

祝 洋,刘志应,李新苗,等. 水肥耦合对蛭石为主复合基质栽培番茄产量、水分利用效率及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):144–151.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.02.021

水肥耦合对蛭石为主复合基质栽培番茄产量、水分利用效率及品质的影响

祝 洋^{1,2}, 刘志应^{1,2}, 李新苗^{1,2}, 王 楠¹, 张 娟^{1,2}

(1. 塔里木大学园艺与林学院, 新疆阿拉尔 843300;

2. 新疆特色果树高效优质栽培与深加工技术国家地方联合工程实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:为充分提高新疆产蛭石的利用率,将蛭石与黄沙、菇渣混合,研究不同水肥处理对基质栽培番茄单果质量、产量、果实品质及水分利用效率的影响。以双赢先锋番茄为试材,在以蛭石为主的混合基质栽培模式下,以灌水量、施氮量、施磷量、施钾量 4 个因子为试验因子,采用 4 因素 5 水平二次正交旋转组合设计的二分之一执行,设置 18 组水肥耦合处理,5 组灌水量(分别是田间持水量的 66%、70.8%、78%、85.2% 和 90%),分析各因子耦合效应,进行产量及品质综合评价。结果表明:水氮耦合对水分利用效率有正效应,过高或过低的灌水和施氮不能使水分利用效率提高;水肥耦合对产量和品质均有显著影响,W18 处理产量最高,为 147.69 t/hm²,比试验各处理平均水平增长了 50.38%;单株果数与产量的相关性要大于单果质量与产量的相关性;在一定程度减少灌溉的前提下,提高氮肥和钾肥的用量能提高番茄可溶性蛋白质、番茄红素、可溶性固形物的含量,适当提高磷肥的施用可以提升植株维生素 C、可溶性糖的含量。对番茄产量、单果质量和果实品质进行综合评价,得出最优的处理是 W6,即灌水量为 70.8% 的田间持水量,施肥量为 N 496 kg/hm²、P₂O₅ 99 kg/hm²、K₂O 454 kg/hm²。本研究可为充分利用新疆产蛭石及番茄高效优质栽培水肥科学管理提供理论依据。

关键词:水肥耦合;番茄;水分利用效率;产量;果实品质;蛭石

中图分类号:S641.204 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)02–0144–08

蛭石以良好的透气性和吸水性在无土栽培中有很大的作用。我国蛭石资源较为丰富,新疆尉犁和河北灵寿是我国蛭石的两大主产区^[1–2]。前人在蔬菜的无土栽培上,对基质配方进行筛选,杨玉波等用蛭石、沙子、珍珠岩、棉籽皮+营养液栽培番茄,结果表明蛭石加营养液下的番茄长势、产量和品质最好^[3];徐诚等以纯蛭石作为对照,分别在蛭石中添加不同体积的废弃物炉渣和菇渣进行基质复配,得出了黄瓜育苗基质的最佳配方^[2]。

番茄是茄科番茄属一年生或多年生草本植物,是世界上广泛栽培的蔬菜作物,在我国南北方广泛栽培。国内外研究表明,水肥两因素对番茄产量和品质有较大影响^[4–5]。水肥耦合是研究水肥关系,以达到更经济有效地利用水分和养分目的的一项

重要技术^[6]。有关水肥耦合对番茄的影响,前人已做过大量研究,杜清洁等研究了在滴灌条件下水肥耦合对番茄产量和品质的影响,建立数学模型确定最优灌水和施肥量^[7]。前人研究均普遍认为大水大肥的灌溉施肥模式不仅难以达到高产效果,而且会降低番茄果实品质,增加果实硝酸盐含量,多余的肥料会危害土壤,污染地下水^[8–9]。产量与水分利用率是决定番茄栽培经济效益的首要指标,提高产量与水分利用率是实现高产高效的基础。李建明等认为番茄的产量随灌溉上限和施肥定额的增加而显著增加,超过一定范围后产量逐渐降低^[10]。

有大量研究表明,灌水量和施肥量在一定范围内对作物产量有促进作用,超出此范围,水肥则会对产量产生负效应^[11]。胡晓辉等认为在同一灌溉水平下,适量地增加肥料施用量可以提高灌溉水分利用效率,而施肥量过量则会降低灌溉水分利用效率^[12];而王艳丹等认为减少灌溉用水会提高水分利用效率^[13]。在水肥耦合的研究方面,杜清洁、李建明、杨振华等已做过大量研究^[7,10,14],不过在以蛭石为主复合基质栽培下,研究水肥耦合对基质栽培番

收稿日期:2023–02–09

基金项目:新疆生产建设兵团科技攻关项目(编号:2018BB046)。

作者简介:祝 洋(1996—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为设施农业。E-mail:zy17837193466@163.com。

通信作者:张 娟,副教授,硕士生导师,主要从事设施果蔬高效栽培及环境调控研究。E-mail:50237606@qq.com。

茄的产量、水分利用效率及品质上的报道还较为少见。本试验要解决的是如何在有效利用水资源的基础上,通过合理施肥对番茄产量和品质进行提升,使作物达到高产优质,为番茄在以蛭石为主复合基质栽培下提出理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年 3—8 月在塔里木大学园艺试验站 6 号日光温室内进行。试验温室坐北朝南,长 21 m,跨度 8 m,脊高 3.2 m。试验地地处暖温带(40°32'40"N,81°17'24"E),海拔 984.31 m,年平均太阳总辐射量 559.65~612.39 kJ/cm²,年平均日照时数 2 855~2 967 h,温室气温 12~36 ℃。

供试番茄品种为双赢先锋,幼苗购自阿拉尔市鑫辰果蔬农民专业合作社,采用基质栽培。所用基质为蛭石、黄沙、菇渣(体积比为 2:1:1),分别购自阿克苏市西大桥保温材料厂、9 团沙场、10 团温室基地蘑菇温室。基质基本理化性质为:pH 值 6.9、电导率 1 614 μS/cm、速效氮含量 52.85 mg/kg、速效磷含量 140.64 mg/kg、速效钾含量 607.04 mg/kg。

试验所用肥料均购自阿拉尔市海潮农资市场。其中尿素(N:45%),美丰化工有限公司生产,磷酸

二氢钾(P₂O₅:52%,K₂O:34%),四川德天虹化工有限公司生产,硫酸钾(K₂O:53.8%),国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产。

1.2 试验设计

试验设置灌水量、氮、磷、钾 4 个试验因子。灌水量为灌溉下限(基质田间持水量的 60%)至灌溉上限(田间持水量的 90%)之间的 5 个水平,分别为 T1(66%)、T2(70.8%)、T3(78%)、T4(85.2%)、T5(90%)。氮、磷、钾分别设置 5 个水平(表 1),施氮量、施磷量、施钾量均为施肥肥料中实际养分的含量,采用 4 因素 5 水平二次正交旋转组合设计的二分之一执行(表 2)。设 3 次重复,每次重复 18 个处理组合,3 月 20 日定植并灌水缓苗 10 d,3 月 31 日开始水肥处理,6 月 17 日第 1 穗果成熟开始采样,并测果实产量,3~5 d 采收一批成熟番茄,采收期至 8 月 28 日拉秧结束。

表 1 试验因素水平及编码

因子	水平及编码				
	-1.68	-1	0	1	1.68
灌水量(%)	66	70.8	78	85.2	90
施氮量(kg/hm ²)	80	184	340	496	600
施磷量(kg/hm ²)	45	99	185	261	315
施钾量(kg/hm ²)	70	166	310	454	550

表 2 试验方案设计

处理	灌水量	施氮量	施磷量	施钾量	处理	灌水量	施氮量	施磷量	施钾量
W1	1	1	1	1	W10	1.68	0	0	0
W2	1	1	-1	-1	W11	0	-1.68	0	0
W3	1	-1	1	-1	W12	0	1.68	0	0
W4	1	-1	-1	1	W13	0	0	-1.68	0
W5	-1	1	1	-1	W14	0	0	1.68	0
W6	-1	1	-1	1	W15	0	0	0	-1.68
W7	-1	-1	1	1	W16	0	0	0	1.68
W8	-1	-1	-1	-1	W17	0	0	0	0
W9	-1.68	0	0	0	W18	0	0	0	0

1.3 测定项目

1.3.1 灌水量的测定 当基质水分降至灌水下限,通过公式(1)计算各处理的灌水量^[15]。

$$M=r \times p \times s \times h \times \theta_f \times (q_1 - q_2) / \eta。$$
 (1)

式中:M 为灌水量,m³;r 为基质容重,0.72 g/cm³;p 为土壤湿润比,取 100%;s 为灌水面积,为 5.92 m²;h 为灌水计划湿润层,取 0.25 m;θ_f 为田间持水量,为 58.91%;q₁ 为田间持水量上限,取田间持水率的

90%;q₂ 为田间持水量下限,取田间持水率的 60%;η 为水分利用系数,滴灌取 0.9。

1.3.2 单果质量的测定 单果质量用百分之一电子天平测量。

1.3.3 产量的测定 公顷产量由小区产量折算,小区产量为单株产量与小区番茄株数的乘积。

1.3.4 水分利用效率的计算 水分利用效率(WUE)=Y/M,式中 Y 表示产量,单位 kg/hm²;M 表

示总灌水量,单位 m^3/hm^2 。

1.3.5 果实品质的测定 在第 3 穗果成熟时,选取 9 个大小一致的果实进行品质测定。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定;可溶性糖含量测定使用蒽酮比色法;维生素 C 含量使用钼蓝比色法测定;有机酸采用滴定法测定;番茄红素采用二氯甲烷的正己烷法测定;可溶性固形物含量使用数字糖度计(TD-45 型)测定;硬度使用硬度计测定^[16]。糖酸比为可溶性糖含量和有机酸含量的比值^[17]。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2019 整理,使用 DPS 7.05 进行方差分析和多重比较;用 Excel 2019 和 Origin 2022 制表和制图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥耦合对基质栽培番茄水分利用效率的影响

以水分利用效率为因变量,灌水量、施氮量、施钾量和施磷量为自变量,使用 DPS 7.05 进行回归拟合,建立水分利用效率回归模型,对方程进行方差分析, $P=0.005\ 5$, $R=0.994\ 7$,说明方程拟合效果好,得到模型:

$$Y = 22.920\ 0 - 0.304\ 8X_1 + 3.537\ 0X_2 - 2.137\ 9X_3 - 2.448\ 0X_4 + 2.203\ 9X_1X_2 + 2.443\ 5X_1X_3 + 2.673\ 1X_1X_4 - 1.013\ 0X_2X_3 - 0.913\ 7X_2X_4 + 0.837\ 6X_3X_4 - 0.449\ 7X_1^2 - 0.874\ 0X_2^2 - 0.743\ 0X_3^2 - 0.571\ 0X_4^2. \quad (2)$$

式中: Y 为水分利用效率, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表灌水量、施氮量、施磷量和施钾量的水平编码值。

2.1.1 水分利用效率单因素效应分析 为分析单因素对水分利用效率的影响,对回归模型进行降维处理,得到一元线性回归模型:

$$\text{灌水量: } Y = 22.920\ 0 - 0.304\ 8X_1 - 0.449\ 7X_1^2; \quad (3)$$

$$\text{施氮量: } Y = 22.920\ 0 + 3.536\ 9X_2 - 0.874\ 0X_2^2; \quad (4)$$

$$\text{施磷量: } Y = 22.920\ 0 - 2.137\ 9X_3 - 0.743\ 0X_3^2; \quad (5)$$

$$\text{施钾量: } Y = 22.920\ 0 - 2.448\ 0X_4 - 0.571\ 0X_4^2. \quad (6)$$

以公式(3)~公式(6)4 个方程作出单因素与

水分利用的关系图,如图 1 所示,灌水量(X_1)的效应与水分利用效率的关系呈现先增大后减小的趋势;施氮量的效应与水分利用效率的关系为逐渐增大,当施氮量(X_2)到达一定值时($X_2=0.247$)增长逐渐放缓;施磷量(X_3)和施钾量(X_4)与水分利用效率的关系为负相关,随着施磷量、施钾量的增大,水分利用效率逐渐降低。

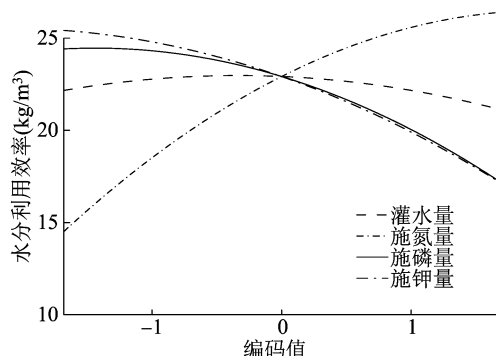


图1 水分利用效率的单因素效应

2.1.2 水分利用效率的水肥耦合效应分析 水氮之间存在耦合效应($R^2=0.75$, $P<0.01$),水磷之间和水钾之间关系均不显著($P>0.05$)。以水氮 2 个因素耦合对水分利用效率的影响,得出回归方程:

$$Y = 23.032\ 1 + 3.252\ 8X_1 + 0.803\ 7X_2 + 0.200\ 0X_1X_2 - 0.346\ 3X_1^2 - 0.592\ 8X_2^2. \quad (7)$$

水氮耦合的系数为 0.20,对水分利用效率有正效应,说明水氮互作能提高水分利用效率。如图 2 所示,灌水量(X_1)和施氮量(X_2)过高或过低均不利于水分利用效率的提高,在灌水量编码值为 0.336、施氮量编码值为 0 条件下,水分利用效率达到最大值,为 $22.98\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

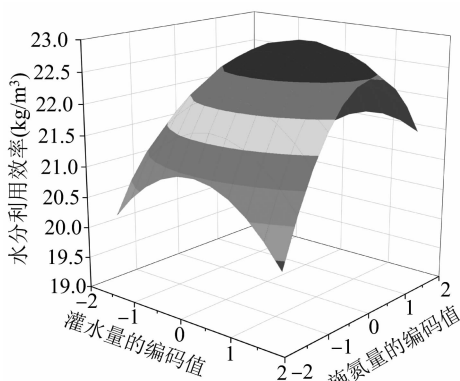


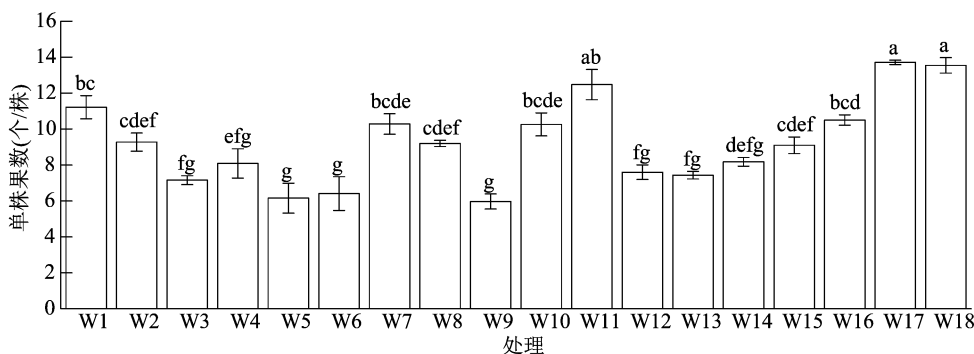
图2 水分利用效率的水氮耦合效应

2.2 不同水肥处理对番茄产量的影响

2.2.1 不同水肥耦合对番茄基质栽培单果质量和单株果数的影响 由图 3 和图 4 可知,水肥耦合处

理对单果质量和单株果数产生显著性影响。单株果数最大的是 W17 处理,达到了 13.71 个/株,是最低值的 2.3 倍;最小的是 W9 处理,为 5.97 个/株。单果质量最大的是 W5 处理,达到了 174.11 g,是最低的 1.62 倍;最小的是 W11 处理,为 107.52 g。各处理单株果数由大到小排列为 W17 > W18 > W11 > W1 > W16 > W7 > W10 > W2 > W8 > W15 > W14 > W4 > W12 > W13 > W3 > W6 > W5 > W9;单果质量

由大到小排列为 W5 > W6 > W15 > W13 > W1 > W2 > W3 > W14 > W18 > W12 > W17 > W16 > W9 > W4 > W8 > W7 > W10 > W11。以上分析结果表明:中等水平的灌水量和施氮量,单株果数最大,在低水和高肥下,单株果数处于较低值;在较低灌水量和较高施氮量下,单果质量达到最大,施低水平的氮会显著降低单果质量。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图 4、图 5 同

图3 不同水肥处理下番茄单株果数的变化

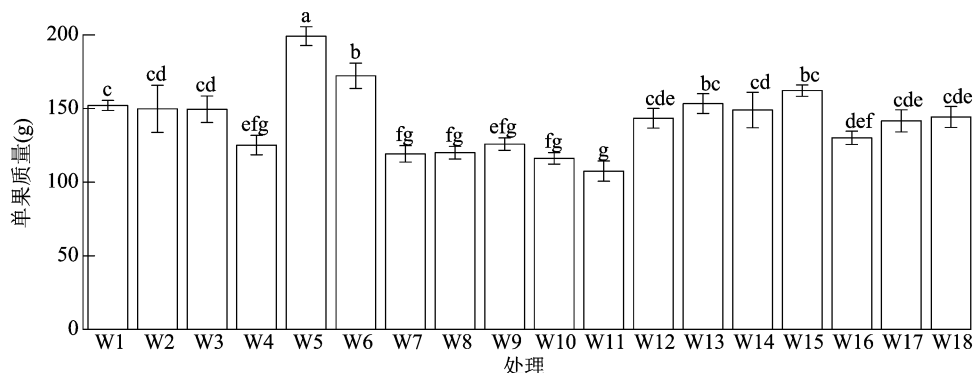


图4 不同水肥处理下番茄单果质量的变化

2.2.2 不同水肥耦合处理对番茄产量的影响 由图 5 可知,在水肥耦合效应下,各处理之间的产量存在显著性差异。W18 处理的折合产量最大,达到了 147.69 t/hm²,是最低值的 2.6 倍;W9 处理的产量最低,为 56.79 t/hm²。产量由高到低依次为 W18 >

W17 > W1 > W15 > W6 > W2 > W16 > W11 > W5 > W14 > W10 > W13 > W7 > W12 > W3 > W8 > W4 > W9。以上结果表明:施中等水平的水肥有利于产量的提升,高水高氮和低水低氮均使产量下降。

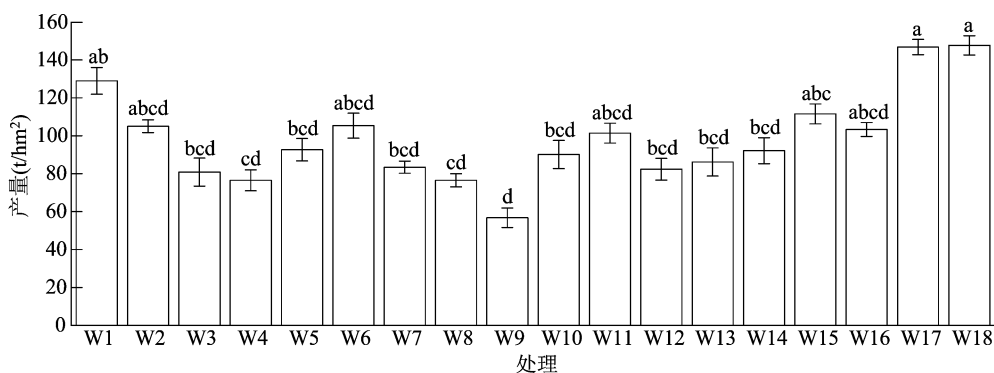


图5 不同水肥处理下番茄产量的变化

2.2.3 单株果数、单果质量与产量的关系 对单株果数、单果质量和产量之间进行相关和偏相关分析,当 $|r| < r_{0.05}$ 时,表现不显著;当 $r_{0.05} < |r| < r_{0.01}$ 时,为显著水平;当 $|r| > r_{0.01}$ 时,为极显著水平。从表 3 左下角的相关系数得出,单株果数与产量之间呈极显著正相关,说明单株果数越多,产量就越大;从右上角的偏相关系数得出,单果质量与单株果数存在极显著负相关,单株果数越大,单果质量就越低。

表 3 单株果数、单果质量与产量的相关和偏相关系数			
指标	单株果数	单果质量	产量
单株果数	1.000 0	-0.934 2 **	0.965 3 **
单果质量	-0.422 8	1.000 0	0.924 1 **
产量	0.748 5 **	0.238 9	1.000 0

注:(1)左下角为相关系数,右上角为偏相关系数;(2) $r_{0.05} = 0.468\ 3, r_{0.01} = 0.589\ 7$ 。

由图 6 和图 7 可知,在水肥耦合处理下,单株果数极显著影响了番茄单株产量($P < 0.01$),而单果质量对番茄单株产量的影响不显著($P > 0.05$)。单株果数和番茄单株产量的相关性($r^2 = 0.560$)大于单果质量和番茄单株产量的相关性($r^2 = 0.057$)。

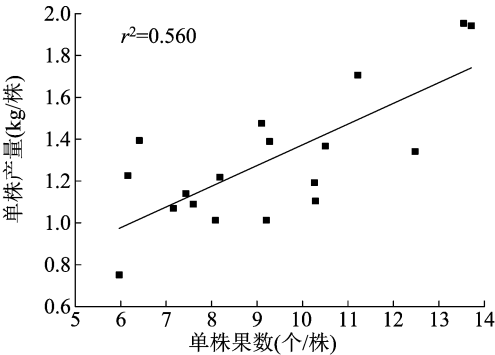


图6 单株果数与单株产量的关系

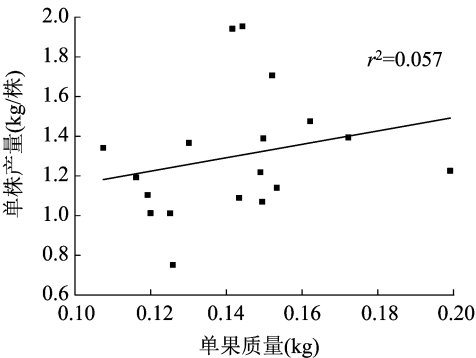


图7 单果质量与单株产量的关系

2.3 不同水肥处理对番茄品质的影响

由表 4 可知,不同处理间,番茄维生素 C 含量

存在显著性差异,维生素 C 含量最高的是 W3 处理,达到了 37.42 mg/100 g;维生素 C 含量最低的是 W10 处理,为 18.35 mg/100 g。维生素 C 含量受灌水量和施磷量影响较大,维生素 C 含量随着灌水量和施磷量的升高先升高后降低,说明过高或过低的灌水量都会使维生素 C 含量显著降低;而施氮量和施钾量对维生素 C 含量影响不显著。W3 的维生素 C 含量最高显著高于其他处理。说明在较低的施氮量和施钾量下,适量提高灌水量和施磷量有利于维生素 C 含量的提升。

由表 4 可知,不同水肥耦合处理间,番茄可溶性蛋白含量呈显著差异,可溶性蛋白含量最高的是 W6 处理,达到了 0.25 mg/100 g;可溶性蛋白含量最低的是 W9 处理,为 0.08 mg/100 g。在一定的水分下,可溶性蛋白含量随着施氮量的升高而升高;在一定的施氮量下,蛋白质含量随着灌水量的提升而下降。

由表 4 可知,不同处理间的番茄红素含量存在显著差异,W6 处理的番茄红素含量最高,达到了 159.58 mg/kg,与其他处理存在显著差异;番茄红素含量最低的是 W3 处理,为 57.59 mg/kg。缺氮、缺钾均会导致番茄红素含量降低^[18],在相同水分条件下,番茄红素含量随着施肥量的增加先增加后减少,施氮、钾的用量对番茄红素含量影响最大,而一定程度的缺水灌溉下有利于番茄红素的积累。

由表 4 可以看出,不同的水肥处理间,番茄有机酸含量存在显著差异。有机酸含量最高的是 W8 处理,为 0.55%;有机酸含量最低的是 W1 处理,为 0.21%。有机酸含量随着灌水量的升高而降低,两者呈现负相关。随着施肥量的升高而降低,在低水低肥下达到最高值。

由表 4 可知,W6 处理的可溶性固形物含量最大,达到了 6.49%,显著高于其他处理;W11 处理的可溶性固形物含量最低,为 4.27%,除了与 W3、W10 处理无显著差异外,均显著低于其他处理。可溶性固形物含量随着灌水量的增加呈减少的趋势,随着氮、钾肥的增加呈现先升高后下降的趋势,施磷量对番茄可溶性固形物的含量无显著性影响。

根据表 4 可知,不同水肥处理间可溶性糖含量达到了显著水平。番茄可溶性糖含量最高的是 W6 处理,达到了 4.23%,显著高于其他处理;最低的是 W10 处理,可溶性糖含量为 1.61%。在同一灌水量下,可溶性糖含量随着施肥量的增多而降低;在同

表 4 不同水肥耦合处理对番茄基质栽培果实品质的影响

处理	维生素 C 含量 (mg/100 g)	可溶性蛋白含量 (mg/100 g)	番茄红素含量 (mg/kg)	有机酸含量 (%)	可溶性固形物 含量(%)	可溶性糖含量 (%)	硝酸盐含量 (μg/g)	糖酸比
W1	27.16efg	0.24ab	94.91bcd	0.21d	5.28bcd	3.43bc	20.96c	16.33a
W2	30.69bcde	0.24ab	60.06ef	0.30cd	5.04cde	3.18bc	20.54c	10.60b
W3	37.42a	0.16cd	57.59f	0.34cd	4.77def	3.26bc	14.65cd	9.59bc
W4	32.61abcde	0.16bcd	64.22ef	0.37bcd	5.01cde	3.12bc	16.33c	8.43cdef
W5	33.57abcd	0.10bcd	58.83ef	0.45abc	5.43bc	3.46bc	25.17cd	7.69defg
W6	32.93abcde	0.25a	159.58a	0.47abc	6.49a	4.23a	24.33cd	9.00cd
W7	30.53bcde	0.14bcd	78.33bcde	0.54ab	5.30bcd	3.28bc	11.28cd	6.07hij
W8	21.23hi	0.18abc	72.75cde	0.55a	5.32bcd	3.31bc	17.17cd	6.02hij
W9	23.16ghi	0.08abc	78.81bcde	0.54ab	5.34bcd	2.10efg	39.48ab	3.89k
W10	18.35i	0.18d	98.13bc	0.32cd	4.64ef	1.61g	4.12d	5.03jk
W11	27.80defg	0.14bcd	71.61def	0.34cd	4.27f	1.77fg	14.23cd	5.21ijk
W12	29.41cdef	0.11bcd	76.82bcde	0.35cd	5.84b	2.56de	48.74a	7.31fgh
W13	24.60fgh	0.10cd	63.66def	0.34cd	5.28bcd	2.34ef	27.69bc	6.88fgh
W14	27.64defg	0.25bcd	80.51bcde	0.34cd	5.24cd	2.93cd	22.22c	8.62cde
W15	28.93def	0.11bcd	68.67cdef	0.34cd	5.06cde	2.23ef	27.69bc	6.56ghi
W16	31.97abcde	0.14bcd	107.41b	0.34cd	5.40bc	2.24ef	17.17cd	6.59ghi
W17	35.50ab	0.12bcd	80.32bcde	0.42abc	5.30bcd	2.96cd	23.91c	7.05fgh
W18	35.18abc	0.19bcd	82.78bcde	0.42abc	5.31bcd	3.09bcd	21.80c	7.36efgh

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

一施肥量下,番茄可溶糖含量随着灌水量的增加反而减少。W6 处理的可溶性糖含量最高,说明在较低的灌水量、较低的施磷量下,施较高的氮肥和施较高的钾肥能让番茄的可溶性糖含量达到最大。

根据表 4 可知,各处理间的硝酸盐含量差异显著。W12 处理的硝酸盐含量最高,达到了 48.74 μg/g,与除了 W9 处理外的其他处理呈显著性差异;W10 处理的硝酸盐含量最低,为 4.12 μg/g。灌水量、施氮量和施钾量显著影响硝酸盐含量,施磷肥对硝酸盐含量的影响不显著,氮肥用量与硝酸盐含量呈正相关,灌水量与硝酸盐含量呈负相关。

根据表 4 可知,不同处理番茄的糖酸比之间存在显著性差异。糖酸比最高的是 W1 处理,达到了 16.33,显著高于除了 W16、W2 处理之外的其他处理;糖酸比最低的是 W9 处理,为 3.93。番茄糖酸比随着灌水量的增加先升高再降低,说明过高或过低的灌水量都会使糖酸比降低。在相同灌水量下,糖酸比随着施肥量的增加而增加,施磷量和施钾量对糖酸比影响显著,施氮量对其影响不显著。W1 处理的糖酸比最大,说明在较高的灌水量下,施较高的氮、磷、钾肥能显著提高番茄的糖酸比。

2.4 不同水肥耦合处理下番茄产量及果实品质综合评价

从表 5 中可知,前 5 个主因子的累计贡献率达到了 87%($>85\%$),可以反映出全部指标 87% 的信息,所以选择前 5 个主因子对番茄产量与品质进行综合评价。对指标进行因子分析,得到因子载荷矩阵,载荷值越接近 1 或越接近 -1 越能反映因子变量。

表 5 各主因子的特征值和贡献率

项目	载荷				
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5
产量	0.05	-0.69	-0.30	-0.29	0.04
单果质量	-0.19	-0.35	-0.16	0.57	0.51
硬度	-0.11	-0.08	0.95	0.05	0.07
维生素 C 含量	-0.18	-0.26	-0.72	0.12	0.49
可溶性蛋白含量	0.49	-0.02	0.20	0.14	0.76
番茄红素含量	0.96	-0.03	0.00	-0.02	0.11
有机酸含量	0.15	0.89	-0.14	-0.10	0.25
可溶性固形物含量	0.66	0.18	-0.17	0.50	0.46
可溶性糖含量	0.14	0.02	-0.19	-0.01	0.94
硝酸盐含量	0.12	0.14	0.06	0.91	-0.02
糖酸比	0.11	-0.81	0.04	0.00	0.49
特征值	3.43	2.38	1.56	1.30	0.94
贡献率	0.16	0.20	0.15	0.14	0.23
累计贡献率	0.16	0.36	0.51	0.65	0.87

对番茄各项指标进行综合评价得出各指标得分,在水肥耦合处理下,W6 处理的综合得分最高,排在第 1 位(表 6),说明 W6 处理番茄产量与果实品质综合表现最好,所以较低的灌水量、较高的施

氮量、较低的施磷量、较高的施钾量效果最好,即灌水量为田间持水量的 70.8%、施氮量 496 kg/hm²、施磷量 99 kg/hm²、施钾量 454 kg/hm²。

表 6 水肥耦合处理下不同番茄产量和果实品质的综合评价

处理	各因子得分					综合得分	排名
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5		
W1	0.631	-2.537	1.982	-0.201	1.084	0.114	7
W2	-0.746	-0.82	1.082	-0.058	1.022	0.106	8
W3	-2.082	-0.138	-0.648	-0.232	0.642	-0.341	15
W4	-1.184	-0.269	-0.717	0.092	0.716	-0.174	11
W5	-0.978	0.781	-0.544	0.679	1.014	0.243	4
W6	2.652	0.579	-0.622	0.508	1.608	0.876	1
W7	0.025	1.384	-0.571	-1.566	0.675	0.127	5
W8	0.274	1.701	0.773	-1.157	0.550	0.461	3
W9	0.012	1.848	2.153	1.1620	-0.232	0.802	2
W10	0.579	-0.017	0.988	-1.477	-2.039	-0.431	17
W11	-0.489	0.026	-0.213	-1.26	-1.583	-0.639	18
W12	0.550	0.189	-0.673	2.407	-1.065	0.116	6
W13	-0.423	0.011	0.126	1.007	-0.998	-0.132	10
W14	-0.134	-0.341	0.517	0.288	0.036	0.037	9
W15	-0.574	-0.509	-0.215	0.956	-0.846	-0.283	14
W16	1.290	-0.764	-1.044	-0.356	-0.922	-0.363	16
W17	0.281	-0.535	-1.266	-0.299	0.087	-0.274	13
W18	0.316	-0.592	-1.108	-0.495	0.252	-0.246	12

3 讨论与结论

3.1 不同水肥耦合处理对番茄水分利用效率的影响

水分利用效率是植物产出与耗水量的比值,是评价作物生长适宜度的综合指标^[19]。研究结果表明,在同一灌水量下,水分利用效率随着施氮量增加,呈现先上升后下降的趋势。说明在一定范围内,灌水量与施氮量具有耦合正效应,施氮量过高则不利于水分利用效率的提高。本研究中,在同一施氮量下,中等水平的灌水量的水分利用效率最大,过高或过低的灌水量均会降低水分利用效率,这与李建明和张智等的研究结果^[10,20]一致。

3.2 不同水肥耦合处理对番茄产量的影响

番茄产量和品质是衡量其经济效益的主要组成部分^[21]。本研究结果表明,在中等水平灌水量下,施加中等肥料的产量最大,在相同灌水量下施较高氮肥比施较低的氮肥产量高,氮肥对产量的影响比磷、钾肥对产量的影响大,这与李邵的研究结果^[22]相同。总体来看,施肥量的影响大于灌水量,

这与王鹏勃等的试验结果^[23]不同,可能是本试验所采用的基质为黄沙、蛭石和菇渣,营养含量较为不足。前人的研究结果表明土壤肥力缺乏时,施肥效果较明显;土壤肥力充足时,灌水效果较明显^[24]。在高水平施氮量和高水平灌水量下,产量未明显提高,反而会造成水资源和肥料的浪费,这与张燕的研究结果^[25]相同。在中等水平灌水量和中等施肥量下,单株果数达到最大;在低灌水量和较低灌水量下,单株果数较低。在对产量的影响上,单株果数与产量的相关性大于单果质量与产量的相关性,这与邢英英的研究结果^[26]相同。在较低灌水量下,施较高的氮肥能有效提高单果质量,磷、钾肥对单果质量的影响不显著;高灌水量和低施氮量都会降低单果质量。

3.3 不同水肥耦合处理对番茄果实品质的影响

果实品质是重要指标,直接反映了其经济效益和受欢迎程度^[27-28]。在较低的灌水量下,施较高的氮肥、较低的磷肥和较高的钾肥,能提高番茄可溶性蛋白、番茄红素、可溶性固形物、可溶性糖的含量;而在高的灌水量下,维生素 C、可溶性蛋白、可溶

性糖、硝酸盐含量均显著降低,表现为“稀释效应”,与潘晓莹等的研究结果^[6]是一致的。硝酸盐含量主要受灌水量和施氮量的影响,在同一灌水量下,硝酸盐含量随着氮肥的施用量而升高,在高氮肥下,硝酸盐含量达到最高,过高的硝酸盐摄入量会危害人体健康^[29]。过高的灌水量和过高的施肥量都不能提高果实品质^[30],反而会降低水分利用效率,造成水资源的浪费。一定程度的缺水灌溉有利于番茄红素、可溶性固形物含量等果实品质指标的提高,这与陈思等的研究结果^[31]一致。施较高水平磷肥有利于提升果实维生素 C、可溶性糖的含量,增强光合作用,提高开花、坐果率。番茄对钾肥的需求较大,缺钾会导致番茄红素含量降低,适当提高钾肥的用量,能促进可溶性糖含量的提升和降低硝酸盐的含量。

3.4 结论

综上所述,经综合评价,W6 处理是最佳的水肥耦合处理,即在 70.8% 的田间持水量下,施 N 496 kg/hm²、P₂O₅ 99 kg/hm²、K₂O 454 kg/hm² 时,产量为 147.69 t/hm²,单果质量为 0.17 kg,水分利用效率为 28.35 kg/m³。在以蛭石为主复合黄沙、菇渣基质栽培模式下,可有效提升番茄的产量和品质,这样既能节省生产成本,还能保护生态环境。

参考文献:

- [1] 苏小丽. 河北灵寿蛭石的结构与表面性质调控及其反应机理[D]. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2019:5-7.
- [2] 徐 诚,轩正英,张 娟,等. 以蛭石为主的复配基质对黄瓜育苗的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):148-154.
- [3] 杨玉波,董灵迪,焦永刚,等. 不同基质对番茄生长及其产量的影响[J]. 北方园艺,2022(11):8-15.
- [4] Hebbar S S, Ramachandrapa B K, Nanjappa H V, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(1): 117-127.
- [5] 黄红荣,李建明,张 军,等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄光合、产量和干物质分配的影响[J]. 灌溉排水学报,2015,34(7):6-12.
- [6] 潘晓莹,武继承. 水肥耦合效应研究的现状与前景[J]. 河南农业科学,2011,40(10):20-23.
- [7] 杜清洁,李建明,潘铜华,等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):10-17.
- [8] 杨丹妮. 设施番茄水肥利用规律与耦合模型研究[D]. 上海:上海交通大学,2016:8-11.
- [9] Gutiérrez - Gordillo S, García - Tejero I F, Durán Zuazo V H, et al. The effect of nut growth limitation on triose phosphate utilization and

- downregulation of photosynthesis in almond[J]. Tree Physiology, 2023, 43(2):288-300.
- [10] 李建明,潘铜华,王玲慧,等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(10):82-90.
- [11] 施 明. 贺兰山东麓风沙土红地球葡萄水肥耦合效应与协同管理[D]. 银川:宁夏大学,2014:8-9.
- [12] 胡晓辉,高子星,马永博,等. 基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J]. 农业工程学报,2020,36(17):81-89.
- [13] 王艳丹,何光熊,杨湲舟,等. 水肥耦合对干热河谷冬春番茄产量及其品质的影响[J]. 热带作物学报,2021,42(8):2297-2304.
- [14] 杨振华,王新宁,郭俊强,等. 水肥耦合对草莓生长发育与产量及水分利用效率的影响[J]. 贵州农业科学,2022,50(10):72-78.
- [15] 李清明,邹志荣,郭晓冬,等. 不同灌溉上限对温室黄瓜初花期生长动态、产量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(4):47-51,56.
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006:120-188.
- [17] 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,2000:182-185.
- [18] 段金辉. 加工番茄番茄红素快速检测、积累特性模型及其肥料效应研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010:48-49.
- [19] 詹昌峰,战 超,陈国双,等. 水肥耦合效应对沙葱产量的影响[J]. 延边大学学报,2022,44(2):47-54.
- [20] 张 智,党思荣,李曼宁,等. 基于 GRA-TOPSIS 耦合的草莓品质综合评价[J]. 东北农业大学学报,2021,52(10):47-56.
- [21] 侯伟娜. 日光温室番茄水肥耦合效应的初步研究[D]. 郑州:河南农业大学,2014:10-11.
- [22] 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]. 扬州:扬州大学,2010:135-138.
- [23] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(2):314-323.
- [24] 肖自添. 温室基质培番茄水氮耦合效应研究[D]. 北京:中国农业科学院,2008:42-43.
- [25] 张 燕. 杨凌温室滴灌施肥番茄水肥耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014:39-40.
- [26] 邢英英. 温室番茄滴灌施肥水肥耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015:68-70.
- [27] 周艳超,薛 坤,葛海燕,等. 基于主成分与聚类分析的樱桃番茄品质综合评价[J]. 浙江农业学报,2021,33(12):2320-2329.
- [28] 李佳璠,宋梦圆,许盟盟,等. 不同有机肥处理对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):173-180.
- [29] 牛晓丽,胡田田,周振江,等. 水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(2):82-88.
- [30] 赵文举,马 锋,曹 伟,等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(2):95-101.
- [31] 陈 思,牛晓丽,周振江,等. 水肥供应对番茄果实糖酸含量的影响[J]. 节水灌溉,2013(9):18-22.