

水氮耦合对日光温室辣椒生长、光合特性及养分分配的影响

马国礼, 张国斌, 强浩然, 张柏杨, 季磊, 李静, 苏金昌, 杜淼鑫

(甘肃农业大学园艺学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:为探究不同灌水量和氮肥施用量对保护地辣椒生长、光合特性及养分分配的影响,为辣椒生产中合理灌水和施用氮肥提供理论依据。试验设置4个氮肥水平,不施肥(F0)为对照,F1、F2、F3依次按氮肥理论利用率的150%、100%和50%进行施肥;3个基质含水率水平W1、W2、W3分别为基质最大含水率的80%、60%、40%。结果表明,在高水高肥条件下,干鲜重最大值分别为1314.02g、217.89g,株高茎粗最大值分别为193.57cm、19.57mm,均明显高于低水低肥处理;但在低水低肥处理下,辣椒的干物质积累率大于高水高肥处理,对辣椒光合荧光参数的影响主要表现为:在中、高基质含水率水平,施肥处理提高了辣椒的光能利用效率;高肥处理中辣椒的光合参数均比低肥处理中升高15%以上,降低了胞间CO₂浓度(Ci)和非光化学猝灭系数(NPQ),提高了辣椒叶片的光合作用,CO₂同化速率升高;同时,降低了叶片在光合过程中光能以其它形式的耗散。在低水条件下随着施氮量的增加,辣椒光合荧光各指标的变化与中、高基质含水率呈相反趋势。辣椒的养分分配的总趋势是:在辣椒定植前期(0~60d)各处理辣椒对氮、磷、钾的积累差异不显著。辣椒各器官的钾和除茎外的磷素的积累量逐渐增加,在定植180~210d时积累量达到最大,氮素和茎的磷素先增加后降低。且在整个生育期辣椒各器官对氮、磷、钾素的积累量总体规律一致,大小依次为:果>茎>叶>根,且含量依次为氮>钾>磷。结论:高水中肥显著促进了辣椒干鲜重、株高茎粗的生长,有利于辣椒叶片的光合和辣椒对氮、磷、钾的吸收和积累;低水高肥处理在前期对辣椒各指标影响不显著,在定植180d以后低水、高肥对辣椒的生长产生拮抗作用增强,该处理的辣椒长势最弱,不利于辣椒植株光合产物和对养分的积累。

关键词:水氮耦合;辣椒;光合特性;养分分配;日光温室

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

Effects of water and nitrogen coupling on growth, photosynthetic characteristics and nutrient allocation of pepper in solar greenhouse

MA Guo-li, ZHANG Guo-bin, QIANG Hao-ran, ZHANG Bai-yang, JI Lei, LI Jing, SU Jin-chang, DU Miao-xin
(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To explore the effects of different irrigation amount and nitrogen fertilizer application on the growth, photosynthetic traits and nutrient distribution of pepper in protected field, and to provide theoretical basis for proper irrigation and nitrogen application in pepper development. F1, F2, F3 was 150%, 100% and 50% nitrogen fertilizer respectively of the theoretical utilization rate. And no fertilization (F0) was used as CK. W1, W2 and W3 of the three substrates were 80%, 60% and 40% of the maximum water content of the substrate respectively. The results show that: Under the condition of high water and high fertilizer, the maximum value of dry and fresh weight was 1314.02g and 217.89g. The maximum values of stem diameter and plant height were 193.57cm and 19.57mm, which were significantly higher than those of low water and low fertilizer treatments. However, under the condition of low water and low fertilizer, the dry matter accumulation rate of pepper was higher than that of high water and high fertilizer, the effect on pepper's photosynthetic fluorescence parameters was as follows: In medium and high basal water content level, fertilizer application increased the light utilization efficiency of pepper. the photosynthetic pa-

rameters of pepper in high fertilizer treatment increased by more than 15% compared to low fertilizer treatment. The intercellular CO_2 concentration (C_i) and the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) were decreased, and the photosynthesis and CO_2 assimilation rate were increased. At the same time, it reduces the dissipation of light energy in other forms during photosynthesis. Under low water condition, the changes of photosynthetic fluorescence of pepper showed an opposite trend with the increase of the water content of medium and high substrate, with nitrogen application rate increasing. The general trend of nutrient distribution in pepper was: there was no significant difference in the accumulation of N, P and K under different treatments in pepper during the pre-planting period (0~60 d). The accumulation of potassium and phosphorus in all the organs except phosphorus in stem of pepper increased gradually, and reached the maximum at 180~210 d after planting. The nitrogen in all organs and phosphorus of stem increased first and then decreased. The order of accumulation of N, P and K in different organs of pepper was as follows: fruit> stalk> leaf> root; and the content from high to low was: nitrogen> potassium> phosphorus in the whole growth period. Conclusion: High-water medium fertilizers significantly promoted the growth of dry weight, plant height and stem diameter of pepper, which was beneficial to the photosynthesis of pepper leaves and the uptake and accumulation of N, P and K. The effect of low-water high fertilizer treatment on pepper was not significant in the beginning. Significantly, 180 days after colonization, low water and high fertilizer had an antagonistic effect on the growth of pepper. The growth of pepper was the weakest under this treatment, which was disadvantageous to the photosynthates and the accumulation of nutrient.

Keywords: water and nitrogen coupling; hot pepper; photosynthetic characteristics; nutrient distribution; solar greenhouse

辣椒 (*Capsicum annuum*. L), 又名番椒、海椒、辣子、辣茄等, 属茄科 (Solanaceae) 辣椒属 (*Capsicum*), 原产于南美和墨西哥等中美洲热带地区, 是 1 年或多年生草本植物。因其营养丰富、味道鲜美而在世界各地广泛栽培, 产量在茄科蔬菜中仅次于番茄^[1]。

据调查在目前的设施生产中每公顷菜田灌水定额为 9000~12000 m^3 , 但水分的利用率却只有 40%^[2]。在灌水量相当大的前提下, 施肥量也是骤增, 尤其是对氮肥的施用。同时有研究表明, 作物生长时土壤水分亏缺, 会导致气孔导度、蒸腾速率及光合速率的下降, 而施氮能减轻干旱对作物生长和光合的抑制作用, 进而影响作物干、鲜重和株高、茎粗^[3]。随着氮肥施用量的增加, 辣椒营养生长旺盛, 株高等明显增加^[4], 不同灌水量和施用氮素的量对甜瓜氮素的吸收和利用影响显著^[5-8]。前人主要研究都集中在大田蔬菜和日光温室的单一水或肥对辣椒的影响, 对日光温室基质栽培的灌水和施氮量两因素同时作用于辣椒的研究相对较少。本试验拟通过不同的灌水量和施氮量明确保护地基质栽培条件下, 不同水氮耦合对辣椒生长生理、光合荧光和养分吸收的影响, 为辣椒生产中合理灌水和施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

甘肃省酒泉市肃州区, 属于典型的大陆性季风气候, 年平均降雨量 176mm, 年均蒸发量 2819.6mm, 全年无霜期 140d, 常年稳定 10℃ 以上的活动积温为 2 220~3 490℃, 年日照时数 3 033.4~3 316.5 h。从 2007 年开始, 酒泉市肃州区依托中国农业科学院蔬菜花卉研究所的科技力量和研究开发的有机生态型无土栽培技术, 积极发展非耕地日光温室蔬菜产业。目前, 酒泉市非耕地日光温室推广面积达 825 hm^2 ^[9]。本实验于 2015-8-30~2016-5-26 在酒泉市肃州区总寨非耕地农业产业示范园区温室内进行。

1.2 试验材料

1.2.1 供试试验材料 供试作物为辣椒, 由甘肃省农科院选育, 品种为“陇椒 10 号”。采用育苗移栽的方式进行播种, 于 2015 年 8 月 30 日进行定植。定植后浇一次缓苗水。隔 10d 后进行正常的水肥处理, 每 1~3d 灌一次水(保证基质含水率在实验设计水平), 灌水时的灌水量由水表来控制。每 15d 追施尿素一次。本试验采用膜下滴灌的灌溉方式, 施肥时把肥料溶解在桶中, 按穴每株进行浇施。

1.2.2 供试肥料基肥 过磷酸钙(P_2O_5 17%)、尿素(N46.4%)、硫酸钾(K_2O 51%); 追肥与基肥相同。

1.3 施肥量确定原则

1.3.1 确定理论养分需求量 辣椒预期 667m²产量为 5000kg, 计算 5000kg/667m²辣椒需养分量: 按照每生产 1000kg 辣椒, 需氮 (N) 5.2 kg, 磷 (P₂O₅) 1.404kg、钾 (K₂O) 7.02kg, 辣椒对“三要素”吸收规

律为钾>氮>磷。计算共需 N 26kg、P₂O₅ 7.02kg、K₂O 35.1kg。

1.3.2 测定基质中养分含量 基质配方: 玉米秸秆: 牛粪: 菇渣: 炉渣=2.5: 2.0: 2.0: 3.5 (V: V) 理化性质如表 1 所示。

表 1 基质基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested substrate

容重 Bulk density /(g · cm ⁻³)	全氮 Total N /(mg · kg ⁻¹)	碱解氮 Available N /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	EC /(μS · cm ⁻¹)
0.55	1302	476	160.3	905.9	7.68	2.25

1.3.3 确定田间试验施肥量 依据目标产量养分需求量, 参照基质中养分含量结合当地实际情况, 拟定田间施肥量, 磷、钾肥施用量为当地施肥量。氮肥基肥施用尿素 (高、中、低肥分别为 59.82kg · 667m⁻²、39.88kg · 667m⁻²、19.94kg · 667m⁻²)。追肥用量: 高、中、低肥分别为 139.51kg · 667m⁻²、93.00kg · 667m⁻²、46.50kg · 667m⁻², 共追施 14 次, 各处理尿素的追施量如表 2 所示。

表 2 辣椒追肥用量

Table 2 Pepper fertilizer dosage

处理 Treatment	施肥量 amount of fertilizer/(kg · 667m ⁻² · 次 ⁻¹)		
	N/(kg · 667m ⁻²)	P/(kg · 667m ⁻²)	K/(kg · 667m ⁻²)
W1F0	0	0	0.24
W1F1	9.97	0	0.24
W1F2	6.64	0	0.24
W1F3	3.32	0	0.24
W2F0	0	0	0.24
W2F1	9.97	0	0.24
W2F2	6.64	0	0.24
W2F3	3.32	0	0.24
W3F0	0	0	0.24
W3F1	9.97	0	0.24
W3F2	6.64	0	0.24
W3F3	3.32	0	0.24

1.4 试验设计

本试验设有灌水量和施肥量两个因素, 灌水量设有三个梯度 W1、W2 和 W3, 其中 W1 为田间持水量的 80%, W2 为田间持水量的 60%, W3 为田间持水量的 40%; 施肥量设有四个梯度 F0、F1、F2、F3。其中 F0 为不施肥处理, F1 为在 F2 基础上上调 50%, F2 为根据目标产量计算的施肥量, 目标产量为 5000kg · 667m⁻²。F3 在 F2 的基础上下调 50%。试验采用随机区组排列, 三次重复, 每槽为一个小区, 共种植 36 槽。试验中选择大小一致, 无病虫害, 生长健壮的辣椒幼苗进行定植。试验中每个小区面积为 4.26m²。每小区种植辣椒 2 行, 每小区种植辣椒 38 株, 水肥组合如表 3 所示。

1.5 测定项目和方法

干鲜重: 破坏性试验测定植株干鲜重, 每次取样后, 随机选取 3 株样品分别称量其根、茎、叶、果鲜重后, 于 105℃ 下杀青 30min, 80℃ 烘至恒重, 再次称量其干重。

株高、茎粗: 株高采用卷尺测定辣椒茎基部至生长点的高度, 茎粗采用数显卡尺测定茎基部的直径。

表 3 辣椒水肥处理组合

Table 3 Treatment combinations of water and fertilizer

处理 Treatment	田间持水量的 80% (W1) 80% of field water holding capacity	田间持水量的 60% (W2) 60% of field water holding capacity	田间持水量的 40% (W3) 40% of field water holding capacity
不施氮肥 (F0) No nitrogen fertilizer	W1F0	W2F0	W3F0
F1 (1.5F2)	W1F1	W2F1	W3F1
由目标产量得到施肥量 (F2) Get the amount of fertilizer from the target production	W1F2	W2F2	W3F2
F3 (0.5F2)	W1F3	W2F3	W3F3

注: 氮肥, 尿素 (总氮 ≥ 46.4%); 钾肥, 硫酸钾 (K₂SO₄ ≥ 51%); 磷肥, 过磷酸钙 (P₂O₅ ≥ 17%)。

Note: Nitrogen fertilizer, urea (total N ≥ 46.4%); potash fertilizer, potassium sulfate (K₂SO₄ ≥ 51%); P: super phosphate (P₂O₅ ≥ 17%).

光合参数:选择晴天上午 9:00—11:00,采用 CIRAS-2 型便携式光合仪(英国 PP-System 公司生产),测定辣椒植株生长点下数第三片完全展开功能叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)及蒸腾速率(Tr)。光合仪相关参数设置: CO_2 浓度设定为 $380\mu mol \cdot mol^{-1}$,内源光强设定为 $1000\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,相对湿度设定为 75%,温度设定为 $25^\circ C$ 。

叶绿素荧光参数:采用英国 Hansatech 公司生产的 FMS-2 型脉冲调制式叶绿素荧光分析仪测定辣椒叶片的叶绿素荧光参数。叶片暗适应 30min 后测定最小荧光 F_o 和最大荧光 F_m ,光化强度为 $400\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,饱和脉冲光强度为 $8000\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。根据公式计算:

$$PS II \text{ 实际光化学效率: } \Phi_{PS II} = (F_m' - F_s) / F_m'$$

$$PS II \text{ 最大光化学效率: } F_v / F_m = (F_m - F_o) / F_m$$

$$\text{光化学猝灭系数: } qP = (F_m' - F) / (F_m' - F_o')$$

$$\text{非光化学猝灭系数: } NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$$

式中, F_o' 为光适应后的最小荧光; F_m 为光适应后的最大荧光, F_s 为光适应后的稳态荧光。

植株全氮磷钾养分含量^[10]:将烘干的辣椒植株样品粉碎过 0.1mm 的筛,测定全氮、磷、钾养分含量,均采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮。称取粉碎的植株样品 0.2g 于 150ml 三角瓶中,加浓 H_2SO_4 5ml,摇匀后再加 5 滴 30% H_2O_2 ,摇匀静置 30min,置于电热板上缓慢加热。过程中反复加入双氧水直至消煮液呈清亮色或无色后,将消煮液定容至 100ml 待用。

全氮:取 25 mL 消煮液,应用海能 K1100 型凯式定氮仪测定全氮含量。

全磷:取 5 mL 消煮液,采用磷钼蓝比色法测定,用 TU-1900 双光束紫外可见分光光度计,在波长 700 nm 下进行比色测定。

全钾:剩余消煮液,采用火焰光度法测定全钾含量。

1.6 数据处理

所有测试数据采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 新复极差法(Duncan 法)等软件进行方差分析及显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对辣椒干鲜重的影响

由表 4 可知,水肥处理对辣椒的干、鲜重均有显著影响,且干鲜重的增长趋势和产量一致。辣椒生长在高水高肥条件下,干鲜重明显高于低水低肥处理;但在低水低肥处理下,辣椒的干物质积累率大于高水高肥处理。在同一基质含水率条件下,随着施氮量的增加,辣椒的干鲜重显著高于不施氮处理并且均有增加的趋势,但均不显著,辣椒的干鲜重的积累速率均在盛果期内(180~210d)最快,鲜重积累速率最大的处理为 W2F1,最大增幅为 43.78%;干重积累最大速率处理为 W2F1,最大增幅为 41.29%。在拉秧期辣椒的干鲜重积累量达到了最大,在低水高肥条件下,辣椒生长受到胁迫使得辣椒干鲜重的积累均降低。

2.2 水氮耦合对辣椒株高、茎粗的影响

由表 5 可知,不同基质含水率和施氮量对辣椒的株高和茎粗的影响显著,随着辣椒生育期的推移,辣椒的株高和茎粗逐渐增加。在定植后前 60d,

表 4 水氮耦合对辣椒干鲜重的影响/g

Table 4 Effect of coupling of water and nitrogen on dry and fresh weight of pepper

处理 Treatment	30d		60d		180d		210d		270d		
	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight									
W1	F0	101.48 de	10.64 bc	343.85 cd	46.55 cde	468.33 cde	79.87 c	856.53 cde	123.47 cd	948.46 cd	173.83 bcd
	F1	91.45 e	9.72 bc	331.81 c	50.87 bcd	644.18 a	94.16 a	1073.03 ab	152.31 ab	1193.39 ab	212.48 a
	F2	99.27 de	10.09 bc	417.36 a	61.72 cd	626.98 a	93.56 ab	1069.22 ab	159.35 a	1171.87 ab	217.89 a
	F3	100.68 de	10.28 bc	400.56 ab	57.65 abc	586.05 a	86.67 abc	1086.05 ab	152.71 ab	1186.35 ab	212.09 a
W2	F0	128.57 abc	10.67 bc	363.83 bc	46.63 cde	506.40 bc	71.02 d	803.11 de	111.05 de	863.36 de	157.01 cdef
	F1	104.57 bcd	7.41 c	426.82 a	66.61 a	655.29 a	91.68 ab	1167.50 a	145.22 ab	1314.02 a	210.64 a
	F2	114.88 abcd	9.28 bc	359.30 bc	52.66 abcd	584.73 a	84.26 bc	1049.84 ab	139.36 bc	1147.63 ab	185.25 bc
	F3	144.26 a	10.80 bc	329.85 cd	43.17 cde	540.42 ab	67.86 de	988.25 abc	137.07 bc	1120.75 b	198.78 b
W3	F0	117.5 abcd	11.42 b	325.00 cd	42.51 de	448.07 de	57.83 f	681.08 e	91.87 f	787.58 de	123.35 e
	F1	98.61 de	9.43 bc	324.57 cd	37.09 e	493.08 bcd	60.50 ef	719.08 e	104.47 ef	770.00 e	162.50 cde
	F2	133.59 ab	14.56 a	342.48 cd	42.33 de	471.65 cde	65.62 def	736.16 e	111.30 de	939.48 cde	142.19 def
	F3	89.26 e	9.12 bc	304.32 d	41.88 de	426.72 e	63.53 def	936.56 bcd	119.57 de	1047.84 bc	128.24 de

注:同列中不同字母表示差异达 5% 显著水平,下同。Note: Different letters in the same column indicate significant at 5% level, the same below.

各处理间辣椒的株高和茎粗均无明显差异,在定植 180d 时,由于辣椒刚度过一段低温期,所以在这期间辣椒的生长和发育相对迟缓,株高差异不显著,茎粗差异显著;随着温室的温度回升,辣椒开始加快生长,在定植后 210d 时,处理中辣椒的株高和茎粗均有显著差异,株高最大值为 153.36cm,茎粗最大值为 17.56mm,均为处理 W2F1;在辣椒定植 270d 时,出现了个别处理的辣椒有返青现象,在这一阶段内各处理辣椒的地上部生长迅速,生物积累量大。贯穿整个生育期,在辣椒生长前期,基质含水率和施肥对辣椒的株高、茎粗影响不显著,从辣椒结果盛期开始(180d 后),同一基质含水率下,随着施肥量的增加株高和茎粗均增加,但低水高肥时,水分成为主要制约株高、茎粗生长的因素;在同一施肥量下,随着基质含水率的增加,辣椒的株高和茎粗呈增加趋势。

2.3 水氮耦合对辣椒光合特性的影响

2.3.1 水氮耦合对辣椒光合参数的影响 由图 1(A)可知,不同水氮耦合对辣椒蒸腾速率的影响显著;在定植 180d 时,辣椒不施肥处理的 T_r 均低于施肥处理;在低含水率处理中, W3F1 处理由于低水高肥对辣椒的生长产生了抑制 T_r 减小, W3F2 和 W3F3 处理,由于施肥量的减少,植株的 T_r 升高;其中,最高处理为 W1F2 为 $5.79\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最低处理为 W1F0 为 $4.92\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,同比增高了 17.7%。

由图 1(B)可知,在辣椒定植 180d 时,在同一基质含水率水平,随着施肥量的减小, P_n 有升高的趋势但均不显著,同时施肥处理和无肥各处理之间也

无明显差异,在本实验条件下的这一时期,氮素对辣椒 P_n 的影响大于水分对其的影响;在同一施肥量前提下,不施肥处理的 P_n 值显著均低于施肥处理,以 W1F0 为最低为 $23.65\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 施肥处理中以 W1F2、W2F3 为最高,分别为 $32.35\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $31.48\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,同比增加了 26.89%和 24.87%。表明在这一时期 W1F2、W2F3 处理的净光合速率较高,有利于干物质的积累。

由图 1(C)可知,在辣椒定植 180d 时,在同一基质含水率水平(W1、W2)下,辣椒的气孔导度随着施氮量的增加而增加的趋势,但在高水(W1)处理中随着施氮量的增加辣椒的气孔导度先升高后降低,在低水(W3)处理中,随着施氮量的增加,辣椒的气孔导度降低,且施氮处理高于不施氮处理,此时,主要的限制因素是水分,在同一施氮量水平下,中水(W2)处理中的施肥处理均高于其它处理但不显著,最高处理为 W2F1,为 $1022.5\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 相比最低处理 W3F1 增加了 25.65%。

由图 1(D)可知,辣椒 C_i 的变化趋势和 T_r 、 P_n 、 GS 的变化趋势相反, C_i 越低表明辣椒的光合速率越高,消耗细胞间 CO_2 的量越多,光合作用越强,辣椒的长势越好,其中最高处理 W3F1、W2F3,分别为 $447.75\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $447.33\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,最低处理是 W1F1,为 $378.75\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,同比分别增加了 15.41%、15.33%,在低水(W1)水平下,辣椒的胞间 CO_2 浓度随着施氮量的增加而增加;在高、中水水平下,随着施氮量的增加,辣椒胞间 CO_2 的浓度降低,在同一施氮量水平,随着灌水量的增加,辣椒的胞间 CO_2 浓度呈降低的趋势,但组间差异不显著。

表 5 水氮耦合对辣椒株高茎粗的影响

Table 5 Effects of water and nitrogen coupling on plant height and stem diameter of pepper

处理 Treatment	30d		60d		180d		210d		270d		
	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter									
W1	F0	48.79 ab	7.08 bc	68.74 abc	11.12 b	112.64 bed	13.82 abc	139.86 b	15.21 bc	168.59 bed	16.93 bed
	F1	47.84 bcd	7.08 bc	73.22 ab	11.01 b	128.34 a	14.73 abc	144.62 ab	17.60 a	171.76 bed	18.83 d
	F2	48.13 bcd	6.82 c	72.39 ab	12.14 ab	115.34 abcd	15.06 ab	152.24 a	16.35 ab	193.57 a	18.04 abc
	F3	49.25 abc	7.22 bc	72.26 ab	12.69 a	118.83 abc	14.06 abc	152.03 a	15.85 abc	178.07 ab	18.75 ab
W2	F0	52.00 a	7.53 abc	69.16 abc	11.06 b	115.07 abcd	13.48 abc	134.92 bc	15.79 abc	178.70 ab	17.04 bed
	F1	50.97 ab	6.68 c	70.93 abc	11.74 ab	122.36 ab	15.64 a	153.36 a	17.56 a	185.11 ab	19.57 a
	F2	50.21 ab	7.19 bc	75.77 a	11.24 ab	117.36 abed	13.51 abc	151.70 a	14.51 bc	177.70 ab	17.48 abed
	F3	50.35 ab	8.15 a	72.12 ab	10.69 b	112.80 bed	13.72 abc	151.88 a	15.00 bc	173.74 bc	17.15 bed
W3	F0	45.69 d	7.73 ab	67.13 bc	10.71 b	103.07 d	12.45 c	129.19 c	14.55 bc	157.14 cd	15.76 cd
	F1	46.58 cd	6.97 bc	64.30 c	10.95 b	105.87 cd	13.21 bc	128.32 c	14.34 bc	154.53 d	16.24 cd
	F2	46.42 cd	8.31 a	66.72 bc	11.90 ab	113.18 bed	14.15 abc	136.33 bc	14.77 bc	167.23 bed	16.64 bed
	F3	45.67 d	6.80 c	69.47 abc	10.99 b	111.22 bed	13.62 abc	137.78 bc	14.03 c	156.54 cd	15.46 d

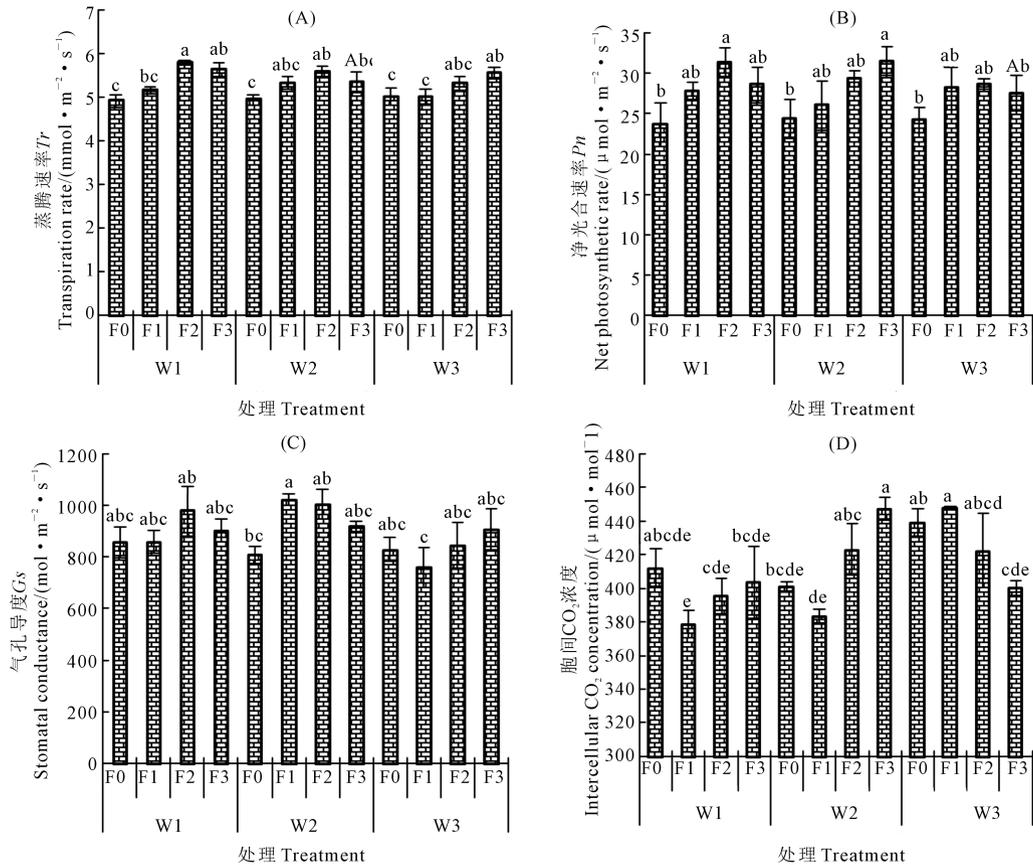


图 1 水氮耦合对辣椒光合参数的影响

Fig.1 Effect of water and nitrogen coupling on photosynthetic parameters of pepper

2.3.2 水氮耦合对辣椒荧光参数的影响 F_v/F_m 反映的是 PS II 反应中心光能的最大转换效率或 PS II 原初光能转换效率^[11-12]。

由图 2(A)可知,在辣椒定植 180d 时,在同一施氮量水平,各处理之间辣椒的 F_v/F_m 值没有显著性差异,但随着基质含水率的增加,辣椒的 F_v/F_m 值有增大的趋势,但不显著。在同一基质含水率水平,随着含氮量的增加,辣椒的 F_v/F_m 值有升高的趋势,但差异不显著,W3F1 显著低于 W1F1、W2F1,出现此现象的原因可能是低水高肥处理对辣椒的生长产生拮抗作用,降低了辣椒对强光的耐受性,使得在该水肥条件下辣椒的 F_v/F_m 值最低。

$\Phi_{PS II}$ 反映 PS II 反应中心部分关闭的情况下实际原初光能的捕获效率^[11-12],由图 2(B)可知,在辣椒定植 180d 时,在 W2 水平,随着施氮量的增加,辣椒的 $\Phi_{PS II}$ 值也呈相应增加的趋势,但在 W1、W3 水平下,随着施氮量的增加,辣椒的 $\Phi_{PS II}$ 值先增加后降低。其中辣椒的 $\Phi_{PS II}$ 值最高的处理是 W1F2,且 W3F1 处理的 $\Phi_{PS II}$ 值均显著低于 W1、W2 处理;在同一施氮量水平,F1、F2 处理随着基质含水率的增加,辣椒的 $\Phi_{PS II}$ 值增加,且在 W1、W2

处理中均显著高于 W3 处理中同一施氮量的处理。表明在 W1、W2 条件下,氮肥的施用可以提高辣椒的 $\Phi_{PS II}$ 值,且施肥量偏高时,对增大辣椒的 $\Phi_{PS II}$ 值的影响减弱。

荧光猝灭光化学猝灭系数(qP)和非光化学荧光猝灭系数(NPQ)两种, qP 表示天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的比例,反映 PS II 反应中心的开放程度;由图 2(C)可知,在辣椒定植 180d 时,在同一基质含水率水平,在 W1 水平下 W1F3 处理显著低于其它组内处理, qP 值为 0.924;在 W2 水平下,无氮处理显著低于施氮处理,最低处理是 W2F0, qP 值为 0.892;在 W3 水平,不同施氮量对辣椒 qP 值的影响无差异。在同一氮素施用量水平,F1、F2 处理随着基质含水率的变化,辣椒的 qP 有增加的趋势,但不显著。

NPQ 反映 PS II 反应中心吸收的光能无法用于光合电子传递,而以热的形式耗散掉的光能部分^[11-12]。由图 2(D)可知,在辣椒定植 180d 时,不同水氮处理对辣椒的 NPQ 值的影响显著。在同一施氮量水平,随着含水率的增加,辣椒的 NPQ 值呈降低趋势,但不显著。在同一基质含水率水平,在

W1、W2 处理辣椒的 NPQ 值随着施氮量的增加先减小后增大,且无氮处理的辣椒 NPQ 值均大于施氮处理。在 W3 水平随着施氮量的增加辣椒的 NPQ 值先升高再降低,在高、中水水平时不施氮处理不利

于辣椒叶片 PS II 反应中心对电子的吸收和转运,在低水条件下,无氮处理有利于辣椒叶片 PS II 反应中心的电子吸收和转运。

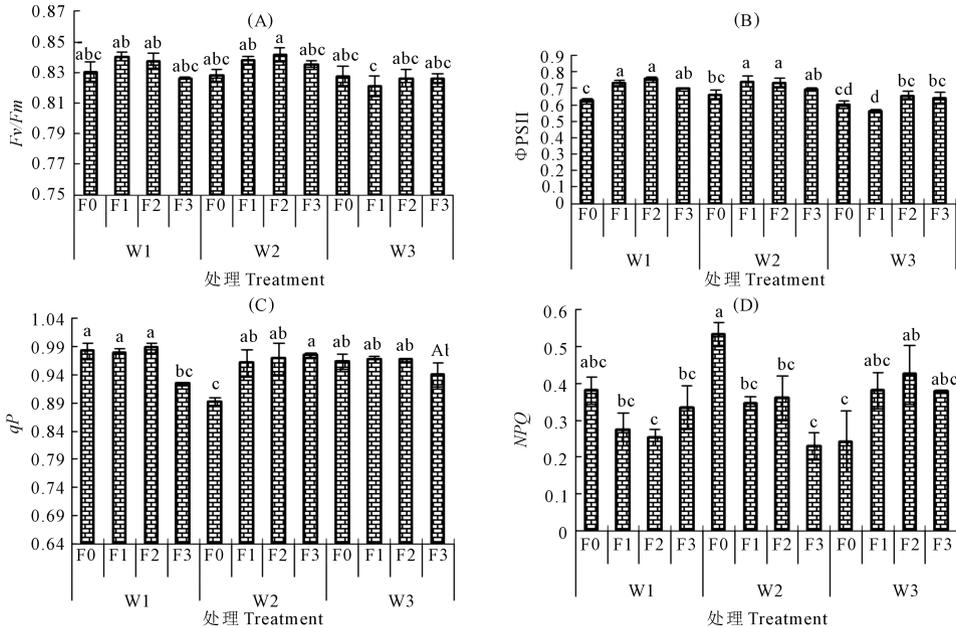


图 2 水氮耦合对辣椒荧光参数的影响

Fig.2 Effect of water and nitrogen coupling on the fluorescence parameters of pepper

2.4 水氮耦合对辣椒养分分配的影响

2.4.1 水氮耦合对氮素积累的影响

由表 6 可知,随着生育期的推移,辣椒各器官氮素的积累量逐渐增加,且在整个生育期辣椒各器官对氮素的积累量大小依次为:果>茎>叶>根。在辣椒定植 30d 时,水氮对辣椒各器官的氮素积累量的影响均显著,但对各处理总的氮素积累量的影响不显著,此时由于前期定植后,基质的含水率相对不稳定且基质中的基肥刚开始分解,各器官对氮素的积累相对缓慢,同时,辣椒不同器官氮素积累量的大小依次为:茎>叶>根。在定植 60d 时,辣椒各器官的氮素积累开始逐渐加快,各器官氮素积累量最大处理是 W1F1、W1F2、W2F1,且辣椒各器官的氮素积累量大小依次为:果>茎>叶>根;在定植 180~210d 时,辣椒对氮素积累的速率达到最大,在这一时期,辣椒茎和叶的最大氮素积累量处理均同时出现在 W1F2,根同时出现在 W2F1,而果的最大氮素积累量先后出现在 W1F2 和 W2F1,辣椒果实氮素积累量在 W2F1 处理下增加幅度比在 W1F2 处理下高 37.40%,说明在这一时期水氮处理对辣椒各器官的氮素积累量影响不一致。在辣椒定植 270d 时,辣椒各器官的氮素积累速率相对降低,同时氮素积累量达到最大,辣椒地上部各器官对氮素的吸收积累量最大处理是

W1F2,地下部最大处理是 W2F1。随着基质施氮量的增加辣椒对氮素的吸收和积累量增加,同时施氮处理显著高于不施氮处理。在同一施氮量水平下,辣椒地上部器官对氮素的吸收和积累随着基质含水率的增加并无显著变化,而地下部逐渐增加。

2.4.2 水氮耦合对磷素的积累的影响

由表 7 可知,辣椒对磷素的吸收和氮钾相似,但辣椒吸收和积累磷素的量相对于氮素和钾素较少,后期茎和叶的积累量有降低趋势,辣椒各部分积累量大小依次为:果>叶>茎>根。在辣椒定植 30d 时,水氮处理对辣椒磷素的吸收和积累的分配影响不显著,地下部积累量最大的处理是 W2F0,地上部茎、叶磷素积累量最大的处理是 W3F2;在辣椒定植 60d 时,辣椒生长开始逐渐加快,各器官对磷素的吸收和分配出现不同差异,地上部的茎、叶、果器官磷素积累量最大处理分别是 W1F3、W2F1、W2F1,分别为 $0.0109 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.117 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.071 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,地下部磷素积累量最大处理是 W1F0,为 $0.0063 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;在辣椒定植 180~210d 时,辣椒磷素的积累速率达到最大,且积累量最大的处理均集中在高、中水氮处理,同时辣椒各器官磷素积累表现出不同,茎和叶有降低的趋势,而果实和地下部的磷素积累量逐渐增加,在辣椒定植 270d 时,辣椒茎的磷素积累量降低,其它

器官的积累量增加,主要原因是,辣椒生长后期,茎的代谢速率较低,木质化程度较高,使得磷素被其它器官和组织重新利用。在同一基质含水率(W1、W2)水平,随着施氮量的增加,辣椒对磷素的吸收也相对增加,在低水处理中,随着施氮量的增加,辣椒

对磷素的吸收和积累量降低;在同一施氮量水平,施肥处理的磷素积累量显著高于无肥处理,且在辣椒生长前期随着基质含水率的提高,磷素的积累量也随之增加,但在生长中后期,含水率对辣椒磷素的积累影响不显著。

表 6 水氮耦合对辣椒氮素积累的影响/(g·kg⁻¹)
Table 6 Effect of water and nitrogen coupling on nitrogen accumulation of pepper

处理 Treatment		30d	60d	180d	210d	270d
W1F0	根 Root	0.0002 b	0.0015 abc	0.0395 bc	0.0538 bc	0.0682 c
	茎 Stem	0.0098 abc	0.0476 b	0.2491 cd	0.3238 bc	0.3561 bcd
	叶 Leaf	0.0047 cd	0.0163 b	0.0900 bc	0.1860 e	0.2104 e
	果 Fruit	—	0.0890 c	0.2308 bcd	0.4516 c	0.4727 cd
W1F1	根 Root	0.0002 b	0.0017 ab	0.0520 abc	0.0821 abc	0.1114 abc
	茎 Stem	0.0060 bc	0.0847 ab	0.3125 ab	0.4250 ab	0.4900 ab
	叶 Leaf	0.0077 b	0.0255 a	0.1165 ab	0.3133 abc	0.3619 ab
	果 Fruit	—	0.1019 bc	0.2977 ab	0.6434 ab	0.6623 abc
W1F2	根 Root	0.0002 b	0.0020 a	0.0539 abc	0.1033 a	0.1381ab
	茎 Stem	0.0064 bc	0.0609 ab	0.3321a	0.4493 a	0.5105a
	叶 Leaf	0.0081 b	0.0223 ab	0.1429 a	0.3659 a	0.3958a
	果 Fruit	—	0.1477 ab	0.3158 a	0.6620 ab	0.7960 a
W1F3	根 Root	0.0001 b	0.0020 a	0.0485abc	0.1004 a	0.1237 abc
	茎 Stem	0.0085 abc	0.0557b	0.2969 abc	0.4106 ab	0.4661 ab
	叶 Leaf	0.0080 b	0.0179 ab	0.1152 ab	0.2830 bcd	0.3382 abc
	果 Fruit	—	0.0997 bc	0.2681 abc	0.5095 bc	0.6587 abc
W2F0	根 Root	0.0005 a	0.0010 abc	0.0418 bc	0.0853 abc	0.0905 bc
	茎 Stem	0.0087 abc	0.0493 b	0.2245 de	0.2303 cd	0.3112 cd
	叶 Leaf	0.0042 d	0.0146b	0.0767 c	0.2576 cd	0.2520 cde
	果 Fruit	—	0.0932 bc	0.1985 cde	0.4562 b	0.5182 bcd
W2F1	根 Root	0.0002 b	0.0004 c	0.0651 a	0.1051 a	0.1542 a
	茎 Stem	0.0029 bc	0.1070 a	0.2943 abc	0.4433 a	0.5351 a
	叶 Leaf	0.0034 d	0.0207 ab	0.1360 a	0.3462 ab	0.3711 a
	果 Fruit	—	0.1583 a	0.2974ab	0.6743 a	0.7838 a
W2F2	根 Root	0.0001 b	0.0005 bc	0.0581 abc	0.0939 abc	0.1212 abc
	茎 Stem	0.0054 bc	0.0761 ab	0.2622 bcd	0.4057 ab	0.4830 ab
	叶 Leaf	0.0042 d	0.0193 ab	0.1128 ab	0.2843 bcd	0.3086 abcd
	果 Fruit	—	0.0997 bc	0.2525 abcd	0.5477 abc	0.6911 ab
W2F3	根 Root	0.0001 b	0.0006 bc	0.0585 ab	0.0964 ab	0.1206 abc
	茎 Stem	0.0104 ab	0.0492 b	0.2156 def	0.3628 bc	0.3943 abc
	叶 Leaf	0.0047 cd	0.0192 ab	0.0874 bc	0.2950 bcd	0.3082 abcd
	果 Fruit	—	0.1050 bc	0.1885 de	0.4807 c	0.6307 abc
W3F0	根 Root	0.0001 b	0.0012abc	0.0390 bc	0.0707abc	0.0769 c
	茎 Stem	0.0081 abc	0.0473 b	0.1647 f	0.1892 d	0.2383d
	叶 Leaf	0.0080 b	0.0143 b	0.0669 c	0.1847 e	0.2043 e
	果 Fruit	—	0.0888 c	0.1524 e	0.4065 c	0.4282 d
W3F1	根 Root	0.0003 b	0.0010 abc	0.0380 c	0.0511 c	0.0723 c
	茎 Stem	0.0042 bc	0.0515 b	0.1856 ef	0.2006 d	0.2492 cd
	叶 Leaf	0.0072 bc	0.0141 b	0.0684 c	0.2232 de	0.2362 de
	果 Fruit	—	0.0848 c	0.1425 e	0.4580 c	0.4707 cd
W3F2	根 Root	0.0001 b	0.0016 abc	0.0463 abc	0.0771 abc	0.0816 bc
	茎 Stem	0.0137 a	0.0538 b	0.2148 def	0.2581 cd	0.2833 cd
	叶 Leaf	0.0118 a	0.0143 b	0.0943 bc	0.2702 cd	0.2817 bcde
	果 Fruit	—	0.0985 bc	0.2014 cde	0.4717 c	0.4989 bcd
W3F3	根 Root	0.0001 b	0.0012 abc	0.0518 abc	0.0765 abc	0.0971bc
	茎 Stem	0.0042 bc	0.0510 b	0.1695 ef	0.2335 cd	0.2937 cd
	叶 Leaf	0.0046 cd	0.0169 ab	0.0934 bc	0.2687 cd	0.2767 bcde
	果 Fruit	—	0.0786 c	0.1896 de	0.4452 c	0.5137 bcd

表 7 水氮耦合对辣椒磷素积累的影响/(g · kg⁻¹)

Table 7 Effect of water and nitrogen coupling on phosphorus accumulation in pepper

处理 Treatment		30d	60d	180d	210d	270d
W1F0	根 Root	0.0011 bc	0.0063 a	0.0162 bc	0.0159 bc	0.0182 b
	茎 Stem	0.013 ab	0.060 bc	0.128 bc	0.093 cde	0.45 bc
	叶 Leaf	0.044 b	0.067 cd	0.078 d	0.070 e	0.114 de
	果 Fruit	—	0.059 abc	0.098 ab	0.170 abc	0.189 abc
W1F1	根 Root	0.0014 bc	0.0051 ab	0.0184 bc	0.0174 bc	0.0277 ab
	茎 Stem	0.011 abc	0.076 abc	0.184 a	0.147 a	0.085 a
	叶 Leaf	0.048 ab	0.100 abc	0.121 abc	0.103 cdee	0.175 bc
	果 Fruit	—	0.046 abc	0.118 a	0.207 a	0.232 abc
W1F2	根 Root	0.0007 c	0.0053 ab	0.0204 ab	0.0247 bc	0.0295 ab
	茎 Stem	0.012 abc	0.095 ab	0.143 b	0.113 bc	0.065 ab
	叶 Leaf	0.050 ab	0.127 a	0.152 a	0.159 a	0.226 a
	果 Fruit	—	0.064 abc	0.123 a	0.214 a	0.241 ab
W1F3	根 Root	0.0007 c	0.0048 abc	0.0149 bc	0.0358 a	0.0380 a
	茎 Stem	0.011 abc	0.0109 a	0.128 bc	0.113 bc	0.075 ab
	叶 Leaf	0.051 ab	0.098 abc	0.133 ab	0.144 ab	0.180 abc
	果 Fruit	—	0.044 bc	0.121 a	0.207 a	0.217 abc
W2F0	根 Root	0.0033 a	0.0048 abc	0.0177 bc	0.0185 bc	0.0217 ab
	茎 Stem	0.012 abc	0.057 bc	0.098 cde	0.076 de	0.032 c
	叶 Leaf	0.046 b	0.082 bcd	0.082 d	0.100 cde	0.122 de
	果 Fruit	—	0.040 bc	0.077 bc	0.136 cde	0.198 abc
W2F1	根 Root	0.0016 abc	0.0025 bc	0.0245 a	0.0217 bc	0.0289 ab
	茎 Stem	0.007 c	0.088 abc	0.117 bcd	0.146 a	0.066 ab
	叶 Leaf	0.039 b	0.117 a	0.124 ab	0.120 bc	0.153 ab
	果 Fruit	—	0.071 a	0.117 a	0.212 a	0.266 a
W2F2	根 Root	0.0009 bc	0.0024bc	0.0184 bc	0.0214 bc	0.0237 ab
	茎 Stem	0.011 abc	0.084 abc	0.099 cde	0.128 ab	0.052 bc
	叶 Leaf	0.042 b	0.107 ab	0.119 abc	0.111 cd	0.140 bc
	果 Fruit	—	0.042 bc	0.097 ab	0.190 ab	0.242 ab
W2F3	根 Root	0.0008 bc	0.0017 c	0.0172 bc	0.0243 b	0.0291 ab
	茎 Stem	0.014 ab	0.056 c	0.074 e	0.129 ab	0.065 ab
	叶 Leaf	0.053 ab	0.073 cd	0.084 d	0.107 cd	0.145 cd
	果 Fruit	—	0.048 abc	0.074 bc	0.163 bcd	0.237 ab
W3F0	根 Root	0.0007 c	0.0032 abc	0.0129 c	0.0178 bc	0.0224 ab
	茎 Stem	0.013 abc	0.051 c	0.068 e	0.066 e	0.052 bc
	叶 Leaf	0.058 ab	0.061 cd	0.074 d	0.079 de	0.102 e
	果 Fruit	—	0.054 abc	0.060 cd	0.110 e	0.156 c
W3F1	根 Root	0.0027 ab	0.0029 bc	0.0146 bc	0.0148 c	0.0171 b
	茎 Stem	0.009 bc	0.063 bc	0.079 e	0.100 bcd	0.044 bc
	叶 Leaf	0.048 ab	0.069 cd	0.106 bcd	0.096 cde	0.129 de
	果 Fruit	—	0.047 abc	0.047 d	0.170 abc	0.193 abc
W3F2	根 Root	0.0013 bc	0.0042 abc	0.0139 c	0.0198 bc	0.0199 b
	茎 Stem	0.016 a	0.059 bc	0.083 de	0.97 bede	0.054 abc
	叶 Leaf	0.067 a	0.074 bcd	0.090 cd	0.93 cde	0.130 de
	果 Fruit	—	0.044 bc	0.077 bc	0.114 e	0.216 abc
W3F3	根 Root	0.0009 bc	0.0042 abc	0.0131 bc	0.0180 bc	0.0188 b
	茎 Stem	0.009 bc	0.063 bc	0.082 de	0.092 cde	0.054 abc
	叶 Leaf	0.047 b	0.079 bcd	0.080 d	0.098 cde	0.113 de
	果 Fruit	—	0.033 c	0.066 cd	0.125 de	0.175 bc

2.4.3 水氮耦合对钾素积累的影响 由表 8 可知,辣椒对钾素的吸收积累和对磷的吸收规律一致,呈逐渐增加的趋势,随着辣椒生育期的推移,基质中的钾肥被可辣椒吸收利用的量逐渐降低,在定植 30d 时,水肥处理对辣椒各器官吸收和积累钾素的

影响均不显著,在定植 60d 时,施用氮肥和不施用的处理差异显著,高、中水处理之间无明显差异,但均比低水处理吸收和积累的钾素多,且钾素的积累量由大到小是:果>叶>茎>根。其中根的全钾积累最大处理为 W1F0,说明在水分充足养分缺乏的条件下

辣椒的根系发育相对较快以保证植物所需的养分吸收;地上部的茎、叶、果的最大积累处理是 W2F1、W1F2、W2F1。各器官钾素积累量最小的处理主要集中在低水、无肥或高肥的处理。在辣椒定植 180d 至

210d 时,辣椒各器官的钾素积累速率均达到最大,地上部的最小钾素积累的处理和地下部的最大积累量的处理均分布在低水高肥和无肥处理中,说明在这一阶段水分是限制辣椒各器官钾素积累的主要原因,而

表 8 水氮耦合对辣椒钾素积累的影响/(g·kg⁻¹)

Table 8 Effects of water and nitrogen coupling on potassium accumulation of pepper

处理 Treatment		30d	60d	180d	210d	270d
W1F0	根 Root	0.003 b	0.014 a	0.051 ab	0.044 b	0.034 bc
	茎 Stem	0.059 ab	0.221 c	0.383 ab	0.436 abcd	0.485 abc
	叶 Leaf	0.181ab	0.194 d	0.324 c	0.366 c	0.434 c
	果 Fruit	—	0.276 b	0.667 bcd	0.913 c	0.998 c
W1F1	根 Root	0.006 ab	0.007 bc	0.083 a	0.022 c	0.017 c
	茎 Stem	0.062 ab	0.266 abc	0.502 a	0.543 ab	0.570 abc
	叶 Leaf	0.182 ab	0.329 a	0.486 abc	0.525 abc	0.900 ab
	果 Fruit	—	0.273 b	0.717 abcd	1.203 abc	1.496 abc
W1F2	根 Root	0.002 b	0.010 abc	0.058 ab	0.028 bc	0.058 abc
	茎 Stem	0.054 ab	0.296 abc	0.520 a	0.580 a	0.645 ab
	叶 Leaf	0.189 ab	0.392 a	0.637 a	0.682 a	0.884 ab
	果 Fruit	—	0.336 ab	0.891 ab	1.278 ab	1.554 ab
W1F3	根 Root	0.002 b	0.011 ab	0.040 b	0.064 a	0.068 abc
	茎 Stem	0.076 a	0.384 ab	0.463 a	0.527 abc	0.576 abc
	叶 Leaf	0.206 ab	0.303 abc	0.538 abc	0.588 ab	0.684 abc
	果 Fruit	—	0.291 b	0.819 abc	1.098 abc	1.223 abc
W2F0	根 Root	0.012a	0.009 abc	0.058 ab	0.039 b	0.083 ab
	茎 Stem	0.041 b	0.325 abc	0.379 ab	0.416 abcd	0.432 abc
	叶 Leaf	0.235 ab	0.227 bed	0.386 c	0.494 abc	0.569 bc
	果 Fruit	—	0.358 ab	0.633 ede	0.957 bc	1.073 bc
W2F1	根 Root	0.004b	0.005 bc	0.060 ab	0.028 bc	0.040 bc
	茎 Stem	0.045 b	0.415 a	0.510 a	0.599 a	0.701 a
	叶 Leaf	0.170 b	0.314 ab	0.648 a	0.672 a	1.006 a
	果 Fruit	—	0.468 a	0.925 a	1.329 a	1.597 a
W2F2	根 Root	0.003b	0.004 d	0.083 a	0.031 bc	0.024 bc
	茎 Stem	0.063 ab	0.322 abc	0.462 a	0.554 a	0.629 ab
	叶 Leaf	0.185 ab	0.295 abc	0.588 ab	0.629 ab	0.810 a
	果 Fruit	—	0.308 b	0.712 abcd	1.117 abc	1.381 abc
W2F3	根 Root	0.002b	0.004 d	0.063 ab	0.039 b	0.049 abc
	茎 Stem	0.076 a	0.265 abc	0.352 b	0.393 abcd	0.484 abc
	叶 Leaf	0.238 ab	0.214 cd	0.483 abc	0.608 ab	0.621 ab
	果 Fruit	—	0.319 ab	0.52 de	1.176 abc	1.289 abc
W3F0	根 Root	0.002 b	0.006 bcd	0.032b	0.031 bc	0.100 a
	茎 Stem	0.066 ab	0.232 bc	0.280 b	0.292 d	0.320 c
	叶 Leaf	0.240 ab	0.157 d	0.369 c	0.382 c	0.501 abc
	果 Fruit	—	0.293 b	0.424 e	0.939 bc	0.943 bc
W3F1	根 Root	0.008 ab	0.006 bcd	0.040 b	0.039 b	0.040 bc
	茎 Stem	0.042 b	0.191 c	0.209 b	0.291 d	0.345 bc
	叶 Leaf	0.172 b	0.170 d	0.415 bc	0.457 bc	0.676 abc
	果 Fruit	—	0.231 b	0.416e	0.861 c	0.97c
W3F2	根 Root	0.004 b	0.009 abcd	0.053 ab	0.036 bc	0.029 bc
	茎 Stem	0.066 ab	0.196 c	0.263 b	0.313 cd	0.346 bc
	叶 Leaf	0.252 a	0.187 d	0.400 bc	0.509 abc	0.490 abc
	果 Fruit	—	0.271 b	0.567 de	0.891 c	0.966c
W3F3	根 Root	0.002 b	0.011 abc	0.043 b	0.034 bc	0.045 abc
	茎 Stem	0.049 ab	0.258 bc	0.287 b	0.325 bed	0.340 bc
	叶 Leaf	0.195 ab	0.186 d	0.364 c	0.497 abc	0.469 abc
	果 Fruit	—	0.224 b	0.485 de	0.934 bc	0.996c

在 W3F1 处理辣椒果的钾素积累量显著低于高、中水处理。当在辣椒定植 270d 时,由于这一阶段辣椒进入生长后期,根部组织最先衰老,木质化加重,辣椒的生长相对缓慢,使得植株从基质中吸收钾素的能力下降,钾素积累速率相对降低,辣椒的地上部积累量最大的处理是 W2F1,地下部为 W3F0;在辣椒整个生育期内,辣椒地下部钾素的积累呈现先增加后降低的趋势,到 180d 时达到最大,随着辣椒盛果期的推移,地下部钾素积累量逐渐降低,主要原因是营养从“源”到“库”的转移。

3 讨 论

在辣椒生产中,株高、茎粗、干鲜重是反映植株生长势的重要指标,良好的营养生长是产量形成的基础和关键^[13],在本实验条件下,贯穿整个生育期,在辣椒生长前期,基质含水率和施肥对辣椒的株高、茎粗影响不显著,从辣椒结果盛期开始(180d 后),同一基质含水率下,随着施肥量的增加株高和茎粗均增加,但低水高肥时,水分成为主要制约株高、茎粗生长的因素;在同一施肥量下,随着基质含水率的增加,辣椒的株高和茎粗呈增加趋势。同时辣椒生长在高水高肥条件下,干鲜重明显高于低水低肥处理;但在低水低肥处理下,辣椒的干物质积累率大于高水高肥处理,与李莎^[14]、何志学^[15]、火顺利^[16]等的研究结果一致。

光合作用速率是植物生理性状的一个重要指标,也是估测植株光合生产能力的主要依据之一,其变化除决定于植株本身的生物学特性外,还受外界环境因素的影响。结果发现^[17],干旱条件下辣椒的光合色素下降幅度不大,复水后光合速率恢复较快,非光化学淬灭参数和保护酶活性大幅度上升,气孔导度和蒸腾速率显著下降^[18]。在本实验条件下:在中、高基质含水率水平,施肥处理提高了辣椒的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(C_s)、实际光化学效率($\Phi_{PS II}$)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和以及光化学淬灭系数(qP),降低了胞间 CO_2 浓度(C_i)和非光化学淬灭系数(NPQ),提高了辣椒叶片的光合作用, CO_2 同化速率升高;同时,降低了叶片在光合过程中光能以其它形式的耗散。在低水条件下随着施氮量的增加,辣椒光合荧光各指标的变化与中、高基质含水率呈相反趋势。

研究发现,土壤水分含量影响氮肥施用效果^[19]。当土壤含水量增加时,作物吸收氮量提高,

且随氮肥施用量的增加而提高,同时也提高了氮肥利用率^[20]。在本实验条件下,不同水氮处理对辣椒氮、磷、钾元素的吸收积累量的影响分别为:一是随着质施氮量的增加辣椒对氮素的吸收和积累量增加,同时施氮处理显著高于不施氮处理,在同一施氮量水平下,辣椒地上部器官对氮素的吸收和积累随着基质含水率的增加并无显著变化,而地下部逐渐增加。二是在同一施氮量水平,施肥处理的磷素积累量显著高于不施氮处理,且在辣椒生长前期随着基质含水率的提高,磷素的积累量也随之增加,但在生长中后期,含水率对辣椒磷素的积累影响不显著。三是辣椒地下部钾素的积累呈现先增加后降低的趋势,到 180d 时达到最大,随着辣椒盛果期的推移,地下部钾素积累量逐渐降低,主要原因是营养从“源”到“库”的转移。水氮处理促进了辣椒对钾素的吸收和积累。而杨红等^[21]研究指出:在相同的水肥条件下 N 和 K 的含量依次为叶>果>茎,而 P 的含量则是果>叶>茎,与本试验结果有差异,其原因是测定的时期和处理设置不同导致。

4 结 论

1) 水氮耦合对辣椒干物质积累、株高、茎粗的影响显著。且中高水(W1、W2)水平,均较低水的各氮肥水平有促进作用,施氮处理比不施氮处理的促进作用更加明显;干鲜重积累量最大的处理均为 W2F1;在定植后 210d 时,处理中辣椒的株高和茎粗均有显著差异,株高最大值为 153.36cm,茎粗最大值为 17.56mm,均为处理 W2F1。

2) 水氮耦合对辣椒光合特性的影响显著。对辣椒光合荧光参数的影响主要表现为:在中、高基质含水率水平,W1F2、W2F1 的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、实际光化学效率($\Phi_{PS II}$)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m),较其它各处理为最高,且随着施氮量的增加而升高,胞间 CO_2 浓度(C_i)和非光化学淬灭系数(NPQ)随着施氮量的增加有降低的趋势但不显著,在低水条件下随着施氮量的增加,辣椒光合荧光各指标的变化与中、高基质含水率呈相反趋势。

3) 水氮耦合对辣椒养分吸收和分配的影响显著。水氮耦合处理对辣椒养分的吸收和积累有促进作用,辣椒对氮、磷、钾三种元素吸收积累均最大的处理为 W2F1,在辣椒定植前期(0~60d)各处理辣椒对氮、磷、钾的积累并无显著差异。辣椒各器

官的钾和除茎外的磷素的积累量逐渐增加,在定植180~210d时积累量达到最大,氮素和茎的磷素先增加后降低。且在整个生育期辣椒各器官对氮的积累量总体规律大小依次为:果>茎>叶>根;磷、钾素积累的总规律为:果>叶>茎>根,且辣椒对氮、磷、钾吸收积累的总量依次为:氮>钾>磷。对氮素在辣椒生长各时期养分分配的影响不一致,对磷、钾元素的影响相对一致。

参考文献:

- [1] 赵海燕. 线辣椒主要性状的动态变化及其相关性研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [2] 董文章,丁海凤. 中国蔬菜产业发展的机遇与挑战[J]. 世界农业,2003,(2):7-9.
- [3] 郑睿,康绍忠,胡笑涛,等. 水氮处理对荒漠绿洲区酿酒葡萄光合特性与产量的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(4):133-141.
- [4] 徐晓燕. 钾、氮肥配施对青椒效应的研究[J]. 土壤通报,1998,29(3):123-125.
- [5] Castellanos M T, Cabello M J, Cartagena M C. Nitrogen uptake dynamics, yield and quality as influenced by nitrogen fertilization in 'Piel de sapo' melon[J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2012,10(3):756-767.
- [6] 薛亮,马忠明,杜少平. 水氮耦合对绿洲灌区土壤硝态氮运移及甜瓜氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):139-147.
- [7] 胡国智,冯炯鑫,张炎,等. 施氮对甜瓜干物质积累、分配及产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014,(1):29-32.
- [8] 牛在垒,刘建辉,杜军志,等. 不同氮钾供肥量对厚皮甜瓜产量和品质的影响[J]. 北方园艺,2008,(10):8-12.
- [9] 殷学云,张国森. 酒泉市非耕地日光温室的效益及发展前景. 中国蔬菜,2015,(3):5-7.
- [10] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [11] 潘瑞炽. 植物生理学(第五版)[M]. 北京:高等教育出版社,2004:45-48.
- [12] 王月福,于振文. 氮素营养水平对冬小麦氮代谢关键酶活性变化和籽粒蛋白质含量的影响[J]. 作物学报,2002,28(6):743-748.
- [13] 宋慧,冯佰利,高小丽,等. 不同品种(系)小豆花后干物质积累与转运特性[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(10):94-100.
- [14] 李莎. 不同水氮处理对冬小麦生长、产量及品质影响的研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [15] 何志学. 氮素水平对辣椒生长生理和养分利用的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016.
- [16] 火顺利,颀建明,申磊,等. 施用高氮控释肥对辣椒生长及干物质分配的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(22):105-110.
- [17] 梁运江,谢修鸿,许广波,等. 水肥耦合对保护地辣椒叶片光合速率的影响[J]. 核农学报,2010,24(3):650-655.
- [18] 欧立军,陈波. 干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J]. 生态学报,2012,32(8):2612-2619.
- [19] Shimshi, D. The effect of nitrogen supply on transpiration and stomatal behaviour of beans (*phaseolus vulgaris*, L.) [J]. New Phytologist,1970,69(2),405-412.
- [20] Myers, R J K. Nitrogen and phosphorus nutrition of dryland grain sorghum at Katherine, Northern Territory. 1. Effect of rate of nitrogen fertilizer [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture,1978,18(93):76-92.
- [21] 杨红,姜虹,涂祥敏,等. 水肥运筹对辣椒生长和养分吸收的影响[J]. 贵州农业科学,2009,37(1):142-144.