

沙培黄瓜生长对水氮耦合效应的响应

马新超^{1,2}, 轩正英^{1,2}, 李 玉^{1,2}, 常 娇^{1,2},
高 源^{1,2}, 房 健^{1,2}, 谭占明^{1,2}, 王旭峰³

(1. 塔里木大学园艺与林学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 塔里木大学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; 3. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:以‘优胜美’水果黄瓜为试材, 设置灌水水平和施氮量两个因素, 采用二次饱和 D-最优设计进行了田间试验, 研究水氮耦合对沙培黄瓜生长、干物质积累和分配、产量的影响。结果表明: 所有处理的各项生长指标均随着黄瓜生育期的推进逐渐增加, 较低灌水水平(65%)未抑制黄瓜生长, 增施氮肥能显著提升各项生长指标对应值, T3 处理即灌水水平为 65%、施氮量为 $1\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水氮运筹方案获得了最好的植株生长特性。水氮耦合对植株干物质积累与分配的影响主要表现在叶片、茎和果实的积累上, 植株干物质积累量随着施氮量的增加而显著增加, 灌水水平与其呈开口向下的抛物线趋势, 但灌水水平对干物质积累量的影响并不显著; 通过生长指标的相关性分析确定了叶片叶绿素 SPAD 值可以作为预测植株干物质积累的关键指标。处理 T4 在全生育期内各项生长指标对应值均处在较高水平, 其单株干物质积累量和干物质最大累积速率分别为 $248.08\ \text{g}$ 和 $4.02\ \text{g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 均为各处理间最高值, 同时其产量仅次于最高的 T5, 为 $101.93\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 该处理符合农业生产中低投入高产出的目标, 因此本研究推荐最适的水氮耦合方案为 T4, 即灌水水平为 80.20%, 施氮量为 $623\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 水氮耦合; 黄瓜; 砂培; 干物质积累; 产量

中图分类号: S642.2; S62 **文献标志码:** A

Coupling effects of water and nitrogen on growth of sand cultivation cucumber

MA Xinchao^{1,2}, XUAN Zhengying^{1,2}, LI Yu^{1,2}, CHANG Jiao^{1,2},
GAO Yuan^{1,2}, FANG Jian^{1,2}, TAN Zhanming^{1,2}, WANG Xufeng³

(1. College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China;

2. National and Local Joint Engineering Laboratory of High Efficiency and Quality Cultivation and Deep Processing
Technology of Southern Xinjiang Characteristic Fruit Trees, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China;

3. College of Mechanical Electrification Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: To clarify the response trend of cucumber to water and nitrogen coupling effects in sand cultivation, cucumber growth, dry matter accumulation, distribution, and yield were studied. “Youshengmei” fruit cucumber was selected as test material. The field experiment was carried out by using secondary saturated D-optimal design with two factors of irrigation level and nitrogen application. The results showed that: the growth indexes of all treatments increased gradually with the advance of cucumber growth period. Low irrigation level (65%) did not inhibit the growth of cucumber, the increase of nitrogen application significantly improved the corresponding values of growth indexes. T3 treatment, namely 65% irrigation level and $1\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen application, had the best plant growth characteristics. The effects of water and nitrogen coupling on plant dry matter accumulation and distribution were mainly manifested in leaf, stem and fruit accumulation. The plant dry matter accumulation increased

收稿日期: 2021-12-01

修回日期: 2022-06-15

基金项目: 新疆重点产业支撑计划项目(2019DB001); 新疆生产建设兵团科技攻关项目(2018DB003); 塔里木大学研究生创新训练项目(TDGR1202023)

作者简介: 马新超(1998-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为设施农业。E-mail: mxczyk@163.com

通信作者: 轩正英(1979-), 女, 辽宁朝阳人, 教授, 研究生导师, 主要从事新疆特色蔬菜种质资源与栽培生理研究。E-mail: xzyzyk@163.com

significantly with the increase of nitrogen application rate, and the irrigation level showed a downward parabolic trend, but the effect of irrigation level on plant dry matter accumulation was not significant. Through the correlation analysis of the growth indexes, it was determined that the leaf chlorophyll SPAD value could be used as a key index to predict the plant dry matter accumulation. The corresponding values of each growth index of treatment T4 during the whole growth period were at a high level, and the dry matter accumulation amount and the maximum dry matter accumulation rate of each plant were 248.08 g and $4.02\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, which were the highest values among the treatments. Meanwhile, the yield of T4 ($101.93\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) was only second to T5, this treatment was in line with the goal of low input and high yield in agricultural production. Therefore, this study recommended T4 as the optimal water–nitrogen coupling scheme, namely, 80.20% irrigation level and $623\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen application.

Keywords: water and nitrogen coupling; cucumber; sand cultivation; accumulation of dry matter; yield

新疆南疆地区由于其独特的地理气候环境及丰富的光热资源,已成为非耕地设施农业发展的主要地区,以取材方便、价格低廉的沙子作为基质的温室沙培蔬菜面积在不断扩大。但日光温室蔬菜沙培技术存在着区域性技术发展不平衡、沙培技术要求高、推广环节比较弱、技术完善程度不高等问题^[1],尤其是在南疆地区的温室沙培黄瓜栽培中长期存在着盲目大量灌水施氮的现象,粗犷的水氮管理已经严重限制当地沙培黄瓜技术的发展。

近些年来,有部分学者围绕温室沙培黄瓜展开了研究,沈富等^[2]研究了痕量灌溉管理深对沙培黄瓜生长发育的影响,其结果表明日光温室沙培黄瓜栽培中痕量灌溉管理设深度为 5 cm 最佳;王泽等^[3]通过研究不同滴灌形式对沙培黄瓜生长、品质及产量的影响,得出浅埋滴灌更有利于沙培黄瓜的生长;谷端银等^[4]的相关研究表明施用 $100\sim150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纯化腐植酸可显著促进黄瓜幼苗的生长及养分吸收;王倡宪等^[5]通过研究不同氮形态对沙培黄瓜幼苗生长及养分吸收的影响,确定了全 NO_3^- 处理对黄瓜幼苗生长最有利。在围绕水或肥单因素对沙培黄瓜生长影响的基础上进行水氮耦合对温室沙培黄瓜生长影响的相关研究尚鲜见报道。

本试验设置了灌水水平和施氮量两因素,进行了不同水氮耦合下温室沙培黄瓜的田间试验,测定了生长形态指标和各时期的干物质积累量,并对黄瓜产量进行了调查,在试验条件下,明确沙培黄瓜生长对水氮耦合效应的响应规律并确定最适水氮耦合方案,以期为温室沙培黄瓜高效生产与科学水氮管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

试验于 2021 年 3—7 月在塔里木大学园艺试验站($81^{\circ}17'\text{E}$, $40^{\circ}32'\text{N}$,海拔 990 m)7 号节能型日光温室内进行。栽培基质为建筑用沙(粗沙),其理化性质如表 1 所示。

本试验选用‘优胜美’水果黄瓜为试材,使用营养钵进行育苗,待黄瓜苗长至 3 叶 1 心时定植,缓苗 5 d 后进行水肥处理;试验采用槽式栽培,每个栽培槽面积为 $0.5\text{ m}\times2.6\text{ m}=1.3\text{ m}^2$,深 0.4 m,设定株距为 0.25 m,大行距为 0.6 m,小行距 0.3 m,进行双行栽培,每小区定植 20 株幼苗,保苗 $50\,000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$;设 7 个处理,每个处理 3 次重复,共计 21 个小区和 420 株黄瓜,温室东西两侧各设一行保护栽培槽。

表 1 黄瓜栽培基质的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of matrix

有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Organic matter	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Bulk density	全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total nitrogen	全磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total phosphorus	全钾/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total potassium	pH
6.53	1.61	1.29	0.24	0.46	7.49
速效氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available N	速效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available P	速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available K	硝态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Nitrate nitrogen	铵态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Ammonium nitrogen	EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
6.61	8.01	38.34	0.12	3.32	3.16

1.2 试验设计

试验设置灌水水平和施氮量二因素,采用二次饱和 D-最优设计($p=2$ 的 6 点设计),并加设了一个最高码值处理(T7),该处理只作对照,不参加回归分析,以保持原方案的优良性,试验设计具体方案见表 2。

灌水上限最大值设为田间持水量的 100%,最小值设为田间持水量的 65%;土壤水分下限为每天 8:00 时测得的各处理实际基质含水率,基质含水率使用 DM-300 土壤水分速测仪(青岛拓科)实时测定,并每隔 20 d 采土样用烘干法校准,当土壤含水率接近或降低至灌水下限的 60%时进行灌溉。灌水水平和施氮量的 0 码值所对应的实际值依据文献^[6-8]并结合基质理化性质设定,试验所用灌溉水为水厂供应的自来水,其 EC 值为 $0.59\text{ uS}\cdot\text{cm}^{-1}$,所用大量元素肥料分别为尿素(含 N 46%)、磷酸二氢钾(含 P_2O_5 51%)和硫酸钾(含 K_2O 50%),依据基质中的养分含量及养分平衡原则^[8]设定磷钾肥用量分别为 $290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮磷钾肥料均作追肥随水施入,每隔 5 d 施肥一次,共计追施 20 次,各处理氮肥每次等量施入,前 7 次每次施入磷肥的 7%、钾肥的 3%,剩余磷钾肥每次等量施入,并视植株生长情况适时适量喷施微量元素。灌水量计算公式为:

$$M_{\text{滴灌}} = r \times p \times h \times \theta_f \times (q_1 - q_2) / \eta$$

式中, r 为土壤容重,取 $1.61\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; p 为土壤湿润比,取 100%; h 为灌水计划湿润层,取 0.35 m; θ_f 为田间持水量,取 14.02%; q_1 、 q_2 分别为土壤水分上限和土壤水分下限(以相对田间持水量的百分比表示); η 为水分利用系数,滴灌取 0.9。

表 2 黄瓜水氮耦合试验设计方案

Table 2 Design scheme of cucumber water nitrogen coupling test

处理 Treatment	码值方案 Code value scheme		实际值 Actual value	
	灌水水平 Irrigation level	施氮量 N application	灌水水平 Irrigation level/%	施氮量 N application /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
T1	-1	-1	65.0	150
T2	1	-1	100.0	150
T3	-1	1	65.0	1250
T4	-0.1315	-0.1315	80.2	623
T5	0.3944	1	89.4	1250
T6	1	0.3944	100.0	917
T7	1	1	100.0	1250

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标的测定 定植后,每个处理随机选取 18 株生长正常的黄瓜植株并标记,水氮处理后每隔 7 d 测定以下指标,共测 10 次。

株高:用卷尺从子叶节处起测量至植株顶端;
株幅:用卷尺测量植株叶片最大伸展直径;
茎粗:用游标卡尺测量子叶节上面的第一节间的中间直径;
叶片数:统计叶长大于 2 cm 的叶片数;
叶面积:测得叶片的纵、横茎长度后使用经验公式^[9]计算得出:

$$S = 0.5 \times WL \times LL + 0.25 \times WL^2$$

式中, WL 为单片叶叶片宽度, LL 为单片叶叶片长度,选择植株中上部最大的叶片进行测定。

叶绿素 SPAD 值:使用 SPAD 502 plus(柯尼卡美能达,日本)对植株自下而上第 4 片叶子进行测定,测定时避开叶脉选取 3 个点取平均值。

1.3.2 干物质质量的测定 黄瓜生育期划分为:苗期(水氮处理后 20 d)、花期(水氮处理后 35 d)、初瓜期(水氮处理后 53 d)、盛瓜期(水氮处理后 78 d)、末瓜期(水氮处理后 100 d)。分别于黄瓜各生育期结束时随机选取植株 3 株,将根、茎、叶、花、果分开,根系用清水洗净擦干,放入烘箱内于 105°C 下杀青 15 min 后置于 75°C 下烘干至恒重,使用 ME204 万分之一天平(梅特勒托利多,瑞士)称重记数,并计算根冠比和植株的干物质积累量。

1.3.3 产量的测定 从黄瓜结果初期至拉秧,对采收的黄瓜果实使用分析天平(YP30002,上海佑科)直接称重,统计每小区的产量,并折算为公顷产量。

1.4 数据处理

用 DPS 7.05 软件对各项指标进行数据处理;用 Origin 2021 软件制图;用 Excel 2019 制表。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对沙培黄瓜生长的影响

2.1.1 水氮耦合对沙培黄瓜株高的影响 由图 1a 可知,各处理的株高随着黄瓜生育期的推进逐渐增加,5 月 4 日前各处理株高无显著差异,5 月 4 日后各处理的株高开始产生差异,并在 6 月 1 日后株高快速增长。在整个生育期,施氮量一致时,株高随着灌水水平的增加而降低,灌水水平一致时,株高随着施氮量的增加而增加,在低水高氮处理下株高在全生育期内均能获得较高值。

2.1.2 水氮耦合对沙培黄瓜茎粗的影响 由图 1b 可知,随着生育期的推进,黄瓜茎粗不断增加,苗期茎粗增长迅速,进入花期后茎粗的增幅较为一致,但增长速率却有一定程度下降,这是因为茎秆是地下养分运输至地上部的通道,黄瓜开花坐果需要吸收充足的养分供给而导致茎粗增长迅速,至试验结

束时,T3 处理的茎粗最大为 12.75 mm,是茎粗最小 T2 处理的 1.65 倍,灌水水平和施氮量对茎粗的影响与株高的一致。

2.1.3 水氮耦合对沙培黄瓜叶面积的影响 由图 1c 可知,除处理 T1 和 T2 外其他处理的叶面积均随着植株生长而显著增大,由于 T1 和 T2 均为低氮处理,氮肥供应不足情况下植株叶面积扩展受到限制,虽然在苗期叶面积有所增长,但植株开始进入生殖生长后其叶面积便停止增长,且一直处于较低值;至试验结束时,叶面积最大的是处理 T3,为 530.80 cm²,其次是处理 T5,为 452.28 cm²,最小的是处理 T2,仅为 83.07 cm²,灌水水平和施氮量对叶面积的影响与对株高的影响趋势一致。

2.1.4 水氮耦合对沙培黄瓜叶片数的影响 由图 1d 可知,随着生育期的推进,黄瓜叶片数不断增加,水氮处理后 30 d 内各处理叶片数增长几乎一致,之后各处理的叶片数开始产生明显差异,尤其是在 5 月 25 日—6 月 15 日各处理叶片数均匀并快速地增加,停止测量时,T3 处理的叶片数最多(33 片),较最少的 T2 处理多 10 片,其次 T5 的叶片数也达到了 31 片,灌水水平和施氮量对叶片数的影响与对株高的影响趋势一致。

2.1.5 水氮耦合对沙培黄瓜株幅的影响 由图 1e 可知,黄瓜株幅随着生育期的推进而逐渐增加,在 6 月 1 日前即苗期和花期内株幅扩展迅速,之后扩展速率便有所下降并较为均匀,这是因为自黄瓜根瓜坐住之后,其生殖生长较营养生长相比更为旺盛,

至试验结束时,T3 处理的株幅最大为 62.95 cm,较最小的 T2 处理多 28.05 cm,灌水水平和施氮量对株幅的影响与对株高的影响趋势一致。

2.1.6 水氮耦合对沙培黄瓜叶片叶绿素 SPAD 值的影响 由图 1f 可知,黄瓜叶片叶绿素 SPAD 值的增长与叶面积的增长趋势相同,除处理 T1 和 T2 外其他处理的叶面积均随着植株生长而显著增大,这就表明在适宜水氮供应下,叶片能获得较高的叶面积从而获得较好的光截获能力,叶片的叶绿素 SPAD 值显著增加,光合能力有所提升,至试验结束时,处理 T3 的叶片叶绿素 SPAD 值最大,为 107.38,其次是 T4(107.33),最小的 T2 处理为 57.33,灌水水平和施氮量对叶片叶绿素 SPAD 值的影响与对株高的影响趋势一致。

2.2 水氮耦合对沙培黄瓜干物质积累的影响

2.2.1 各器官干物质的积累与分配 水氮耦合对沙培黄瓜各器官干物质积累与分配的影响如图 2 所示,植株的干物质积累量随着生长发育不断增长,低氮处理的 T1 和 T2 各时期干物质积累量均显著低于其他处理,表明在 150 kg·hm⁻²的施氮量下,无论灌水水平或高或低均无法获得较好的干物质积累量,施氮量充足的其他处理在各时期均表现出较高的干物质积累量,干物质积累量随着施氮量的增加而显著增加。在不同时期下各器官干物质分配的规律各不相同,但总体上表现出叶片和果实干物质积累量较大,茎、根和花较少。

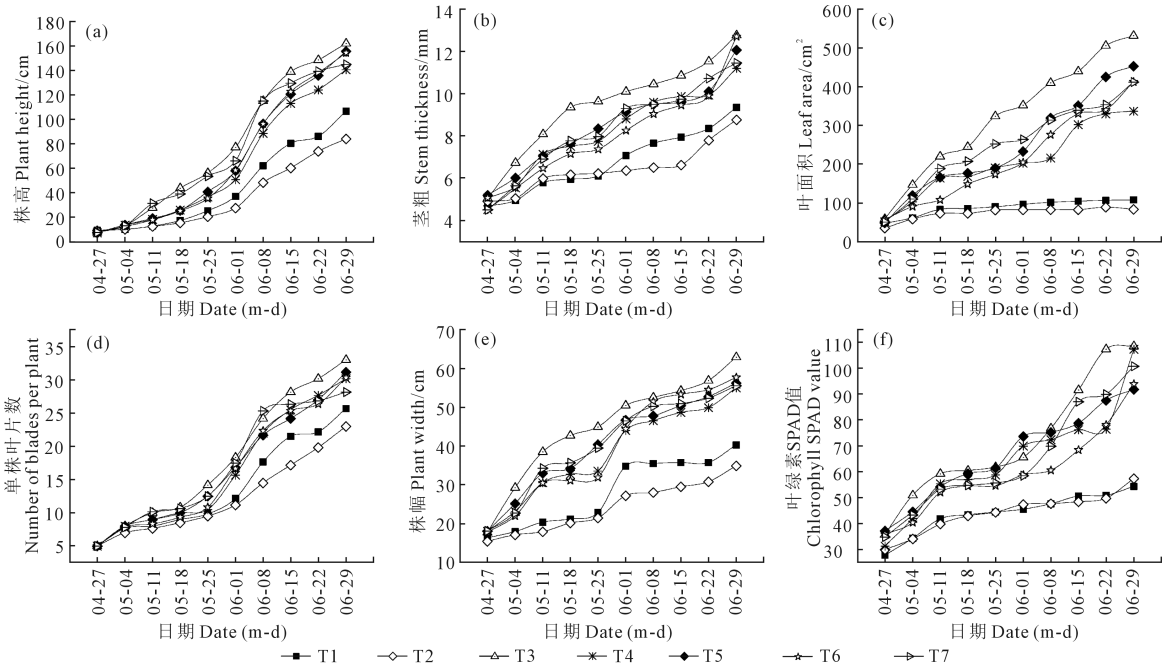


图 1 水氮耦合对沙培黄瓜生长的影响

Fig.1 Effect of water and nitrogen coupling on growth of sand cultivation cucumber

苗期植株的干物质积累量较少,占拉秧时干物质积累量的 0.90%~2.83%,各处理器官中干物质积累量均表现为叶>茎>根,叶占植株总积累量的 65.65%~69.87%,茎占 15.24%~22.59%,根占 9.89%~14.89%,苗期植株干物质积累量最多的是处理 T3,最少的是处理 T1,可见苗期低水高氮的处理有利于植株干物质的积累。花期植株干物质积累量开始快速增加,占全生育期总吸收量的 11.92%~24.04%,各处理器官中干物质积累量除 T5 和 T7 外均表现为叶>茎>根>花,叶占植株总积累量的 63.98%~70.33%,茎占 23.68%~30.02%,根占 2.24%~5.23%,花占 2.39%~4.00%,T5 和 T7 器官中干物质积累量表现为叶>茎>花>根,在相同施氮量下,花的干物质积累量表现为 T7>T5>T3,花的干物质积累量随着灌水水平的增加而增加,表明在充

足的氮肥供应下,提高灌水水平可以促进植株的花芽分化,增大开花量。

初瓜期占拉秧时干物质积累量的 31.14%~46.28%,盛瓜期占 60.26%~83.44%,进入初瓜期后黄瓜器官中干物质分配规律表现为果实和叶较多,茎、根和花较少,在初瓜期、盛瓜期、末瓜期中各器官干物质分配比例发生了变化,叶和茎中干物质分配比例明显变小,果占了植株干物质积累量的一大部分,尤其是在盛果期,果占植株总干物质积累量的比例高达 29.11%~50.75%,自进入初瓜期后,T4 和 T5 的植株干物质积累量均处于较高水平,而低水高氮的 T3 和高水高氮的 T7 低于 T4、T5 处理,表明虽然增施氮肥能显著增加干物质积累量,但只有在灌水水平适宜的条件下再增施氮肥才能获得最高的干物质积累量,反之会使干物质积累量有所下降。

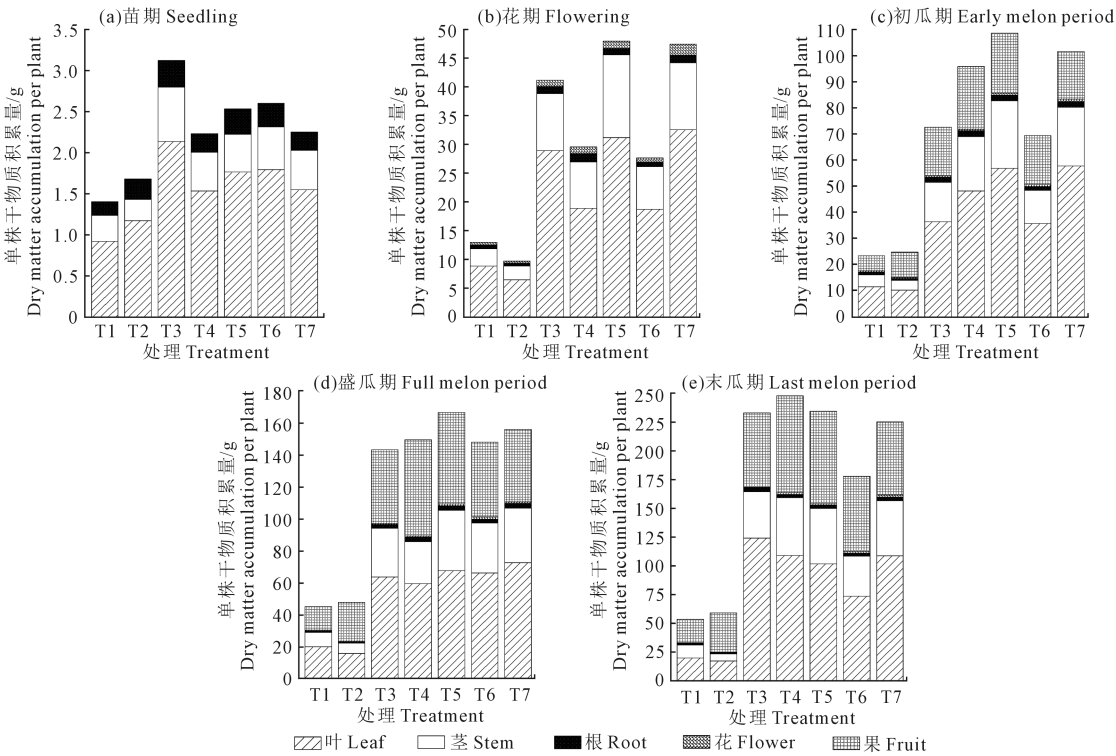


图 2 水氮耦合对沙培黄瓜干物质积累与分配的影响

Fig.2 Effect of water and nitrogen coupling on dry matter accumulation and distribution of sand cultivation cucumber

2.2.2 干物质积累速率的 Logistic 方程回归分析

为了定量研究水氮耦合下沙培黄瓜干物质积累量随生育进程的动态累积变化特征及规律,采用 Logistic 方程进行拟合,结果如表 3 所示。各处理干物质最大累积速率在水氮处理后 57.8~86.0 d (盛果期和末瓜期) 出现,出现时间最早的是处理 T1,最晚的是处理 T3,在进入末瓜期后才出现,可看出低水低氮处理下干物质最大累积速率出现时间最早。处理 T4 的干物质最大累积速率最大,为 4.03 g ·

株⁻¹ · d⁻¹,是最低值 T1 的 4.3 倍,在同一灌水水平下表现为 T6>T7>T2 并且 T3>T1,除 150 kg · hm⁻² 施氮量的 T1 和 T2 外其他处理均能获得较大的物质最大增长速率;这就表明干物质最大累积速率随着施氮量的增加呈先上升后下降趋势,而灌水水平对其无显著影响。

快速累积期出现时间最早的为处理 T1,较最晚的 T3 缩短了 18.5 d,快速累积期持续时间最长的为处理 T3,但其结束时间为水氮处理后 115.8 d,此时

黄瓜已拉秧结束了 16.8 d,可见低水高氮的处理 T3 营养生长过盛。快速累积期出现时间较早的 T5 能够保持相对较长的持续时间,作为对照的 T7 其快速累积期持续时间也较长并且开始时间也相对较早,但其干物质最大累积速率较低,为 $3.34\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,综合考虑干物质最大累积速率及其出现时间、快速累积期开始时间及持续时间这些因素,T4 和 T5 为较优处理。

2.2.3 水氮耦合对沙培黄瓜根冠比、干物质及产量的影响 如表 4 所示,拉秧时水氮耦合对沙培黄瓜单株总干物质和单株地上部干物质的影响规律是一致的,可见黄瓜地下部干物质占比较小,各处理间单株总干物质的差异是由地上部干物质的差异所引起的,地上部干物质在同一灌水水平下表现为 $T7>T6>T2$ 并且 $T3>T1$,表明其随着施氮量的增加而显著增加,在同一施氮量下表现为 $T5>T3>T7$,但 3 个处理间无显著差异,表明地上部干

物质质量与灌水水平的关系呈开口向下的抛物线趋势,但是灌水水平对地上部干物质质量并不显著;T1 和 T2 的地下部干物质质量显著低于其他处理,而其他处理间无显著差异,可见灌水水平对根系生长无显著影响,增施氮肥能够使根系生长良好,获得较高的地下部干物质质量;根冠比最大的是 T1,为 2.48%,其次是 T2,为 1.61%,其他处理的根冠比均显著低于 T1,这是因为处理 T1、T2 的地上部干物质质量较小,而其他处理地上部和地下部干物质积累量都处于较高水平所导致的;在水氮耦合下产量最高的是处理 T5,为 $107.43\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,是产量最低 T2 处理的 4.08 倍,在同一施氮量下 $T5>T3>T7$,表明产量与灌水水平的关系呈开口向下的抛物线趋势,在同一灌水水平下 $T6>T7>T2$ 并且 $T3>T1$,表明增施氮肥能显著提升黄瓜产量,但过量施氮后产量反而有所下降,符合报酬递减规律。

表 3 干物质积累速率的 Logistic 方程回归分析
Table 3 Logistic equation regression analysis of dry matter accumulation rate

处理 Treatment	Logistic 回归方程 Logistic regression equation	T_0	$V_{\max}$	T_1	T_2	ΔT	R^2
T1	$Y=57.1475/(1+e^{3.7976-0.0657t})$	57.8	0.94	37.8	77.9	40.1	0.9918**
T2	$Y=62.2421/(1+e^{4.1816-0.0702t})$	59.6	1.09	40.8	78.3	37.5	0.9975**
T3	$Y=356.7184/(1+e^{3.8089-0.0443t})$	86.0	3.95	56.3	115.8	59.5	0.9901**
T4	$Y=345.5220/(1+e^{3.7744-0.0466t})$	81.0	4.03	52.7	109.2	56.5	0.9754*
T5	$Y=258.3078/(1+e^{3.4888-0.0554t})$	63.0	3.58	39.2	86.7	47.5	0.9767*
T6	$Y=186.0819/(1+e^{4.5522-0.0761t})$	59.8	3.54	42.5	77.1	34.6	0.9980**
T7	$Y=258.1875/(1+e^{3.4112-0.0518t})$	65.9	3.34	40.4	91.2	50.8	0.9750*

注: T_1 :快速累积期起始时间(d); T_2 :快速累积期结束时间(d); ΔT :快速累积期持续时间(d); T_0 :最大累积速率出现时间(d); $V_{\max}$:最大累积速率($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)。*表示相关性在 $\alpha=0.01$ 水平上差异显著;*表示相关性在 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著,下同。

Note: T_1 : Start time of the rapid accumulation period (d); T_2 : End time of the rapid accumulation period (d); ΔT : Rapid accumulation duration (d); T_0 : Time when the maximum accumulation rate occurs (d); $V_{\max}$: Maximum accumulation rate ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$). * indicates correlation is significantly different at $\alpha=0.01$ level, and * indicates correlation is significantly different at $\alpha=0.05$ level, the same below.

表 4 水氮耦合对沙培黄瓜根冠比、干物质及产量的影响

Table 4 Effects of water and nitrogen coupling on root-shoot ratio, dry matter, and yield of sand cultivation cucumber

处理 Treatment	单株总干物质/g Total dry weight per plant	单株地上部干物质/g Shoot dry weight per plant	单株地下部干物质/g Root dry weight per plant	根冠比/% Root shoot ratio	产量/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield
T1	53.94±4.57d	52.64±4.58d	1.30±0.21b	2.48±0.44a	30.93±2.18d
T2	59.32±4.59d	58.38±4.56d	0.94±0.03b	1.61±0.08b	26.34±1.56d
T3	233.31±13.75ab	230.39±13.53ab	2.92±0.26a	1.27±0.07b	94.61±5.99bc
T4	248.08±24.01a	245.23±23.82a	2.85±0.45a	1.16±0.18b	101.93±6.85ab
T5	234.73±8.20ab	231.73±7.94ab	3.00±0.30a	1.29±0.09b	107.43±7.51a
T6	178.20±9.70c	175.59±9.96c	2.61±0.41a	1.49±0.29b	98.40±5.04abc
T7	225.50±2.52b	222.31±2.40b	3.19±0.92a	1.44±0.42b	90.64±6.28c

注:同列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。
Note: Different letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level.

2.3 水氮耦合下沙培黄瓜生长指标与产量的相关性分析

由表 5 可知,除快速累积期起始时间 T_1 和根冠比外,其他指标间均呈极显著正相关关系,快速累积期起始时间 T_1 与各指标间呈正相关关系但均不显著,根冠比与各指标间呈负相关关系,与干物质积累量、干物质最大累积速率 $V_{\max}$ 、叶绿素 SPAD 值和产量间呈显著性负相关,表明根冠比增大时不利于干物质的积累,造成产量的下降。

通过各指标间与产量的相关系数可以看出,除快速累积期起始时间 T_1 与产量间相关不显著及根

冠比与产量呈显著负相关之外,其他指标与产量均呈现极显著正相关关系,干物质最大累积速率 $V_{\max}$ 与产量的相关系数最大,为 0.98,其次是干物质积累量,为 0.96,表明黄瓜植株的干物质积累是产量形成的基础;株高、茎粗、叶面积、叶片数、株幅、叶片叶绿素 SPAD 值均与干物质积累量和产量呈极显著正相关,尤其是叶片叶绿素 SPAD 值与干物质积累量的相关系数达到 0.95,可见,叶片叶绿素 SPAD 值可以作为预测植株干物质积累的关键指标,在适宜的水氮耦合方案下,植株生长健壮是获得较高干物质积累量的关键,从而提升了增产潜力,产量显著提高。

表 5 水氮耦合下沙培黄瓜生长指标与产量的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of cucumber growth index and yield under water and nitrogen coupling											
指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	1.00										
X_2	0.99**	1.00									
X_3	0.97**	0.95**	1.00								
X_4	0.97**	0.95**	0.93**	1.00							
X_5	0.99**	0.98**	0.98**	0.96**	1.00						
X_6	0.85**	0.83**	0.88**	0.83**	0.92**	1.00					
X_7	0.88**	0.83**	0.90**	0.86**	0.91**	0.95**	1.00				
X_8	0.92**	0.89**	0.92**	0.91**	0.95**	0.97**	0.97**	1.00			
X_9	0.52	0.45	0.58	0.61	0.60	0.71	0.73	0.64	1.00		
X_{10}	-0.60	-0.55	-0.71	-0.61	-0.67	-0.83*	-0.83*	-0.83*	-0.55	1.00	
X_{11}	0.94**	0.91**	0.92**	0.90**	0.94**	0.91**	0.96**	0.98**	0.54	-0.77**	1.00

注: X_1 :株高; X_2 :茎粗; X_3 :叶面积; X_4 :叶片数; X_5 :株幅; X_6 :叶绿素 SPAD 值; X_7 :干物质积累量; X_8 :干物质最大累积速率($V_{\max}$); X_9 :快速累积期起始时间(T_1); X_{10} :根冠比; X_{11} :产量。

Note: X_1 : Plant height; X_2 : Stem thickness; X_3 : Leaf area; X_4 : Number of leaves; X_5 : Plant width; X_6 : Chlorophyll SPAD value; X_7 : Dry matter accumulation; X_8 : Maximum dry matter accumulation rate ($V_{\max}$); X_9 : Start time of the rapid accumulation period (T_1); X_{10} : Root shoot ratio; X_{11} : Yield.

3 讨 论

水氮管理是农田管理中一个重要的理论问题,协调其关系达到最优时,就能实现低投入和高产出目标。在不同水肥调控水平下,作物不同生育阶段的生长、干物质积累、分配和产量都受到极大影响^[10-11]。杨晓珍等^[12]研究表明随着生育期的推进,黄瓜株高、茎粗及叶片数呈“单峰曲线”变化,这与本研究部分结果一致,其研究也指出叶面积呈“抛物线”型变化趋势,而本研究中叶面积随着生育期的推进呈“单峰曲线”变化,这是因为本研究叶面积动态测定的叶片是植株中上部最旺盛展开面积最大的叶片,这就减少了病虫害及叶片衰老这些因素对叶面积结果的干扰。本研究中苗期茎粗增长迅速,进入花期后茎粗的增幅较为一致,但增长速率却有一定程度上的下降,这与王蓉等^[13]的研究结果一致。李静等^[14]研究表明番茄的株高及茎粗与

水肥条件的高低呈正相关;方栋平^[15]研究也指出黄瓜株高受水肥影响显著,高水处理的株高显著大于低水处理,随着滴灌施肥比例的降低株高呈降低趋势,本研究中各项生长指标均随着施氮量的增加而增加的结果与其有相似之处;但本研究却发现灌水水平对生长的影响不显著,在全生育期内低灌水水平和高施氮量的组合能获得最好的各项生长指标,表明低灌水上限虽然会使土壤含水率处在较低水平,但并不会抑制作物的生长,这与褚丽丽等^[16]的研究结论一致。本试验中低水高氮的处理 T3 能获得最好的植株生长特性,程明瀚等^[17]通过研究温室青椒的水氮耦合效应得出低灌水下限时水氮耦合作用更佳,这与本研究结果一致。

本研究表明植株干物质积累量与灌水水平的关系呈开口向下的抛物线趋势,但是灌水水平对干物质积累量的影响并不显著,植株干物质积累量随着施氮量的增加而显著增加,杨慧等^[18]研究指出番

茄地上部生物量理论最大值随着灌水量和施氮量的增加呈先增加后减小的趋势,这与本研究结果有相似之处,但存在一定的出入,原因可能是因为本试验选用营养元素匮乏的沙子作为基质,黄瓜对氮肥的依赖性较大所导致。王丽英等^[19]的研究表明日光温室冬春茬黄瓜生育期的茎、叶、果实干物质积累呈“S”形曲线。水氮供应对植株干物质积累与分配的影响主要表现在叶片、茎和果实的积累上,对根系干物质积累没有显著影响,这与本试验结果有相似之处。本研究同时表明在充足的氮肥供应下,提高灌水水平可以促进植株的花芽分化,增大开花量,这与刘小刚等^[20]的研究结果相似。产量与灌水水平和施氮量间的关系均呈开口向下的抛物线趋势,施氮量对产量的影响大于灌水因素,施氮量或灌水水平过高后产量反而有所下降,符合报酬递减规律,适宜灌水水平下增施氮肥才能获得较高的产量,这与已有研究结果^[21-22]一致,但张新燕等^[23]研究表明灌水因素对番茄产量的影响大于施肥因素,这可能是由于试验设计及栽培基质不同所导致的。

本研究通过对黄瓜生长发育各项指标的相关性分析发现,根冠比增大时不利于干物质的积累,造成产量的下降,这与马国礼等^[24]的研究结果一致。同时本研究指出在适宜的水氮耦合方案下,植株生长健壮是获得较高干物质积累量的关键,从而提升了增产潜力,产量显著提高,这与前人的研究结果相似^[14]。叶片 SPAD 值和叶片干物质积累量与追施氮肥量的相关性最高^[25],叶片叶绿素 SPAD 值可以作为预测植株干物质积累的关键指标。综合考虑植株生长状况、干物质积累与分配、干物质最大增长速率及其出现时间、干物质快速累积期开始时间及持续时间、根冠比和产量这些因素,T5 为表现最好的处理,但其施氮量为 $1\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,违背了农业生产中低投入高产出的目标,反观灌水水平和施氮量较为适中的 T4,其能够保持较好的植株生长特性,干物质积累量也较高,同时其产量仅次于 T5,为 $101.93\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此本研究推荐灌水水平为 80.20%,施氮量为 $623\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水氮运筹方案为最适方案。

4 结 论

1) 65% 的灌水水平虽然会使土壤含水率处在较低的水平,但并不会抑制黄瓜的生长,增施氮肥能显著提升各项生长指标对应值,T3 处理即灌水水平为 65%,施氮量为 $1\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水氮运筹方案

能获得最好的植株生长特性;

2) 植株干物质积累量随着施氮量的增加而显著增加,植株干物质积累量与灌水水平的关系呈开口向下的抛物线趋势,但是灌水水平对干物质积累量的影响并不显著;

3) 叶片叶绿素 SPAD 值可以作为预测植株干物质积累的关键指标,在适宜的水氮耦合方案下,植株生长健壮是获得较高干物质积累量的关键,从而提升了增产潜力,黄瓜产量显著提高;

4) 综合考虑植株生长状况、干物质积累与分配、干物质最大累积速率及其出现时间、快速累积期开始时间及持续时间、根冠比和产量这些因素,T5 为表现最好的处理,但其施氮量高达 $1\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,违背了农业生产中低投入高产出的目标,反观灌水水平和施氮量较为适中的 T4,其能够保持较好的植株生长特性,干物质积累量也较高,同时其产量仅次于 T5,为 $101.93\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此本研究推荐灌水水平为 80.20%,施氮量为 $623\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水氮运筹方案为最适方案。

参 考 文 献:

- [1] 赵云霞,裴红霞,高晶霞,等.日光温室蔬菜沙培技术研究进展[J].北方园艺,2013,(24):203-206.
ZHAO Y X, PEI H X, GAO J X, et al. Research progress on vegetable sand culture technology in solar greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2013,(24): 203-206.
- [2] 沈富,哈婷,李建设,等.痕量灌溉管不同埋深对日光温室沙培黄瓜的影响[J].广东农业科学,2014,41(23):26-30.
SHEN F, HA T, LI J S, et al. Effects of trace irrigation pipe depth on cucumber cultured in sand in solar greenhouse[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(23): 26-30.
- [3] 王泽,李治勤,晏清洪,等.不同滴灌形式对沙培黄瓜生长、品质及产量的影响[J].北方园艺,2019,(11):66-71.
WANG Z, LI Z Q, YAN Q H, et al. Effect of different drip irrigation methods on growth, quality and yield of cucumber in sand culture[J]. Northern Horticulture, 2019,(11): 66-71.
- [4] 谷端银,王秀峰,杨凤娟,等.纯化腐植酸对低氮胁迫下黄瓜幼苗生长及养分吸收的影响[J].应用生态学报,2016,27(8):2535-2542.
GU D Y, WANG X F, YANG F J, et al. Effects of purified humic acid on growth and nutrient absorption of cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings under low nitrogen stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2535-2542.
- [5] 王倡宪,肖龙.不同氮形态对沙培黄瓜幼苗生长及养分吸收的影响[J].北方园艺,2015,(1):8-11.
WANG C X, XIAO L. Effect of different nitrogen forms on growth and nutrients uptake of cucumber seedlings in sand culture[J]. Northern Horticulture, 2015,(1): 8-11.
- [6] 蔡焕杰,康绍忠,张振华,等.作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J].农业工程学报,2000,16(3):24-27.
CAI H J, KANG S Z, ZHANG Z H, et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(3): 24-27.

- [7] 邹志荣,李清明,贺忠群.不同灌溉上限对温室黄瓜结瓜期生长动态、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2005,21(z2):77-81.
ZOU Z R, LI Q M, HE Z Q. Effects of different irrigation maximums on growth dynamics, yield and quality of cucumber during fruit-bearing stage in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(z2): 77-81.
- [8] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究IV.农田养分平衡的评价方法和原则[J].土壤通报,1996,(5):197-199.
LU R K, LIU H X, WEN D Z, et al. Research on nutrient cycle and balance of agricultural ecosystem in typical regions of my country IV. Evaluation methods and principles of farmland nutrient balance[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, (5): 197-199.
- [9] 张亚红,陈端生,黄晚华.日光温室黄瓜群体结构参数及群体内辐射分布分析[J].农业工程学报,2003,19(1):172-176.
ZHANG Y H, CHEN D S, HUANG W H. Analysis of architectural parameters and solar radiation distribution in cucumber canopy in sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 172-176.
- [10] 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21):70-80.
XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 70-80.
- [11] MARCELIS L F. Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47 (Special Issue): 1281-1291.
- [12] 杨晓珍,张燕,曹云娥.不同水肥供给方案对日光温室土壤栽培黄瓜的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(S2):13-18.
YANG X Z, ZHANG Y, CAO Y E. Effects of different water and fertilizer supply schemes on cucumber cultivated in solar greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(S2): 13-18.
- [13] 王蓉,马玲,杨常新,等.基于不同水肥用量优化日光温室黄瓜水肥制度[J].湖北农业科学,2020,59(10):58-63.
WANG R, MA L, YANG C X, et al. Optimizing water and fertilizer system of cucumber in solar greenhouse based on the different treatment of water and fertilizer[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(10): 58-63.
- [14] 李静,张富仓,方栋平,等.水氮供应对滴灌施肥条件下黄瓜生长及水分利用的影响[J].中国农业科学,2014,47(22):4475-4487.
LI J, ZHANG F C, FANG D P, et al. Effects of water and nitrogen supply on the growth and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4475-4487.
- [15] 方栋平.温室黄瓜对不同灌水量和滴灌施肥方式的响应机制研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2015.
FANG D P. Responding mechanism of greenhouse cucumber to different drip irrigation amount and various fertilization methods[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2015.
- [16] 褚丽丽,张忠学.氮素营养与水分胁迫对大豆产量补偿效应的影响[J].生态学报,2010,30(10):2665-2670.
CHU L L, ZHANG Z X. Effects of nitrogen nutrition and water stress on compensation effect of the yield of soybean[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2665-2670.
- [17] 程明瀚,郝仲勇,杨胜利,等.膜下滴灌条件下温室青椒的水氮耦合效应[J].灌溉排水学报,2018,37(11):50-56,68.
CHENG M H, HAO Z Y, YANG S L, et al. The interactive impact of water and nitrogen on greenhouse green pepper under film-mulched drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 50-56, 68.
- [18] 杨慧,曹红霞,柳美玉,等.水氮耦合条件下番茄临界氮浓度模型的建立及氮素营养诊断[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1234-1242.
YANG H, CAO H X, LIU M Y, et al. Simulation of critical nitrogen concentration and nitrogen nutrition index of tomato under different water and nitrogen conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(5): 1234-1242.
- [19] 王丽英,张彦才,李若楠,等.水氮供应对温室黄瓜干物质积累、养分吸收及分配规律的影响[J].华北农学报,2012,27(5):230-238.
WANG L Y, ZHANG Y C, LI R N, et al. Effects of water and nitrogen supply on dry matter accumulation, nutrient uptake and distribution in greenhouse winter-spring cucumber[J]. Acta Agriculturae Borealisinica, 2012, 27(5): 230-238.
- [20] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.
LIU X G, SUN G Z, PENG Y L, et al. Effect of water-fertilizer coupling on photosynthetic characteristics, fruit yield, water and fertilizer use of mango[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 125-133.
- [21] 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.
LI J M, PAN T H, WANG L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 82-90.
- [22] WANG X K, YUN J, SHI P, et al. Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(2): 400-415.
- [23] 张新燕,王浩翔,牛文全.水氮供应对温室滴灌番茄水氮分布及利用效率的影响[J].农业工程学报,2020,36(9):106-115.
ZHANG X Y, WANG H X, NIU W Q. Effects of water and N-fertilizer supplies on the distribution and use efficiency of water and nitrogen of drip-irrigated tomato in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 106-115.
- [24] 马国礼,张国斌,强浩然,等.水氮耦合对日光温室基质栽培辣椒生长发育、产量及品质的影响[J].甘肃农业大学学报,2018,53(1):58-64,70.
MA G L, ZHANG G B, QIANG H R, et al. Effects of water and nitrogen coupling on yield and quality of pepper[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 53(1): 58-64, 70.
- [25] 姚青青,孙健健,罗静,等.减量追施氮肥对新疆巴州棉花叶绿素含量、干物质积累及产量的影响[J].中国棉花,2021,48(5):22-25,38.
YAO Q Q, SUN H J, LUO J, et al. Effect of reduced nitrogen application on cotton chlorophyll, dry matter accumulation and yield in Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. China Cotton, 2021, 48(5): 22-25, 38.