

水肥耦合下温室番茄养分动态变化及 与生物量和产量的关系

王虎兵,曹红霞,郝舒雪,潘小燕

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院 旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:结合膜下滴灌技术,探究不同水肥耦合下温室番茄养分动态变化规律及其与生物量和产量的关系,为当地水肥管理提供理论依据。通过小区试验,灌水以 2 次灌水间隔期 $\Phi 20$ cm 标准蒸发皿的累计蒸发量 E 为基数,设置 3 个灌水量:1.0E(W1)、0.75E(W2)、0.5E(W3);设 3 个施肥水平($N-P_2O_5-K_2O$):320-160-320 $kg \cdot hm^{-2}$ (F1),240-120-240 $kg \cdot hm^{-2}$ (F2)和 160-80-160 $kg \cdot hm^{-2}$ (F3),共 9 个处理。结果表明:番茄总产量和干物质量受灌水和施肥影响显著,均随灌水量和施肥量增加而增大,高水 W1 处理较 W3 处理总产量和干物质量均平均增加 16.5%,高肥 F1 处理较 F3 处理总产量和干物质量分别平均增加 8.0%、9.6%。植株氮含量在 1.81%~3.47% 间变化,随生育期逐渐降低,磷含量在 0.48%~0.78% 呈“锯齿状”波动,钾含量在 2.80%~4.79% 间变化,随生育期先升高后降低。灌水施肥对植株氮、磷(定植后 51、63 d)、钾含量影响显著,增加灌水施肥对植株氮、钾含量有明显提高,在高水 W1 下较低水 W3 处理植株氮、钾含量分别提高 7.4%~20.0%、5.6%~25.7%,高肥 F1 水平较 F3 水平植株氮含量分别提高 3.3%~20.8%、3.3%~26.4%。番茄植株氮、钾含量与干物质量呈显著负相关关系,与总产量呈显著正相关关系。灌水量越大,植株养分吸收效率和肥料偏生产力越大,养分利用效率越小;施肥量越大,氮利用效率越小。

关键词:温室番茄;水肥耦合;养分动态;干物质量;产量;肥料偏生产力

中图分类号:S641.2 **文献标志码:**A

The relationship between dynamic change in nutrient contents and biomass and yield of tomato under coupled irrigation and fertilization in greenhouse

WANG Hu-bing, CAO Hong-xia, HAO Shu-xue, PAN Xiao-yan

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This paper combined drip irrigation technology under mulch in order to explore the changes in nutrient dynamics of tomato plant and its influence on biomass and yield under different water and fertilizer regulation, which aimed to provide theoretical basis for optimum local water and fertilizer management. Through field experiments, the irrigation amount was established based on accumulative evaporation (E) of two irrigation intervals for a standard pan (20 cm). Water volumes were set as 1.0E (W1), 0.75E (W2) and 0.5E (W3) and fertilizer treatments of $N-P_2O_5-K_2O$ (F) were set as F1: 320-160-320 $kg \cdot hm^{-2}$, F2: 240-120-240 $kg \cdot hm^{-2}$, F3: 160-80-160 $kg \cdot hm^{-2}$. Nine treatments were included. The results showed that tomato yield and dry matter were significantly affected by the irrigation and fertilization and positively correlated with increasing irrigation water and fertilizer. The high water treatment (W1) increased fruit yield and dry matter by 16.5% compared to low water treatment (W3). F1 increased yield and dry matter by 8% and 9.6%, respectively, over F3 treatment. The nitrogen (N) content of plant ranged between 1.81% and 3.47% and decreased with increasing the growth period, phosphorus (P) content showed "serration" volatility between 0.48% to 0.78%, and potassium (K) content increased first and then decreased ranging between 2.80% and 4.79% with growth period. Irrigation and fertilizer had a significant

收稿日期:2018-08-04

修回日期:2018-08-20

基金项目:国家“863”项目(2013AA103004);陕西省水利科技计划项目(2014slkj-17);中央高校基本科研业务费专项资金(2452016074)

作者简介:王虎兵(1992-),男,甘肃静宁人,硕士,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:whbing660088@163.com

通信作者:曹红霞(1971-),女,新疆五家渠人,博士,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:nschx225@nwfau.edu.cn

influence on N, P (51、63 d after transplanting) and K. The N and K contents increased with increasing irrigation and fertilization. In W1 treatment, N and K content increased by 7.4%~20.0% and 5.6%~25.7%, respectively, over W3 treatments. Comparing with F3, F1 increased N and K content by 3.3%~20.8% and 3.3%~26.4%, respectively. There was a significant negative correlation between dry matter and plant N and K, and a significant positive correlation between yield and plant N and K in growth stage. When irrigation amount was high, the *NUE* was smaller, but the *UPE* and the *PFP* of plant nutrients were higher. The high fertilizer amount resulted in small *NUE*.

Keywords: greenhouse tomato; irrigation and fertilization coupling; dynamic changes of nutrient content; dry matter; yield; partial factor productivity of fertilizer

随着设施农业的蓬勃发展,日光温室番茄栽培面积不断扩大,已成为我国西北主要设施蔬菜之一^[1-2]。目前日光温室管理中,主要依靠大量水肥投入来提高产量。农民盲目的水肥投入不仅造成水资源和肥料的严重浪费,还导致作物发病率高、品质变劣、连续种植障碍、肥料深层淋失及环境污染等问题^[3-6],所以适宜的水肥投入和科学施肥策略在番茄管理中尤为重要。探讨番茄产量、干物质累积和水肥之间的关系,揭示温室番茄在不同水肥下植株养分含量动态变化规律及肥料的吸收利用,对科学水肥管理具有积极意义。

目前,许多研究表明,灌水过多造成番茄徒长,过少导致根系可利用水分减少,光合作用下降,干物质积累减少,影响产量形成^[7]。而随氮肥用量增加,番茄生物量显著增加^[8],也有研究指出,适当降低氮肥使用,可以增加干物质累积^[9]。李建明等^[10]研究表明,产量随水肥的增加先增加后降低,氮素利用率随之降低,施肥过多还会导致加工番茄贪青晚熟^[11]。植物营养状态反映其体内养分吸收与损失^[12],而水肥供应不同则影响植株营养状态和后期产量形成。前人研究发现,小麦从返青到孕穗期,氮、磷、钾含量随生育期推进逐渐降低^[13],而水稻从分蘖期到孕穗期植株氮、磷、钾养分先升高,孕穗期后逐渐降低,且含量均随施肥量增加而提高^[14]。向友珍等^[15]研究表明,甜椒氮含量随灌水量和施肥量的增加均呈增加趋势,随生育期推进而降低。杨慧等^[16]发现,适当增加灌水量和施氮量,番茄植株氮浓度随之提高,植株容纳氮的能力提高,促进植株生长发育,保证产量形成。

番茄作为高价值蔬菜,对肥水响应特别敏感。高灌水量会促进植株生长,但肥料供应不足会稀释植物体养分含量,影响植株生理生长,从而影响产量。由于番茄在生长发育过程中植株养分含量直接反映其营养状态和需求,所以番茄营养状态对植物生长发育及产量形成十分重要。目前,前人主要集中于不同水肥条件下作物氮磷钾养分含量动态

变化规律和氮素营养诊断研究^[15-17],而对作物养分含量与生物量和产量关系研究较少。本文通过探求灌水施肥对番茄生长、植株养分含量动态变化及产量的影响,揭示番茄生育过程中氮磷钾养分动态变化规律及其与生物量和产量的关系,为该地区温室番茄水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年 1—6 月在陕西省杨凌农业高新技术产业示范区绿百合果蔬专业合作社日光温室进行,位于北纬 34°17′、东经 108°01′,海拔 527 m。多年平均气温 12.5℃,年均蒸发量 1 500 mm,年平均降水量 632 mm,主要集中在 5—10 月,属于半湿润易旱区。试验温室为西北地区常见的简易土墙塑料大棚,东西走向。试验温室土壤为重壤土,0~0.6 m 土层土壤容重为 1.38 g·cm⁻³,田间持水率为 23.9%,有机质含量为 14.13 g·kg⁻¹,碱解氮 89.34 mg·kg⁻¹,速效磷 82.35 mg·kg⁻¹,有效钾 244.38 mg·kg⁻¹,pH 8.1。

供试番茄品种为‘金棚美林’(*Lycopersicon esculentum*, Jinpeng Meilin),2017 年 1 月 9 日定植,四穗果后打顶,2017 年 5 月 26 日拉秧。种植采用当地典型沟垄覆膜栽培模式,操作行位于垄上,宽 0.95 m,种植行位于沟内,宽 0.45 m,株距 0.35 m。灌溉采用膜下滴灌,1 管 2 行布置,滴头间距 0.35 m,滴头流量为 2.1 L·h⁻¹,滴灌湿润比为 0.8。试验所用肥料为尿素(N 46.4%)、生物酶活化磷肥(P₂O₅ 16.0%)、海藻钾(K₂O 52%),每个小区安装水表控制灌水量,肥料随水滴施。试验期间温室内平均日空气温度为 20.76℃,平均日相对湿度为 76.38%。温室中央设置 Φ20 cm 标准蒸发皿,高度始终与植株冠层高度保持一致,从定植后开始每天早上 8:30 测定蒸发皿日蒸发量。其他温室管理与当地一致。

1.2 试验设计

试验设置灌水和施肥 2 个因素。灌水以 2 次灌水间隔期 Φ20 cm 标准蒸发皿的累计蒸发量 E 为基

数,设置 1.0E(W1)、0.75E(W2)、0.5E(W3)3 个灌水水平;肥料用量($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$)设置 3 个水平, F1: 320-160-320 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, F2:240-120-240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, F3:160-80-160 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

采用完全随机区组设计,共 9 个处理,分别为 W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2、W2F3、W3F1、W3F2、W3F3。每个处理 3 次重复,共 27 个小区,小区长 5.5 m,宽 1.4 m,每个小区 1 沟 1 垄,定植 2 行,共 32 株。各小区间设 0.6 m 深防渗隔膜。

定植时灌水至田间持水量,之后每当蒸发皿累积蒸发量达到 20 ± 2 mm 时进行灌水,在最后一次收获前一周(2017-05-19)停止灌水。从水处理开始到收获结束,W1、W2、W3 灌水总量分别为 216.8、162.6、108.4 mm。磷肥作为基肥全部施入,氮、钾肥按基追比例为 1:4 分 7 次施入,基肥一次,其余在开花坐果期,一穗果膨大期,二穗果膨大期,三穗果膨大期,一穗果成熟期,四穗果膨大期按比例 1:1:2:3:2:1 随灌水施入。

1.3 测定项目及方法

干物质 在定植后 51 d(苗期)、63 d(开花坐果期)、76 d(一穗果膨大期)、89 d(二穗果膨大期)、102 d(果实成熟期)、117 d(收获前期)及 130 d(收获后期)进行 7 次破坏性取样,随机选取 3 株番茄,将茎秆、叶片、果实(从定植 76 天开始测定,采样期果实全部计入干物质测定,采样间隔时期果实完全成熟进行常规采摘)、根系(用清水冲洗干净)分开,称鲜重后,105℃杀青 1 h,然后于 75℃下烘干至恒重,再称干重。

全氮、磷、钾含量 将烘干的植株各器官样品粉碎过 0.5 mm 筛,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,消煮液用于各器官养分含量测定,最终换算为整个植株的养分

含量。氮、磷含量用 AA370MC 型流动分析仪测定,钾含量用 AA370MC 型原子吸收分光光度计测定。

产量 每个小区选取有代表性的 20 株番茄进行测产,根据种植密度折算得到。

计算公式^[15, 17] 番茄各器官氮(磷、钾)吸收量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=单株植株各器官全氮(磷、钾)含量 $\times$ 干物质量 $\times$ 种植密度

氮(磷、钾)素含量($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=植株总氮(磷、钾)吸收量/植株干物质量

氮(磷、钾)素利用效率(NUE)($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=产量/植株总氮(磷、钾)吸收量

氮(磷、钾)素吸收效率(UPE)($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=植株总氮(磷、钾)吸收量/纯氮(磷、钾)投入

肥料偏生产力(PFP)($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=产量/全生育期纯氮、磷、钾投入总和

1.4 数据处理

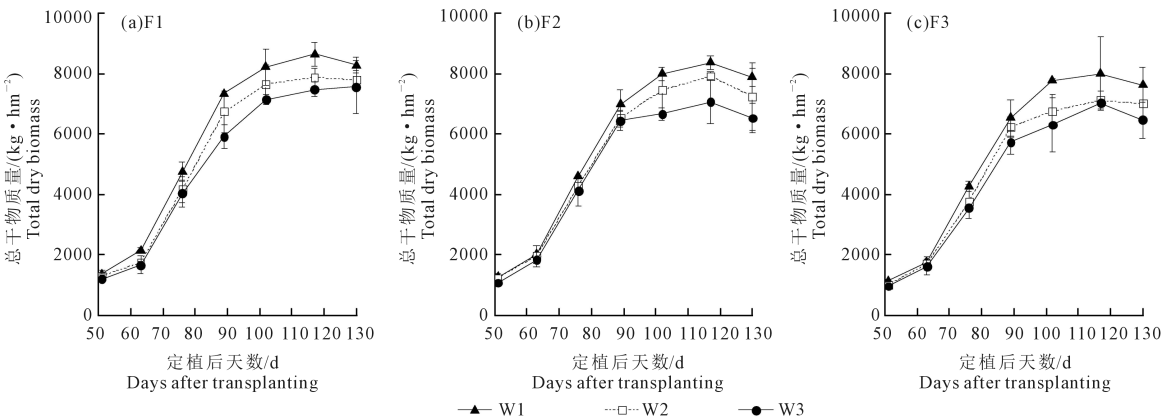
试验数据采用 Microsoft Excel 软件处理,DPS 进行方差分析,使用 Origin 9.60 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理下温室番茄总干物质量的变化

图 1 为不同灌水施肥量下温室番茄总干物质量动态累积过程。可见,番茄幼苗定植后,总干物质量随着生育期呈“S 型”增长趋势。由图中斜率可知,增长最快阶段在定植后 63 d 到 89 d 之间,收获前期趋于平缓并在收获后期有降低趋势。

灌水对番茄总干物质量积累影响达到了极显著水平($P<0.01$),施肥对番茄总干物质量积累影响达到了显著水平($P<0.05$)(除 63、117 d 外),而水肥耦合效应对总干物质量影响不显著($P>0.05$)(表 1)。



注:W1,W2,W3 分别表示灌水量 1.0E、0.75E、0.5E,E 表示蒸发皿累积蒸发量;F1,F2,F3 表示施肥量($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$)分别为 320-160-320、240-120-240 和 160-80-160 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,下同。

Note:W1, W2 and W3 mean the irrigation treatments of 1.0E, 0.75E and 0.5E, and E is reference accumulative evaporation of pan. F1, F2 and F3 mean the fertilizer treatment ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$) of 320-160-320, 240-120-240 and 160-80-160 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The same below.

图 1 不同施肥水平下灌水量对温室番茄总干物质量的影响

Fig.1 Effects of irrigation amounts on total dry biomass of greenhouse tomato under different fertilizer levels

表 1 灌水、施肥、水肥交互对番茄植株总干物质、氮含量、磷含量及钾含量影响的 F 检验

Table 1 F-statistics assessing the effects of irrigation and fertilization treatment on total dry matter, and contents of N, P and K of tomato

指标 Index	处理 Treatment	定植后天数 Days after transplanting/d						
		51	63	76	89	102	117	130
总干物质 Total dry matter	灌溉 Irrigation	7.83 * *	4.17 *	7.69 * *	10.29 * *	13.05 * *	10.94 * *	6.58 * *
	施肥 Fertilization	16.30 * *	3.37 ns	5.12 *	3.88 *	4.10 *	3.20 ns	4.52 *
	灌溉×施肥 Irrigation×Fertilization	0.31 ns	0.91 ns	0.17 ns	0.97 ns	0.25 ns	0.42 ns	0.21 ns
氮含量 N content	灌溉 Irrigation	5.35 *	21.72 * *	10.13 * *	6.26 * *	16.05 * *	23.18 * *	13.56 * *
	施肥 Fertilization	4.31 *	15.50 * *	14.59 * *	5.00 *	11.61 * *	23.55 * *	14.22 * *
	灌溉×施肥 Irrigation×Fertilization	0.26 ns	1.92 ns	0.47 ns	0.65 ns	0.08 ns	0.65 ns	0.25 ns
磷含量 P content	灌溉 Irrigation	5.27 *	8.14 * *	1.99 ns	0.70 ns	2.58 ns	3.21 ns	0.47 ns
	施肥 Fertilization	5.80 *	4.14 *	3.30 ns	4.45 *	0.95 ns	0.17 ns	0.56 ns
	灌溉×施肥 Irrigation×Fertilization	1.09 ns	3.42 *	0.20 ns	0.16 ns	0.65 ns	0.76 ns	0.69 ns
钾含量 K content	灌溉 Irrigation	5.24 *	8.24 * *	12.71 * *	20.68 * *	6.26 * *	29.94 * *	29.98 * *
	施肥 Fertilization	6.57 * *	3.72 *	10.81 * *	16.16 * *	4.68 *	14.11 * *	37.31 * *
	灌溉×施肥 Irrigation×Fertilization	0.43 ns	0.19 ns	1.77 ns	0.53 ns	0.67 ns	0.77 ns	1.46 ns

注: * 表示差异显著 ($P<0.05$), * * 表示差异极显著 ($P<0.01$), ns 表示不显著。下同。
Note: * means significant difference at $P<0.05$, * * means significant difference at $P<0.05$, ns means not significant. The same below.

灌水对干物质积累的影响大于施肥,并且除定植后 51 d 与 63 d 外灌水量与干物质量均呈显著正相关关系($r=0.737\sim0.859$)。同一施肥量下,番茄总干物质量随灌水量呈 $W1>W2>W3$, $W1$ 与 $W2$ 处理较 $W3$ 处理分别平均增加 16.5%、7.1%。同一灌水量下, $F1$ 和 $F2$ 水平较 $F3$ 水平总干物质量分别平均增加 9.6%、7.0%。生育期中 $W1F1$ 处理在 117 d 获得总干物质量最高,为 $8\ 652.04\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其次是 $W1F2$ 处理 ($8\ 377.59\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), $W3F3$ 处理最小,为 $7\ 037.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.2 不同水肥处理下番茄植株养分含量动态变化

2.2.1 氮含量动态变化 从图 2 可以看出,番茄植株氮含量随生育期呈减小趋势,从开花坐果期(63 d)到一穗果膨大期(76 d)降低速度最快,此时正值番茄产量形成期,是追施氮肥关键时期。到果实成熟期(102 d),随着果实采摘进行,氮含量减小趋势变缓,部分有上升趋势。苗期、开花坐果期、一穗果膨大期、二穗果膨大期、果实成熟期、采摘期植株氮含量变化范围分别为 2.84%~3.47%、2.68%~3.44%、2.2%~2.93%、2.27%~2.89%、1.90%~2.51%、1.81%~2.43%。灌水与施肥对植株氮含量影响显著($P<0.05$),而水肥耦合效应并未对其产生显著影响($P>0.05$)(表 1)。增加灌水量和施肥量,番茄植株氮含量随之增加;同一施肥水平下, $W1$ 处理较 $W2$ 、 $W3$ 处理氮含量分别提高 2.5%~11.7%、7.4%~20.0%;相同生育期 $F1$ 施肥水平下植株的氮

含量最高,较 $F2$ 与 $F3$ 水平植株氮含量增加 2.4%~14.5%、3.3%~20.8%,说明灌水施肥均可以增加番茄植株氮含量,改善植株营养状况。

2.2.2 磷含量动态变化 从图 3 可以看出,整个生育期番茄植株的磷含量在 0.48%~0.78% 范围内呈“锯齿状”波动。在苗期和开花坐果期,灌水施肥对植株磷含量影响显著($P<0.05$)(表 1)。 $F1$ 、 $F2$ 水平下,定植 76 d 后,植株中磷含量表现为 $W1>W2>W3$, $W1$ 处理较 $W2$ 、 $W3$ 处理磷含量分别提高 0.3%~7.5%、0.8%~10.7%; $F3$ 水平下,定植 89 d 前植株中磷含量表现为 $W1>W2>W3$, 89 d 后则为 $W1>W3>W2$ 。不同施肥量只对 51、63 d 及 89 d 产生了显著影响($P<0.05$),而水肥耦合效应对植株磷含量影响不显著。以上说明增加灌水对番茄磷含量有一定的提高,而在一定施肥水平下,增加施肥量对番茄植株磷含量影响不大。

2.2.3 钾含量动态变化 图 4 显示,植株钾含量总体随生育期先升高再降低,开花坐果期至一穗果膨大期呈上升趋势,且最终达到峰值,说明此时植株对钾吸收很大,是钾肥投入关键时期。从苗期、开花坐果期、一穗果膨大期、二穗果膨大期、果实成熟期、采摘前期、采摘后期,植株钾含量分别在 3.79%~4.62%、3.83%~4.35%、3.94%~4.79%、3.23%~4.17%、3.15%~3.92%、3.01%~3.62%、2.80%~3.92% 变化。整个生育期植株钾含量受灌水与施肥影响显著($P<0.05$),而水肥耦合效应对其影响不显

著($P>0.5$) (表 1)。同一施肥水平下, W1 处理较 W2、W3 处理钾含量分别提高 0.8%~12.4%、5.6%~25.7%;同一灌水处理下, 植株钾含量呈现 $F1>F2>F3$, F1 较 F2、F3 水平分别提高 0.2%~14.8%、3.3%~26.4%, 说明增加灌水和施肥均能够促进植株钾元素的吸收, 提高植株钾含量。

2.3 番茄植株总干物质与养分积累量和养分含量之间的关系

如图 5A 所示, 干物质积累量与氮、磷、钾元素累

积量呈极显著正相关关系, 说明植株对矿质营养的吸收、同化与转运直接影响着植株干物质的积累, 干物质是氮、磷、钾养分累积的结果。从图 5B 可以看出, 随着生育期的推进, 干物质质量和植株氮、钾含量呈显著负相关, 说明随生育期推进, 番茄的生长速率大于对养分的吸收速率, 使其氮、钾含量随生育期而降低; 由于植株中磷积累量和干物质质量呈显著正相关关系, 而磷含量随干物质的增加一直保持相对稳定状态, 即植株对磷元素的吸收满足其生理、生长需求。

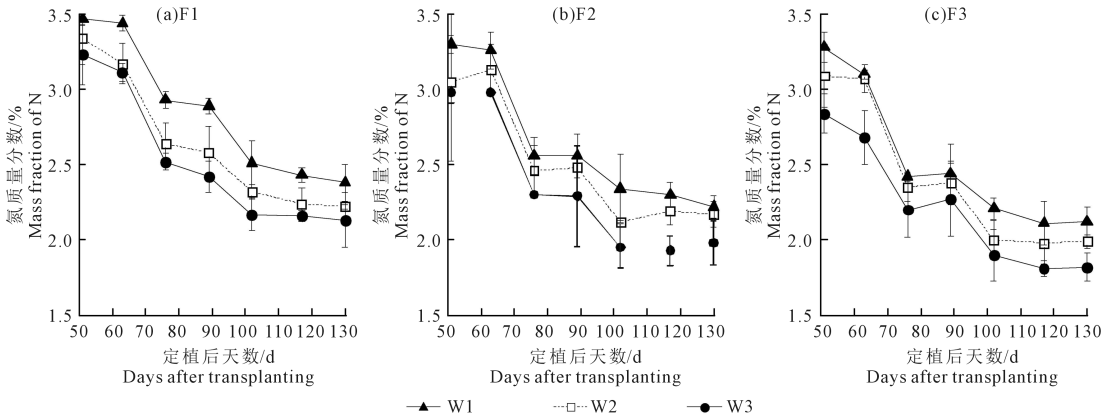


图 2 不同施肥水平下灌水量对温室番茄植株氮含量的影响
Fig.2 Effects of irrigation amounts on N content of greenhouse tomato under different fertilizer levels

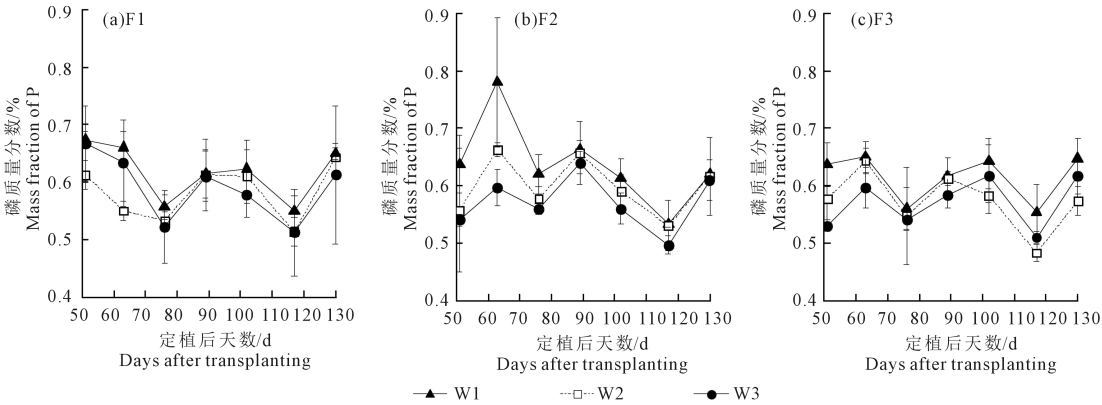


图 3 不同施肥水平下灌水量对温室番茄植株磷含量的影响
Fig.3 Effects of irrigation amounts on P content of greenhouse tomato under different fertilizer levels

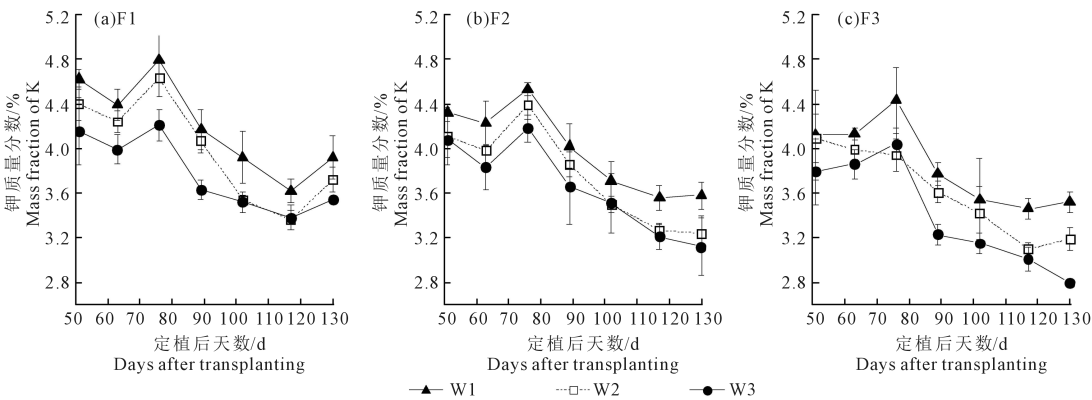


图 4 不同施肥水平下灌水量对温室番茄植株钾含量的影响
Fig.4 Effects of irrigation amounts on K content of greenhouse tomato under different fertilizer levels

2.4 灌水施肥对番茄产量及养分吸收利用的影响

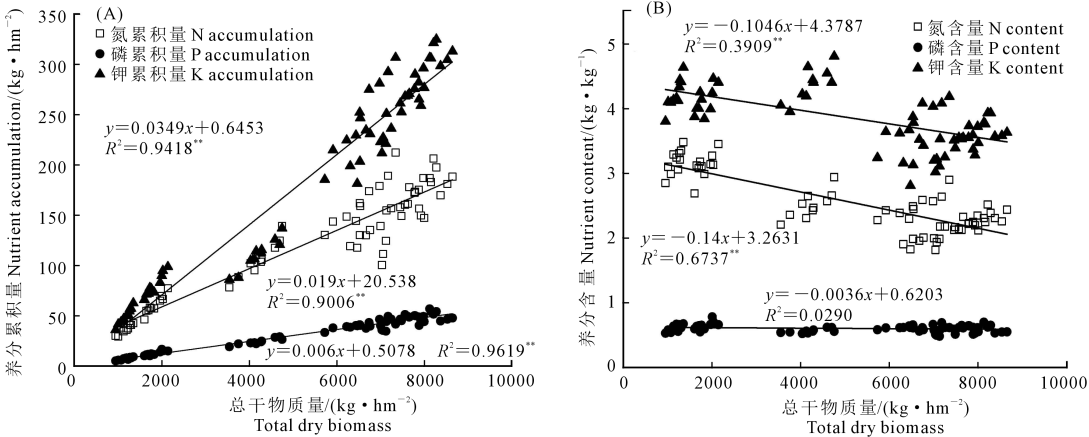
番茄产量受灌水和施肥影响极显著,但水肥耦合效应对其影响不显著。如表 2 所示,随水肥用量增加,番茄产量随之提高(除 W3F1),在 W1F1 处理下获得最大产量,为 102.06 t · hm⁻²,W1F2(97.57 t · hm⁻²) 次之,W3F3 处理产量最小,为 80.45 t · hm⁻²。相较于低水 W3 处理,当水分增加 50%时,产量平均提高 9.6%,而当水分增加 100%时,产量平均提高了 16.5%;相较于低肥 F3 处理,当肥料用量增加 50%时,产量平均提高 5.9%,而当肥料用量增加 100%时,产量平均提高了 8.0%,表明随着灌水和施肥增加,增产幅度降低。

灌水与施肥的交互作用对番茄植株 *NUE* 和 *UPE* 没有显著影响($P>0.05$),但是除磷 *NUE* 以外,不同灌水与施肥均对 *NUE* 和 *UPE* 产生了显著影响

($P<0.05$)。番茄植株对营养元素的吸收效率为钾>氮>磷,氮、磷、钾的 *UPE* 随灌水量增加而增大,随施肥量增加而减小,在 W1F3 处理最大,分别为 1.01、0.61、1.68 kg · kg⁻¹;氮 *NUE* 随灌水施肥增加而减小,在 W3F3 处理下最大为 701.8 kg · kg⁻¹,钾在 W3F3 获得最大 *UPE* 为 447.6 kg · kg⁻¹,而磷在 W2F3 处理获得最大 *UPE* 为 2 201.5 kg · kg⁻¹。肥料偏生产力 *PFP* 则随着灌水量的增加而增加,随施肥量的增加而减小,其中最大 *PFP* 在 W1F3 处理,为 233.01 kg · kg⁻¹。

2.5 总产量与不同时期植株养分含量的相关关系及回归分析

通过对最终总产量和不同时期植株氮、磷、钾含量相关性分析,得到表 3,结果表明,在本试验条件下,番茄总产量分别与植株氮、钾含量存在显著正相关关系。以植株氮、磷、钾含量为自变量,总产量



注: * 表示差异极显著($P<0.01$)。 Note: * * means significant difference ($P<0.01$).

图 5 温室番茄植株总干物质量与养分累积量和养分含量之间的相关关系

Fig.5 Correlation between total dry biomass and nutrient accumulation, total dry biomass and nutrient content of greenhouse tomato

表 2 不同灌水量和施肥水平对番茄产量及养分吸收利用率的影响

Table 2 Effect of different irrigation amount and fertilizer on yield and the nutrient uptake and use efficiency of tomato									
灌溉水平	施肥水平	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		肥料偏生产力	产量
Irrigation level	Fertilizer level	利用效率	吸收效率	利用效率	吸收效率	利用效率	吸收效率	<i>PFP</i>	Yield
		/(kg · kg ⁻¹)	/(kg · kg ⁻¹)	/(kg · kg ⁻¹)	/(kg · kg ⁻¹)	/(kg · kg ⁻¹)	/(kg · kg ⁻¹)	/(kg · kg ⁻¹)	/(t · hm ⁻²)
W1	F1	518.8d	0.61de	1889.79ab	0.34cde	315.7c	1.02cde	127.58f	102.06a
	F2	558.1cd	0.73c	2002.01ab	0.40c	346.4bc	1.17c	162.62d	97.57ab
	F3	579.6bcd	1.01a	1893.87ab	0.61a	348.1bc	1.68a	233.01a	93.21bc
W2	F1	553.1cd	0.54ef	1913.06ab	0.31e	330.8bc	0.91ef	119.74f	95.79bc
	F2	593.2abcd	0.65cd	1998.14ab	0.39cd	400.5ab	0.98def	153.70de	92.22cd
	F3	630.9abc	0.87b	2201.49a	0.50b	393.9ab	1.39b	218.57b	87.43de
W3	F1	527.7cd	0.50f	1679.16b	0.32de	316.4c	0.84f	105.38g	84.31ef
	F2	673.9ab	0.54ef	2145.49a	0.34cde	426.4a	0.85ef	144.40e	86.64e
	F3	688.1a	0.74c	2045.51ab	0.50b	447.6a	1.13cd	201.13c	80.45f
灌溉 Irrigation		* *	* *	ns	* *	* *	* *	* *	* *
施肥 Fertilization		*	* *	ns	* *	*	* *	* *	* *
灌溉×施肥 Irrigation×Fertilization		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:不同小写字母表示不同处理间的差异显著($P<0.05$);*NUE*、*UPE*、*PFP* 分别表示养分利用效率、吸收效率及肥料偏生产力。
Note: Different lowercase letters indicate the significant difference of irrigation and fertilization treatment ($P<0.05$). *NUE*, *UPE* and *PFP* indicate the nutrient use efficiency, nutrient uptake efficiency and partial factor productivity of fertilizer, respectively.

为因变量,进行回归分析,如表 4 所示:拟合方程均达显著水平 ($P<0.05$),决定系数 R^2 在 0.809~0.936 之间,说明各生育阶段番茄植株的氮、磷、钾含量对其产量影响显著。从开花坐果期到收获前期 (63~117 d),总产量随植株氮、钾含量的提高而增加,此期间氮磷钾元素协同作用提高了番茄植株营养状态,保证了后期产量形成。而苗期 (51 d) 产量随植株磷含量增加而降低,收获后期 (130 d) 产量随植株钾含量增加而降低,此时需要注意磷、钾肥合理施用量,说明 3 种养分共同作用对产量的影响是复杂

表 4 温室番茄产量和植株养分含量的回归关系

Table 4 Regression relationship between tomato yield and plant nutrient content in greenhouse

定植后天数 Days after transplanting/d	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determination coefficient	P 值 P value of significant test
51	$Y = -26.99 + 4606.00X_N - 10420.67X_P + 828.46X_K$	0.887	0.009
63	$Y = -37.66 + 1340.25X_N + 486.75X_P + 2063.55X_K$	0.888	0.008
76	$Y = -32.32 + 1449.74X_N + 7507.79X_P + 1046.04X_K$	0.913	0.004
89	$Y = -9.84 + 1320.72X_N + 2107.31X_P + 1456.13X_K$	0.936	0.002
102	$Y = -36.28 + 865.04X_N + 5959.10X_P + 2057.76X_K$	0.875	0.011
117	$Y = 7.97 + 2711.36X_N + 3598.24X_P + 201.01X_K$	0.809	0.030
130	$Y = -3.92 + 4344.61X_N + 2606.10X_P - 384.10X_K$	0.829	0.023

注:Y 表示番茄总产量, X_N 、 X_P 、 X_K 分别表示植株氮、磷、钾含量。
Note: Y indicate the total yield of tomato, X_N 、 X_P and X_K mean the plant of N, P and K contents, respectively.

3 讨 论

水肥调控是温室作物管理最有效的手段,适宜水肥投入是优质高产的最终目标。本试验结果表明,番茄产量、干物质量均随灌水和施肥增加而增加,这与 Kuscü 等^[18] 和吴立峰等^[19] 所得结果一致,但产量增产幅度随水肥继续投入逐渐降低,说明当水肥在适宜范围内,增产效果良好,而超过阈值时,增产效应减弱^[8]。本文研究发现,肥料偏生产力、吸收效率随灌水量提高而增加,随施肥水平提高而降低,在 W1F3 处理下最大,因此合理灌溉的同时,适当减少肥料输出利于肥料吸收利用;试验部分处理下钾素吸收效率大于 1,表明番茄吸收钾肥中的钾外,还吸收土壤中原本储存的钾,这与邢英英等^[17] 研究结果类似。

氮、磷、钾是植物生长必需矿质元素,氮参与植物叶绿素的合成^[20],磷、钾参与植物糖类代谢^[21, 22],并且钾能促进茎秆维管束的发育,利于光合产物向储存器官运输^[23]。不同生育期植物体养分含量有所不同。黄巧义等^[24] 发现木薯氮、磷、钾含量在苗期最高,随生育期推进不断降低,含量在 0.93%~3.99%、0.26%~0.82%、0.89%~1.39% 间变化,而番茄叶、茎、果、根的氮、磷、钾含量分别在 1.56%~4.29%、0.24%~0.59%、0.98%~4.56% 变化^[25],叶片和茎秆氮、钾含量从花期到坐果期逐渐

的,不同生育阶段氮、磷、钾肥需要合理配比才能更好发挥作用。

表 3 温室番茄产量和植株养分含量的相关关系

Table 3 Correlation between tomato yield and plant nutrient content in greenhouse

养分含量 Nutrient content	定植后天数 Days after transplanting/d						
	51	63	76	89	102	117	130
氮 N	0.842**	0.894**	0.847**	0.894**	0.905**	0.893**	0.892**
磷 P	0.592	0.408	0.481	0.408	0.471	0.661	0.581
钾 K	0.900**	0.942**	0.907*	0.956**	0.881**	0.907**	0.835**

降低,磷含量维持稳定^[26-27]。本试验条件下,番茄植株氮含量在 1.81%~3.47% 间变化,随生育期逐渐降低,磷含量在 0.48%~0.78% 之间波动,钾含量在 2.80%~4.79% 间变化,苗期较低,在果实膨大期达到最大,之后随生育期逐渐降低,其与上述研究结果基本一致。植株养分含量不仅随生育期变化,还受灌水施肥影响显著。若土壤水分不足,导致根系吸水受到抑制,降低根系吸水面积,增大木质部液流粘滞性,阻碍了水分吸收和养分运输^[28];随施肥量增加,番茄叶片、果实及根系中氮、钾含量越高^[29-31],但对番茄地上部磷的吸收利用无显著影响^[32],这与本文试验结果基本一致。植株养分含量直接影响作物生长状态和后期产量的形成。提高小麦拔节前前期氮浓度,可保证有效分蘖进行,提高成穗数^[13],而西瓜各器官养分含量高低对提高果实产量起重要作用^[33]。本文研究发现,各生育期氮、磷、钾含量与产量呈显著的线性关系,在养分含量最高时产量达到最大,说明保证各生育期番茄植株的养分含量,是优质高产的前提。

本试验下植株最佳营养状态在 W1F1 处理获得,并且使番茄生物量和产量同时达到了最大,但养分的吸收利用效率及肥料偏生产力较低,虽然 W3F3 处理养分吸收利用效率及肥料偏生产力较好,但产量太低。综上,在本试验设计范围,灌水量为 W1 (1.0E),施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 为 F2~F1 水

平,即在 240–120–240~320–160–320 kg·hm⁻²) 之间,蕃茄植株营养状态最佳,既能有效保证产量,又可以有效节约水资源,增加肥料吸收利用,降低环境污染风险。

4 结 论

温室滴灌施肥条件下,灌水与施肥对番茄植株氮、钾含量影响显著,随灌水施肥的增加而提高。植株较高的养分含量使其有好的营养状态,促进番茄生物量累积和产量形成。通过调控植株氮磷钾养分含量,适时合理灌水施肥,达到优质高产的目的。当灌水量为 1.0E,施肥量(N–P₂O₅–K₂O)为 240–120–240~320–160–320 kg·hm⁻²时,蕃茄产量为 97.57~102.06 t·hm⁻²,养分吸收利用率及肥料偏生产力处于较佳水平。

参 考 文 献:

[1] 蒋卫杰,邓杰,余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学,2015,48(17): 3515-3523.

[2] Wang Z, Liu Z, Zhang Z, et al. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China [J]. Scientia Horticulturae, 2009,123(1): 51-57.

[3] 李若楠,张彦才,黄绍文,等. 节水控肥下有机无机肥配施对日光温室黄瓜-番茄轮作体系土壤氮素供应及迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3): 677-688.

[4] 孙光闻,陈日远,刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报,2005,21(S2): 184-188.

[5] 袁亭亭,杨建平,徐坤. 秋延迟番茄氮、磷、钾优化施肥方案研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(5): 1246-1251.

[6] Mcallister C H, Beatty P H, Good A G. Engineering nitrogen use efficient crop plants: the current status [J]. Plant Biotechnology Journal, 2012, 10(9): 1011-1025.

[7] Ismail S M, Ozawa K, Khondaker N A. Influence of single and multiple water application timings on yield and water use efficiency in tomato (var. *First power*) [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(2): 116-122.

[8] 王新,马富裕,刁明,等. 不同施氮水平下加工番茄植株生长和氮素积累与利用率的动态模拟[J]. 应用生态学报,2014, 25(4): 1043-1050.

[9] Bénard C, Gautier H, Bourgaud F, et al. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(10): 4112-4123.

[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] 汤明尧,张炎,胡伟,等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(5): 1238-1245.

[12] Gastal F, Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(370): 789-799.

[13] 孙彦铭,杨振立,杜晓东,等. 农田养分调控对冀中南冬小麦生育群体动态和养分浓度的影响[J]. 河北农业科学,2016,20(3):

44-48.

[14] 邓国才,陆引翌,远红伟. 不同施肥量对水稻产量和营养动态的影响及相关性分析[J]. 耕作与栽培, 2008,(4): 16-17.

[15] 向友珍,张富仓,范军亮,等. 基于临界氮浓度模型的日光温室甜椒氮营养诊断[J]. 农业工程学报,2016,32(17): 89-97.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Kusc H, Turhan A, Ozmen N, et al. Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Horticulture Environment & Biotechnology, 2014, 55(2): 103-114.

[19] 吴立峰,张富仓,周罕觅,等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(20): 137-146.

[20] 孙红春,冯丽肖,谢志霞,等. 不同氮素水平对棉花不同部位——铃叶系统生理特性及铃重空间分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007,40(8): 1638-1645.

[21] 吕晓苏,李宇轩,苗英,等. 草莓果实不同发育时期的蛋白磷酸化水平[J]. 中国农业科学,2016,49(10): 1946-1959.

[22] 柳洪鹏,史春余,张立明,等. 钾素对食用型甘薯糖代谢相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012,18(3): 724-732.

[23] 蔡绍珍,陈振德. 蔬菜的营养与施肥技术[M]. 青岛:青岛出版社, 1997: 36-39.

[24] 黄巧义,唐培虎,陈建生,等. 氮磷钾配比对木薯养分吸收动态及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014,(4): 947-956.

[25] 吴建繁,王运华,贺建德. 京郊保护地番茄氮磷钾肥料效应及其吸收分配规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(4): 409-416.

[26] Bowles T M, Barrios-Masias F H, Carlisle E A, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2016, 566-567: 1223-1234.

[27] Chapagain B P, Wiesman Z. Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield and quality of greenhouse tomato [J]. Scientia Horticulturae, 2004, 99(3): 279-288.

[28] 王海艺,韩烈保,黄明勇. 干旱条件下水肥耦合作用机理和效应[J]. 中国农学通报,2006,22(6): 124-128.

[29] 齐红岩,李天来,富宏丹,等. 不同氮钾施用水平对番茄营养吸收和土壤养分变化的影响[J]. 土壤通报,2006,37(2): 268-272.

[30] Kinoshita T, Yamazaki H, Inamoto K, et al. Analysis of yield components and dry matter production in a simplified soilless tomato culture system by using controlled-release fertilizers during summer-winter greenhouse production [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 202: 17-24.

[31] Cole J C, Smith M W, Penn C J, et al. Nitrogen, phosphorus, calcium, and magnesium applied individually or as a slow release or controlled release fertilizer increase growth and yield and affect macronutrient and micronutrient concentration and content of field-grown tomato plants [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 211: 420-430.

[32] 赵营,张学军,罗健航,等. 施肥对设施番茄-黄瓜养分利用与土壤氮素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(2): 374-383.

[33] 蔡树美,诸海焘,余廷园,等. 西瓜产量与养分含量的灰色关联度和通径分析[J]. 土壤,2014,(4): 651-655.