treatment	PC ₁	PC ₂	PC ₃	综合分值(D_n) Integrated score	排序 Rank
W_3F_3	3.57	0.85	0.77	1.89	1
W_2F_2	2.03	0.98	-1.38	0.96	2
W_3F_2	1.70	1.10	-0.47	0.94	3
W_2F_3	2.70	-2.16	1.34	0.94	4
W_3F_1	-0.15	3.60	0.72	0.77	5
W_1F_3	1.64	-2.63	-0.77	0.10	6
W_1F_2	-1.59	-1.28	-0.16	-1.01	7
W_2F_1	-2.95	0.58	-1.40	-1.38	8
CK	-3.75	-0.33	2.77	-1.44	9
W_1F_1	-3.20	-0.70	-1.44	-1.77	10

3 讨论

3.1 不同水肥供应水平对黄瓜产量的影响

黄瓜的产量是农户和农业技术人员非常关心的指标^[11]。尽管消费者一直希望获得更高的产量和品质,但大多数研究表明,品质最佳时其产量不一定最高,在实际生产过程中允许一定的产量下降但品质更优的生产方式^[25],例如水果黄瓜‘中农脆玉3号’的产量低于华北密刺型黄瓜品种‘富农四号’,但‘中农脆玉3号’的品质更高^[26],且市场上水

果黄瓜的价格普遍较高。与王丽学等^[10]和李春辉等^[27]的研究结果一致,最佳的品质和产量需要不同的施肥比例,产量最高的处理其品质不一定是最佳的。本研究中,虽然仅有 W_1F_1 的产量高于CK,较CK增加6.8%($P>0.05$),但9个水肥供应水平的黄瓜果实风味品质均高于CK,其中 W_2F_2 、 W_3F_2 和 W_3F_3 的风味品质显著高于CK,挥发性物质总含量为CK的2.65、2.35和2.59倍;主成分分析显示 W_3F_3 、 W_2F_2 综合得分较高,但由于 W_2F_2 的产量为 W_3F_3 产量的1.24倍,所以 W_2F_2 为更优处理组合。

低水量灌溉(W_3)情况下,随着施肥量增加, W_3F_1 的产量显著低于CK,这可能是因为高肥低水会对黄瓜生长发育产生不利影响^[28],不利于果实生长,还需进一步试验验证。

3.2 不同水肥供应水平对黄瓜果实品质的影响

糖、VC、可溶性蛋白、挥发性物质均是评价果实品质的重要指标^[29-31]。9个水肥供应水平的黄瓜果实的果糖、葡萄糖、蔗糖和可溶性总糖含量均存在显著差异,果实中蔗糖含量最低,且在果实中未发现水苏糖,这与Handle等^[32]研究结果一致。本试验发现,在同一施肥条件下,单一糖和总糖含量随灌水量增加基本呈现先升高后降低或持续降低的趋势,这说明灌水量较多时不利于可溶性糖的积累^[33]。本研究中不同水肥供应对可溶性蛋白和VC含量影响不显著,这可能是因为其含量和稳定性易受光照强度和温度的影响^[34]。

C6、C9醛类香气物质的产生是以植物体内游离的脂肪酸(即亚麻酸和亚油酸)为主要底物^[35],本试验中,各处理黄瓜的亚麻酸与亚油酸含量差异不显著,随着施肥量的增加单一不饱和脂肪酸含量会降低,与李为萍等^[36]结论一致,氮肥施用量增加不利于不饱和脂肪酸的形成。黄瓜特征风味物质的含量及亚麻酸/亚油酸的比值是影响香气成分的限制因素^[37],在本试验中,中水中肥处理(W_2F_2)的黄瓜亚麻酸/亚油酸比值最高,且挥发性物质总含量也最高,与张然然等^[38]研究结果一致。本试验不同水肥处理的香气挥发性物质含量差异显著($P < 0.05$),就总量来看,中水中肥(W_2F_2)和低水低肥(W_3F_3)条件下香气总量及C6、C9化合物含量均较高,而 W_1F_1 (高水高肥)、 W_1F_2 (高水中肥)和 W_2F_1 (中水高肥)的香气总量及C6、C9化合物含量均较低,特征效应化合物(E,Z)-2,6-壬二烯醛是黄瓜果实清香味的关键成分^[23],本试验中 W_2F_2 的黄瓜果实中(E,Z)-2,6-壬二烯醛含量显著高于CK,说明适当的灌水量施肥量对果实挥发性物质的产生和积累有积极的影响,但超过一定的供应量则会产生负效应,这与蔡东升等^[39]研究结果一致。

3.3 不同水肥供应水平对黄瓜水肥利用率的影响

合理的水肥管理不仅可以提高果实的品质,也能提高果实的水肥利用率^[40]。本研究结果表明,过量的灌水施肥会降低水分利用率,同一施肥量水平下,灌水量降低时水分利用率增加,与Erdem等^[41]

和岳文俊等^[40]研究结果一致,同一灌水量下,氮磷钾肥的利用率均随施肥量减少而增加,所以适当的降低灌水量和施肥量有利于增加水肥利用率,但在实际生产中,不仅要关注水肥利用率的提高,更应以综合提升产量和品质为导向,才有利于实现优质高效生产。

4 结 论

不同水肥供应水平下,从产量方面考虑,在中高灌水量(W_1 和 W_2)时,产量随施肥量下降而降低;从品质方面考虑,同一施肥量,高灌水量(W_1)下果实品质最差;从水肥利用率方面考虑,适当的降低灌水量和施肥量有利于增加水肥利用率。综合评价表明, W_3F_3 得分最高、 W_2F_2 次之,但由于 W_2F_2 的产量是 W_3F_3 产量的1.24倍,所以推荐 W_2F_2 为设施保护地基质栽培黄瓜的最佳水肥管理组合,即滴灌水平为 $1\,790.96\text{ m}^3/\text{hm}^2(0.8\,E_p, W_2)$,生育期施氮肥量为 $301.66\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、磷肥量为 $95.85\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、钾肥量为 $344.19\text{ kg}/\text{hm}^2(89\%\text{ 施肥量}, F_2)$ 。

参考文献 References

- [1] 毛丽萍, 赵婧, 仪泽会, 王立革, 焦晓燕. 不同种植方式和亏缺灌溉对设施黄瓜生理特性及WUE的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 17-24
Mao L P, Zhao J, Yi Z H, Wang L G, Jiao X Y. The effects of planting patterns and deficit irrigation on photosynthesis and water use efficiency of greenhouse cucumber[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 17-24 (in Chinese)
- [2] 王爽, 郑世伟, 李笑, 张一迪, 吴桐, 富宏丹, 孙周平. 日光温室黄瓜长期连作自毒物质累积与土壤肥力因子的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 784-792
Wang S, Zheng S W, Li X, Zhang Y D, Wu T, Fu H D, Sun Z P. Relationship between accumulation of autotoxins and soil fertility factors under long-term continuous cropping of cucumber in solar greenhouse [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 784-792 (in Chinese)
- [3] 刘衍, 郭利娜, 贾羽旋, 夏新月, 李彤, 段碧华, 石生伟. 北京市设施蔬菜施肥状况及减施潜力分析[J]. 中国蔬菜, 2020, (9): 71-81
Liu K, Guo L N, Jia Y X, Xia X Y, Li T, Duan B H, Shi S W. Analysis on fertilization status and potential of fertilizer reduction in greenhouse vegetable fields in Beijing[J]. *China Vegetables*, 2020, (9): 71-81 (in Chinese)
- [4] 李红峥, 曹红霞, 郭莉杰, 吴宣毅. 沟灌方式和灌水量对温室番茄综合品质与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4179-4191
Li H Z, Cao H X, Guo L J, Wu X Y. Effect of furrow irrigation pattern and irrigation amount on comprehensive quality and yield of greenhouse tomato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4179-4191 (in Chinese)

- Chinese)
- [5] 李子双, 王薇, 张世文, 贺洪军, 赵同凯, 黄元仿. 氮磷与硅钙肥配施对辣椒产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 458-466
Li Z S, Wang W, Zhang S W, He H J, Zhao T K, Huang Y F. Effect of nitrogen, phosphorus and silicon calcium fertilizer on yield and quality of pepper[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(2): 458-466 (in Chinese)
- [6] 韦泽秀, 梁银丽, 山田智, 周茂娟, 贺丽娜, 高静. 水肥水平对日光温室黄瓜产量及品质的影响[J]. 青岛农业大学学报:自然科学版, 2008, 25(4): 268-271
Wei Z X, Liang Y L, Shan T Z, Zhou M J, He L N, Gao J. Effect of different soil water-fertilizer supplying on the yield and fruit quality to cucumber in solar greenhouse [J]. *Journal of Qingdao Agricultural University:Natural Science*, 2008, 25(4): 268-271 (in Chinese)
- [7] 杨俊华, 燕飞, 孙丽丽, 周小婷, 胡晓辉, 邹志荣. 不同水肥组合对温室沙地栽培黄瓜产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 111-118
Yang J H, Yan F, Sun L L, Zhou X T, Hu X H, Zou Z R. Effects of different water-fertilizer combinations on yield and quality of greenhouse cucumber cultivated in sand[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2014, 42(12): 111-118 (in Chinese)
- [8] 刘冬楠, 葛瑶, 杜宏儒, 王健强, 肖啸, 申艳红. 水溶肥不同施用量对桃生长发育及果实品质的影响[J]. 中国果树, 2024(10): 46-54
Liu D N, Ge Y, Du H R, Wang J Q, Xiao X, Shen Y H. Effects of different application amount of water-soluble fertilizer on peach growth and development and fruit quality[J]. *China Fruits*, 2024(10): 46-54 (in Chinese)
- [9] 施苏齐, 郑淑欣, 焦炳忠, 李金泽. 水肥耦合对硒砂瓜产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(20): 39-44
Shi S Q, Zheng S X, Jiao B Z, Li J Z. The effect of water fertilizer coupling on the yield and quality of selenium sand melon[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(20): 39-44 (in Chinese)
- [10] 王丽学, 李振华, 姜熙, 孟维忠, 陈伟, Shaikh Abdullah Ai Mamun Hossain. 不同水肥条件对温室黄瓜生长及产量品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(1): 78-86
Wang L X, Li Z H, Jiang X, Meng W Z, Chen W, Hossain S A A M. Effects of different water and fertilizer conditions on growth, yield and quality of greenhouse cucumber[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2019, 50(1): 78-86 (in Chinese)
- [11] 杜殿文. 不同水肥处理对设施黄瓜生长、品质和养分利用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024
Du D W. Effects of different water and fertilizer treatments on growth, quality and nutrient utilization of greenhouse cucumber [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [12] 马新超, 周宇, 刘青, 轩正英, 陈蒙蒙, 张凯浩, 王旭峰, 谭占明. 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
Ma X C, Zhou Y, Liu Q, Xuan Z Y, Chen M M, Zhang K H, Wang X F, Tan Z M. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic fluorescence characteristics, yield and quality of cucumber cultivated with yellow sand and slag composite substrate [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(3): 597-608 (in Chinese)
- [13] 张西平, 绳莉丽, 刘宏权, 张慧, 蔡焕杰. 日光温室膜下滴灌黄瓜参考作物蒸发蒸腾量与气象因子的关系[J]. 节水灌溉, 2014, (9): 1-4
Zhang X P, Sheng L L, Liu H Q, Zhang H, Cai H J. Relationship between reference crop evapotranspiration and meteorological factors of cucumber under drip irrigation with plastic mulch in solar greenhouse[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014, (9): 1-4 (in Chinese)
- [14] 陈伦寿, 陆景陵. 蔬菜营养与施肥技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002
Chen L S, Lu J L. *Vegetable Nutrition and Fertilization Techniques* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002 (in Chinese)
- [15] 常晓晓. 不同供氮水平对设施黄瓜养分吸收利用和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017
Chang X X. Effects of different nitrogen supply levels on nutrient absorption, utilization and yield of greenhouse cucumber[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017 (in Chinese)
- [16] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 李晓林, 张福锁. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 126-128
Li J L, Cui D J, Meng X X, Li X L, Zhang F S. The study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in Shouguang, Shandong [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2): 126-128 (in Chinese)
- [17] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 张怀志, 袁硕. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493
Huang S W, Tang J W, Li C H, Zhang H Z, Yuan S. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization counter measure in vegetable production in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(6): 1480-1493 (in Chinese)
- [18] 胡凡. 陕西省猕猴桃和蔬菜施肥现状及主要作物肥料用量分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017
Hu F. Fertilization status of kiwifruit and vegetables in Shaanxi Province and analysis of fertilizer consumption of main crops [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017 (in Chinese)
- [19] 徐坤范, 李明玉, 艾希珍. 氮对日光温室黄瓜呈味物质、硝酸盐含量及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 717-721
Xu K F, Li M Y, Ai X Z. Effect of nitrogen on taste compounds, nitrate and yield of cucumber in solar-greenhouse [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 717-721 (in Chinese)
- [20] 李玲, 何国振. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021
Li L, He G Z. *Experimental Instruction of Plant Physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021 (in Chinese)
- [21] 杨静静. 苹果果糖激酶基因 *MdFRK2* 在调控糖代谢中的功能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
Yang J J. Study on the function of apple fructokinase Gene *MdFRK2* in regulating glucose metabolism [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019 (in Chinese)
- [22] Sun Y H, Li X Z, Wang H, Zhang Q Z, Wang X, Jiao Y N, Zhang J, Yang Y Y, Xue W Y, Qian Y L, Zhang X J, Wang R C, Chen S X. The CsDof1.8-CsLIPOXYGENASE09 module regulates C9 aroma production in cucumber[J]. *Plant Physiology*, 2024, 196(1): 338-351
- [23] 郝丽宁, 陈书霞, 王聪颖, 陈巧, 万旭花, 申晓青, 程智慧, 孟焕文. 不同基因型黄瓜果实芳香物质组成及含量差异研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(6): 139-146
Hao L N, Chen S X, Wang C Y, Chen Q, Wan X H, Shen X Q, Cheng Z H, Meng H W. Aroma components and their contents in cucumbers

- from different genotypes [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2013, 41(6): 139-146 (in Chinese)
- [24] 吕清海. 不同水肥供应水平下温光对番茄生长及产量和水肥利用率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
- Lv Q H. Effects of temperature and light on tomato growth, yield and water and fertilizer use efficiency under different water and fertilizer supply levels [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019 (in Chinese)
- [25] Ouyang Z, Zhang J, Liang X L, Wang H, Yang Z F, Tang R, Yu Q H, Zhang Y. Micro-nano aerated subsurface drip irrigation and biochar promote photosynthesis, dry matter accumulation and yield of cucumbers in greenhouse[J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2025-01-09), DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109295, 2025, 308: 109295
- [26] 马兆阳, 杨玉莹, 曹云娥, 陈书霞. 基于隶属函数法的陕西关中地区大棚黄瓜品种综合评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2025, 53(3): 36-48
- Ma Z Y, Yang Y Y, Cao Y E, Chen S X. A comprehensive evaluation of cucumber cultivars in plastic tunnel in Guanzhong area of Shaanxi Province based on membership function method [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2025, 53(3): 36-48 (in Chinese)
- [27] 李春辉, 赵秀芳, 邵红雨, 王连君. 氮磷钾配施对藤稔葡萄产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(5): 168-171, 196
- Li C H, Zhao X F, Shao H Y, Wang L J. Effects of N, P, K on the yield and quality of the grape [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(5): 168-171, 196 (in Chinese)
- [28] 周鑫鑫. 设施农业肥料高投入对土壤环境次生盐渍化的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2013
- Zhou X X Effect of high fertilizer input in protected agriculture on secondary salinization of soil environment [D]. Shanghai: Donghua University, 2013 (in Chinese)
- [29] 谭华. 园艺植物果实品质的调控技术[J]. 中国农业信息, 2016, 28(12): 129-130
- Tan H. Control techniques for fruit quality of horticultural plants [J]. *China Agricultural Information*, 2016, 28(12): 129-130 (in Chinese)
- [30] 豆建华, 张洋, 袁鸿, 王光正, 王俊文, 汪洁, 武玥, 唐中祺, 郁继华. 外源褪黑素对番茄果实品质和挥发性物质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 83-95, 117
- Dou J H, Zhang Y, Yuan H, Wang G Z, Wang J W, Wang J, Wu Y, Tang Z Q, Yu J H. Effects of exogenous melatonin on fruit quality and volatile compounds of tomatoes [J]. *Agricultural Research in the arid Areas*, 2023, 41(4): 83-95, 117 (in Chinese)
- [31] 于文剑, 杨丽, 张俊环, 姜凤超, 张美玲, 王玉柱, 孙浩元. 杏果实风味形成及调控机制研究进展[J]. 果树学报, 2023, 40(12): 2624-2637
- Yu W J, Yang L, Zhang J H, Jiang F C, Zhang M L, Wang Y Z, Sun H Y. Research progress on the mechanism of flavor formation and regulation in apricot [J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(12): 2624-2637 (in Chinese)
- [32] Handley L W, Pharr D M, McFeeters R F. Carbohydrate changes during maturation of cucumber fruit [J]. *Plant Physiology*, 1983, 72(2): 498-502
- [33] 周海霞, 兰挚谦, 张凯歌, 郑文德, 马嘉伟, 林薇, 张雪艳. 不同灌水量及频率对番茄品质及糖分累积影响的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 86-93
- Zhou H X, Lan Z Q, Zhang K G, Zheng W D, Ma J W, Lin W, Zhang X Y. Effects of different irrigation quantity and frequency on tomato quality and sugar accumulation [J]. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2019, 37(6): 86-93 (in Chinese)
- [34] Chen Z, Shah Jahan M, Mao P P, Wang M M, Liu X Y, Guo S R. Functional growth, photosynthesis and nutritional property analyses of lettuce grown under different temperature and light intensity [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2021, 96(1): 53-61
- [35] Zou J, Chen J, Tang N, Gao Y Q, Hong M S, Wei W, Cao H H, Jian W, Li N, Deng W, Li Z G. Transcriptome analysis of aroma volatile metabolism change in tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit under different storage temperatures and 1-MCP treatment [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 135: 57-67
- [36] 李为萍, 史海滨, 李仙岳, 闫建文, 郑倩, 徐昭. 水氮交互对油用向日葵粗脂肪及脂肪酸组分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(6): 838-845
- Li W P, Shi H B, Li X Y, Yan J W, Zheng Q, Xu Z. Oil sunflower crude fat and fatty acid composition under water and nitrogen coupling [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2015, 37(6): 838-845 (in Chinese)
- [37] 刘春香, 何启伟. 黄瓜芳香物质的研究进展[J]. 园艺学报, 2004, 31(2): 269-273
- Liu C X, He Q W. Advances in the study on cucumber flavor compounds [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(2): 269-273 (in Chinese)
- [38] 张然然, 郝丽宁, 单素兰, 孟焕文, 杨玉婷, 齐飞, 刘燕, 陈书霞. 不同结果部位黄瓜果实芳香物质含量和成分及相关因素分析[J]. 农业生物技术学报, 2015, 23(8): 1031-1039
- Zhang R R, Hao L N, Shan S L, Meng H W, Yang Y T, Qi F, Liu Y, Chen S X. Analyzing the contents and components of volatile compounds with relevant factors in cucumber (*Cucumis sativus*) fruits of different location [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2015, 23(8): 1031-1039 (in Chinese)
- [39] 蔡东升, 李建明, 李惠, 胡晓辉, 张钧恒. 营养液供应量对番茄产量、品质和挥发性物质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 921-930
- Cai D S, Li J M, Li H, Hu X H, Zhang J H. Effects of nutrient solution supply amount on yield, quality and volatile matter of tomato [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 921-930 (in Chinese)
- [40] 岳文俊, 何文学, 丁春梅, 柏宇, 周英杰, 奚辉. 不同滴灌水肥处理对温室甜瓜养分吸收、产量和品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(12): 2370-2380
- Yue W J, He W X, Ding C M, Bai Y, Zhou Y J, Xi H. Effects of different water and fertilization on nutrient uptake, yield and quality of greenhouse muskmelon under drip irrigation condition [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(12): 2370-2380 (in Chinese)
- [41] Erdem T, Arm L, Erdem Y, Polat S, Deveci M, Okursoy H K, T. Gültaş H T. Yield and quality response of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L var *Italica*) under different irrigation regimes, nitrogen applications and cultivation periods [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 681-688

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介:焦雅楠,西北农林科技大学园艺学院蔬菜学专业硕士研究生,参与项目:陕西省重点研发计划(2021ZDLNY03-04)。2018—2019学年获校级优秀团员荣誉称号。



通讯作者简介:陈书霞,博士,现任西北农林科技大学园艺学院教授、博士生导师,陕西省蔬菜工程技术中心主任,主要从事黄瓜醛类香气形成的分子机理及黄瓜相关防御基因参与生物和非生物胁迫的分子机理等研究。先后主持、参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、科技部支撑计划、陕西省农业科技创新驱动项目、葱姜蒜公益性行业专项等国家、省部级项目14项;相关成果已在 *Plant Physiology*、*Horticulture Research*、*Scientia Horticulturae* 和 *Frontiers in Plant Science* 等期刊上发表;共获7项专利授权;荣获西北农林科技大学2023年度教学成果一等奖等奖励;参与《高级蔬菜生理学》、《蔬菜栽培学》等教材的编写。