

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.032

# 水氮互作对盆栽番茄生长发育和养分累积的影响

李欢欢<sup>1,2</sup> 刘浩<sup>1</sup> 庞婕<sup>1</sup> 李双<sup>1</sup> 崔永生<sup>1</sup> 孙景生<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水与调控重点实验室, 新乡 453003;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

**摘要:** 为探讨不同水氮供应对番茄生长发育和养分吸收的影响,以日光温室盆栽番茄为研究对象,研究3种灌溉水平(灌水下限分别控制在田间持水率的50%、65%、80%,分别记为I1、I2和I3)和4种施氮水平(N和土壤质量比为0、0.13、0.27、0.40 g/kg,分别记为N0、N1、N2和N3)对番茄生长发育、生物量、组织含水率和养分累积量的影响。结果表明:叶面积、茎粗和株高均随灌水量的增大而显著增大,随施氮量的增大呈显著的先增大后减小趋势,且N1时各灌溉水平的生长指标均最优;茎和叶含水率在各处理间无明显规律,而果实含水率随灌水量的增大而显著增大,随施氮量的增大而显著减小;茎、叶和果实的干物质量均随灌水量的增大而极显著的增大,随施氮量的增大呈先增大后减小趋势,N1最有利于干物质的形成;水分胁迫(I1)条件下增施氮肥有助于各组织对全氮(N)、全磷(P)和全钾(K)的吸收,且养分更多的用于生殖生长,各组织对养分吸收的施氮阈值为0.13 g/kg(N1);地上组织N、P、K累积量与干物质量呈极显著正相关,与对应的养分含量呈显著的负相关(N和K除外),与组织含水率的相关性不显著,且N累积量与P、K累积量均呈极显著的正相关,故增施氮肥可以促进番茄对养分的吸收,特别是促进对K的吸收。与N1I3处理相比,N1I2的果实干物质量、N累积量和K累积量分别下降了3.04%、10.67%和12.08%,但可节约用水25%,因而灌溉控制下限为田间持水率的65%(I2)和施氮水平为0.13 g/kg(N1)为最优水氮组合模式,可实现节水、省肥功效,合理调控株型,为产量形成和品质的优化奠定基础。

**关键词:** 番茄; 水氮互作; 生长发育; 生物量; 养分累积量

中图分类号: S606; S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0272-08

## Effects of Water and Nitrogen Interaction on Growth and Nutrient Accumulation of Potted Tomatoes

LI Huanhuan<sup>1,2</sup> LIU Hao<sup>1</sup> PANG Jie<sup>1</sup> LI Shuang<sup>1</sup> CUI Yongsheng<sup>1</sup> SUN Jingsheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of different water and nitrogen application amounts on tomato growth and nutrient uptake, pot experiment was carried out in greenhouse, where treated tomatoes were taken as research object. The irrigation was resumed when soil moisture was reduced to 50%, 65% and 80% of field capacity, and three irrigation levels were therefore designed named as I1, I2 and I3, respectively. Each irrigation level was associated with four nitrogen application rates (Ratio of N to soil quality was 0 g/kg, 0.13 g/kg, 0.27 g/kg and 0.40 g/kg named as N0, N1, N2 and N3, respectively). The tomatoes growth, biomass, tissue water content and nutrient accumulation were measured in each treatment. The results showed that the leaf area per plant, stem diameter and plant height were significantly increased with the increase of irrigation amount, and increased first and then decreased with the increase of nitrogen application amount. The optimal growth index was obtained in N1 treatment for each irrigation level. There was no obvious regularity of stem and leaf water content among all treatments. However, increasing irrigation amount significantly improved fruit water content, while

收稿日期: 2019-03-25 修回日期: 2019-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779259)

作者简介: 李欢欢(1988—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: 13939018910@163.com

通信作者: 孙景生(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事作物水分生理及高效用水技术研究,E-mail: jshsun623@163.com

increasing nitrogen application amount significantly reduced it. The dry matter content of stems, leaves and fruits were increased firstly and then decreased with the increase of nitrogen application amount, and increased significantly with the increase of irrigation amount. Especially, N1 was the most conducive to dry matter formation. The plant tissues could absorb more total nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) when increasing nitrogen application amount under water stress (II) condition, which benefitted plant reproductive growth. The optimal nitrogen application amount for nutrient uptake by tissues was 0.13 g/kg (N1). The accumulated N, P and K of above ground tissues was positively correlated with dry matter and negatively with corresponding nutrient concentrations (except N and K), but not with tissues' water content. The accumulated N was positively related to accumulated P and K, thus, increasing nitrogen application amount could promote nutrient uptake of tomatoes, especially K uptake. In comparison with N1I3 treatment, the fruit dry matter, nitrogen accumulation and potassium accumulation of N1I2 treatment was decreased by 3.04%, 10.67% and 12.08%, respectively, but the irrigation amount was saved by 25%. The results revealed that the irrigation resumed at 65% of field capacity (I2) associated with 0.13 g/kg (N1) was the optimal water-nitrogen combination treatment, which can save water and fertilizer, as well as regulate plant type, and lay the foundation for improving yield and quality.

**Key words:** tomato; water and nitrogen interaction; growing development; biomass; nutrient accumulation

## 0 引言

番茄是全球栽培最为普遍的果蔬之一,其对水氮供应要求较高。不合理的灌溉施氮方式不仅降低了水氮利用效率,还会造成环境污染,影响番茄生长和养分的吸收,甚至影响番茄产量和品质的形成。因此,科学合理的水氮管理应是综合考虑番茄生长、养分吸收和产量与品质最优而确定的一种灌溉施氮模式。

水是限制作物生长的主要因素,对作物生长、养分吸收和产量形成等均产生影响。土壤含水率较低时土壤孔隙中水被空气所代替,水分和养分向作物根部扩散和运输受阻,使产量和养分利用效率降低<sup>[1]</sup>,SHESHBAHREH等<sup>[2]</sup>研究表明,干旱胁迫限制了金华菊对氮磷的吸收,促进了钾的吸收,钾的吸收量增大是因为钾在渗透调节、气孔开闭和膜的稳定方面具有重要作用<sup>[3]</sup>,但孙永健<sup>[4]</sup>研究认为,各生育期受旱时均抑制了水稻对K的吸收,水分亏缺时会抑制作物光合作用、损坏质膜和减小作物潜在生长<sup>[5]</sup>,导致干物质累积量减小,进而影响产量和品质的形成。干旱对不同作物吸收K的影响存在分歧,而水分亏缺对番茄K吸收的影响少见报道。

氮是继水之后影响作物产量和品质的第二大因素,许多学者认为在干旱地区增施氮肥可以提高水分利用效率、减小干旱对作物生长的负面影响和促进作物对其他养分的吸收。氮营养与植株的抗旱能力有关,干旱胁迫下改善作物的养分状况有助于提高作物抗旱能力和产量<sup>[6]</sup>,增施氮肥可促进作物对钾肥的吸收<sup>[7]</sup>,而钾离子有使原生质胶体膨胀的作

用,且增施氮肥可以改善作物的生理和生长状态<sup>[3,8]</sup>,但施氮量过高,会造成枝叶徒长,甚至烧苗,还会降低作物的生殖生长,甚至会导致硝酸盐淋失、地下水污染、降低作物产量和品质、加剧土壤环境的污染<sup>[9-10]</sup>。

综上所述,水分胁迫对作物吸收钾的影响仍存在一定分歧,不同作物和不同种植模式下的合理施氮量也存在差异。故本研究拟通过对番茄生长、组织含水率、生物量和养分累积量的测定分析,提出适宜的灌溉施氮模式,为进一步研究日光温室番茄产量和品质形成提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2018年3—6月在中国农业科学院新乡综合试验基地(35°9'N,113°47'E,海拔78.7 m)日光温室中进行,该地区多年平均降雨量548.3 mm,多年平均蒸发量1908.7 mm,属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温14.1℃,日照时长2398.8 h,无霜期200.5 d。试验所用温室占地510 m<sup>2</sup>(长60 m、宽8.5 m),下沉0.5 m,东西走向,坐北朝南,覆盖无滴聚乙烯薄膜,墙体内镶嵌60 cm厚的保温材料,室内无其他补温设施。温室盆栽用土选用大田耕层(0~20 cm)土壤,质地为沙壤土,土壤容重为1.40 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为23.02%(质量含水率)。温室日常管理依据当地常规进行,缓苗期气温不超过30℃不放风,利用覆盖物、调节风口和通风时间进行调控,进入4月下旬,当温室内最低气温稳定在15℃以上后,温室顶部和侧部通风口全部打开,除雨天外,不再关闭。

## 1.2 试验设计

试验所用盆直径为 30 cm,高 40 cm,大田耕层土壤经风干过 0.50 mm 筛后装入盆内离上口 4~6 cm 处,每盆装耕层干土质量 39.56 kg。土壤全氮、全磷质量比分别为 0.99、1.11 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾质量比分别为 90.98、26.82、208.60 mg/kg,有机质质量分数 1.45%,pH 值为 8.50,EC 为 215.88  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。番茄品种为火凤凰,五叶一心时移栽(2018年3月15日)于盆中,每盆定植 1 棵植株,座果 3 穗留顶叶 3 片后打顶,6月16日结束试验,灌水控制采用滴箭,并用流调器控制滴箭流量为 2 L/h,工作压力为 0.2 MPa。

试验设计 3 种灌溉水平(灌水下限分别控制在田间持水率的 50%、65% 和 80%,分别记为 I1、I2 和 I3,灌水定额均为 1.4L)和 4 种施氮水平(N 和土壤质量比分别为 0、0.13、0.27、0.40 g/kg,记 N0、N1、N2 和 N3),完全组合共计 12 个处理,每个处理 10 个重复。每个盆的有机肥、磷肥和钾肥的施用量均相同,肥料和土壤质量比分别为 2.67、0.11、0.27 g/kg,所施肥为尿素(N 质量分数为 46.4%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$ 质量分数为 14%)和硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$ 质量分数为 50%),在移栽前将全部有机肥和磷肥,以及钾肥和氮肥总量的 40% 作为底肥施入,剩余 60% 的钾肥和氮肥平分 3 份分别第 1、2、3 穗果实开始膨大时随水追施肥。每天 07:30—08:30 采用精度为 20 g 的电子吊秤称量,用于控制灌溉。

## 1.3 观测项目与方法

### (1) 土壤含水率

土壤含水率计算式为

$$Q_i = \frac{A_i - A_d - A_{\text{plant}}}{A_d - A_{\text{pot}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $Q_i$ ——第  $i$  天的土壤质量含水率, %

$A_i$ ——第  $i$  天盆总质量, g

$A_d$ ——盆和干土质量, g

$A_{\text{plant}}$ ——番茄植株质量, g, 每 5 d 从小区取相同处理同等大小的番茄植株称量

$A_{\text{pot}}$ ——盆的质量, g

### (2) 生长指标

番茄全生育期每隔 7~10 d 测定一次株高、叶面积和茎粗。其中株高采用直尺测量,叶面积采用直尺测量叶长和叶宽,进行相乘累积求和,采用折算系数 0.685 进行修正<sup>[11]</sup>,茎粗采用游标卡尺在地面以上 2 cm 处量取直径,采用十字交叉法。

### (3) 植株生物量和含水率

试验结束时,每个处理选取 3 株作为 1 个重复,每个处理重复 3 次,将选取植株的茎叶果分开,称量各部位的鲜质量,然后将鲜样放置 105℃ 干燥箱中杀青 30 min,再在 75℃ 条件下干燥至恒定质量,称量得到各部位的干质量并计算含水率。

### (4) 养分含量

将植株生物量干样粉碎过 0.15 mm 筛,采用全自动凯氏定氮仪测定氮含量<sup>[12]</sup>,FP-6410 型火焰光度计测定钾含量<sup>[13]</sup>,钼锑抗比色法测定磷含量<sup>[14]</sup>。

## 1.4 数据处理方法

采用 DPS 统计软件对试验数据进行统计分析,多重比较用 Duncan 新复极差法,用 Microsoft Excel 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮交互作用对番茄单株叶面积、株高和茎粗的影响

水氮交互作用对番茄各生育阶段内生长指标的影响类似,选择番茄成熟末期的单株叶面积、株高和茎粗变化作为分析对象,结果如图 1(图中不同小写字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著,下同)所示。方差分析结果表明,灌溉和施氮对单株叶面积、株高和茎粗均产生了显著性影响,两者交互作用对叶面积和株高产生显著影响,而对茎粗无显著性影响。从图 1 还可以看出,相同施氮条件下,单株叶面积、株高和茎粗均随灌水量的增大而显著增大;相同灌水量情况下,单株叶面积、株高和茎粗均随施氮量

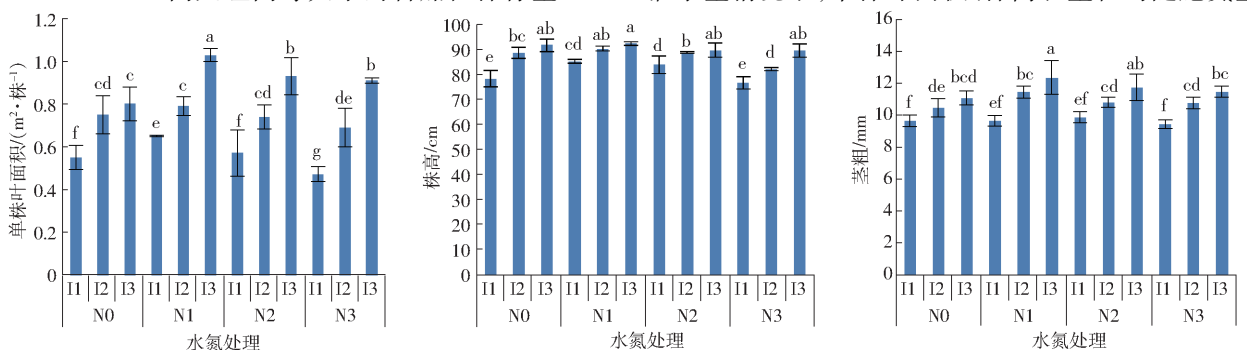


图 1 水氮交互作用下番茄单株叶面积、株高和茎粗

Fig. 1 Values of plant leaf area, plant height and stem diameter of tomato under interaction of nitrogen application

增大呈先增大后减小的变化趋势,最大值均出现在 N1 处理,与 N1I3 处理相比,N1I2 处理单株叶面积、株高和茎粗分别降低了 23.30%、2.14% 和 7.49%,但可节约用水 25.00%。

## 2.2 水氮交互作用对番茄植株地上各组织生物量和含水率的影响

灌溉和施氮均极显著影响果实、茎和叶的干物质量(除施氮不显著影响茎干物质量),而两者交互作用也均显著影响果实、茎和叶的干物质量(表 1)。由表 1 可知,任一施氮水平下,果实(除 N2 和 N3 外)和茎及叶干物质量均随灌水量的增大而显著增大,其中 N1 条件下各灌溉水平的果实和叶(除 I1)干物质量均最大,与 N1I3 比较,N1I2 的果实、茎和

叶干物质量分别降低了 3.04%、23.59% 和 24.27%。N2 和 N3 条件下,果实干物质量最大值均出现在中等灌溉水平条件下(I2)。由表 1 还可知,果实和叶的干物质量均值均随施氮量的增大呈先增大后减小变化趋势,最大值均出现在 N1,分别为 88.96、36.28 g/株,而茎的干物质量随施氮水平的增大而增大,但不显著。

对于植物来说水具有特殊的重要性,水影响植株细胞的膨压、养分浓度和品质等。番茄果实含水率在 89.71%~95.07% 之间,叶含水率在 82.99%~85.96% 之间,茎含水率在 82.23%~84.54% 之间(表 1)。由表 1 可知,茎和叶的含水率在各处理间无明显变化规律,且灌溉、施氮及两者交互作用对其

表 1 水氮交互作用下番茄地上生物量和含水率的方差分析

Tab. 1 Variance analysis of aboveground biomass and water content with different water and nitrogen treatments

施氮水平	灌溉处理	干物质量/(g·株 <sup>-1</sup> )			含水率/%		
		果实	茎	叶	果实	茎	叶
N0	I1	59.17 <sup>g</sup>	22.70 <sup>f</sup>	26.27 <sup>e</sup>	93.69 <sup>bc</sup>	84.27 <sup>ab</sup>	85.96 <sup>a</sup>
	I2	67.93 <sup>f</sup>	30.13 <sup>e</sup>	33.05 <sup>d</sup>	93.74 <sup>bc</sup>	84.54 <sup>a</sup>	85.18 <sup>ab</sup>
	I3	77.90 <sup>cde</sup>	33.65 <sup>cd</sup>	42.25 <sup>b</sup>	93.61 <sup>bcd</sup>	84.25 <sup>ab</sup>	85.21 <sup>ab</sup>
	均值	68.33 <sup>e</sup>	28.83 <sup>b</sup>	33.85 <sup>b</sup>	93.68 <sup>a</sup>	84.35 <sup>a</sup>	85.45 <sup>a</sup>
N1	I1	82.11 <sup>cde</sup>	21.82 <sup>f</sup>	26.40 <sup>e</sup>	92.17 <sup>ef</sup>	83.47 <sup>abcd</sup>	84.48 <sup>bc</sup>
	I2	90.96 <sup>ab</sup>	29.05 <sup>e</sup>	35.66 <sup>cd</sup>	93.70 <sup>bc</sup>	83.33 <sup>abcd</sup>	85.40 <sup>ab</sup>
	I3	93.81 <sup>a</sup>	38.15 <sup>b</sup>	46.77 <sup>a</sup>	95.07 <sup>a</sup>	83.65 <sup>abc</sup>	85.11 <sup>ab</sup>
	均值	88.96 <sup>a</sup>	29.67 <sup>ab</sup>	36.28 <sup>a</sup>	93.64 <sup>a</sup>	83.49 <sup>ab</sup>	85.00 <sup>b</sup>
N2	I1	68.48 <sup>f</sup>	24.45 <sup>f</sup>	26.85 <sup>e</sup>	92.05 <sup>f</sup>	82.61 <sup>cd</sup>	83.02 <sup>d</sup>
	I2	83.28 <sup>bcd</sup>	30.5 <sup>de</sup>	33.74 <sup>d</sup>	92.65 <sup>def</sup>	82.92 <sup>bcd</sup>	84.18 <sup>bcd</sup>
	I3	77.29 <sup>de</sup>	36.66 <sup>bc</sup>	41.95 <sup>b</sup>	94.34 <sup>ab</sup>	83.98 <sup>abc</sup>	85.00 <sup>abc</sup>
	均值	76.35 <sup>b</sup>	30.53 <sup>ab</sup>	34.18 <sup>b</sup>	93.01 <sup>a</sup>	83.17 <sup>b</sup>	84.07 <sup>c</sup>
N3	I1	75.21 <sup>ef</sup>	17.70 <sup>g</sup>	19.24 <sup>f</sup>	89.71 <sup>g</sup>	83.25 <sup>abcd</sup>	82.99 <sup>d</sup>
	I2	85.30 <sup>bc</sup>	33.81 <sup>cd</sup>	33.13 <sup>d</sup>	93.09 <sup>cde</sup>	82.23 <sup>d</sup>	83.83 <sup>cd</sup>
	I3	78.80 <sup>cde</sup>	43.42 <sup>a</sup>	36.78 <sup>c</sup>	93.30 <sup>cd</sup>	83.53 <sup>abcd</sup>	83.77 <sup>cd</sup>
	均值	79.77 <sup>b</sup>	31.64 <sup>a</sup>	29.72 <sup>c</sup>	92.03 <sup>b</sup>	83.00 <sup>b</sup>	83.53 <sup>d</sup>
施氮		0.0047 <sup>**</sup>	0.0679	0.0002 <sup>***</sup>	0.0094 <sup>**</sup>	0.0677	0.0001 <sup>***</sup>
灌溉		<0.0001 <sup>***</sup>	<0.0001 <sup>***</sup>	<0.0001 <sup>***</sup>	<0.0001 <sup>***</sup>	0.2173	0.1764
施氮×灌溉		0.0137 <sup>*</sup>	0.0005 <sup>***</sup>	0.0245 <sup>*</sup>	0.0002 <sup>***</sup>	0.4925	0.2457

注: \* 表示  $P < 0.05$  条件下的显著性; \*\* 表示  $P < 0.01$  条件下的显著性; \*\*\* 表示  $P < 0.001$  条件下的显著性,下同。

无显著影响(除 N 极显著影响叶含水率),就叶含水率均值而言,其随施氮量的增大呈极显著的先增大后减小变化趋势。灌溉、施氮及两者交互作用极显著影响果实含水率,在任一施氮水平条件下,果实含水率均随灌溉水平的增大而显著增大(除 N0 外),而果实含水率均值随施氮量的增大而逐渐减小。

## 2.3 水氮交互作用对番茄地上各组织 N、P、K 累积量的影响

### 2.3.1 水氮交互作用对番茄地上各组织 N 累积量的影响

由表 2 可知,施氮、灌溉及两者交互作用均显著

影响茎、叶和果实中 N 的累积量,其中果实中 N 累积量最大,叶次之,茎最小(图 2a)。由图 2a 可知,在任一施氮条件下,茎、叶和果实中 N 累积量均随灌溉水平的增大而显著增大,其中在 N1 时地上组织 N 累积量最大,与 N1I3 比较,N1I2 果实、茎和叶中 N 累积量分别下降了 10.67%、25.00% 和 28.37%。在水分胁迫(I1)条件下,N0、N1、N2、N3 处理果实中 N 累积量分别占地上组织 N 累积量的 51.66%、61.13%、61.89% 和 71.23%,而在中水和高水(I2 和 I3)处理无明显规律。

由图 2a 还可知,就相同灌溉水平不同施氮条件

表2 番茄植株各器官 N、P、K 累积量方差分析结果

Tab.2 Variance analysis result of N, P and K accumulation in aboveground organs of tomato plants

项目	N 累积量			P 累积量			K 累积量		
	茎	叶	果实	茎	叶	果实	茎	叶	果实
施氮	0.000 4 ***	0.001 4 **	<0.000 1 ***	0.050 8	<0.000 1 ***	0.001 0 **	0.009 5 **	0.000 2 ***	0.000 4 ***
灌溉	<0.000 1 ***	<0.000 1 ***	0.000 3 ***	<0.000 1 ***	<0.000 1 ***	<0.000 1 ***	<0.000 1 ***	<0.000 1 ***	<0.000 1 ***
施氮 × 灌溉	<0.000 1 ***	0.007 0 **	0.026 4 *	0.002 1 **	0.132 1	0.001 9 **	0.000 3 ***	0.001 1 **	0.096 6

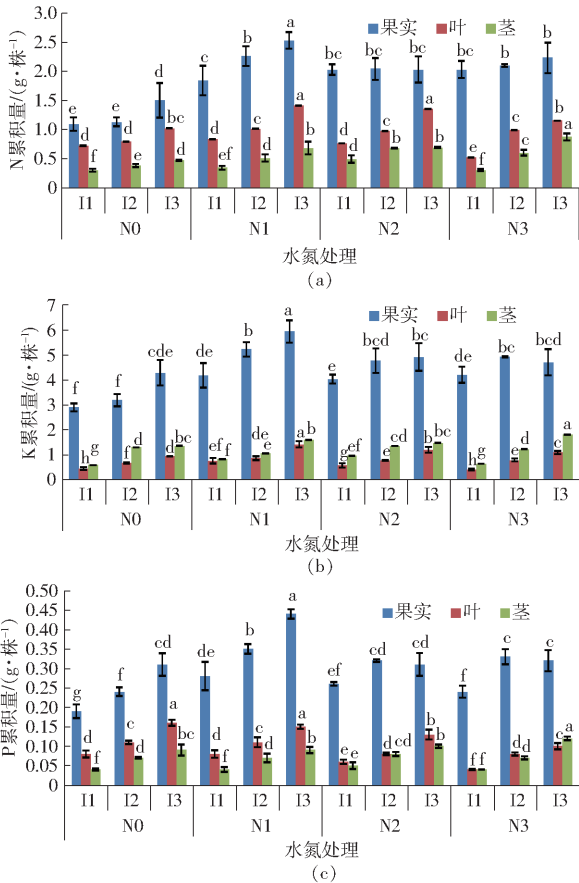


图2 水氮交互条件下番茄果实、叶、茎 N、P 和 K 的累积量  
Fig.2 N, P and K accumulation of fruit, leaf and stem of tomato with different irrigation water and nitrogen levels

下 N 累积量平均值而言, I1、I2 和 I3 的果实中 N 累积量分别占地上组织 N 累积量的 62.06%、55.95% 和 52.14%, 说明水分胁迫 (I1) 更有助于番茄生殖器官 N 的累积。就相同施氮水平不同灌溉水平下 N 累积量平均值而言, 茎、叶和果实中 N 累积量均随施氮量的增大呈显著的先增大后减小趋势, 其中茎 N 累积量在 N2 最大, 为 0.62 g/株, 叶和果实 N 累积量均在 N1 最大, 分别为 1.08、2.21 g/株, 与 N1 处理比, N2 茎中 N 累积量提高了 21.57%, 但叶和果实中分别下降了 4.63% 和 8.14%。

### 2.3.2 水氮交互作用对番茄地上各组织 K 累积量的影响

番茄地上各组织中 K 累积量最大, 其中果实和茎中 K 的累积量均高于叶的 (图 2b), 这是番茄植株对钾吸收的一个显著特点。就相同灌溉水平不同

施氮条件下 K 累积量平均值而言, I1、I2 和 I3 果实中 K 累积量分别占地上组织 K 累积量的 75.0%、69.53% 和 64.84%, 说明水分胁迫 (I1) 更有助于番茄生殖器官中 K 的累积; 就相同施氮水平不同灌溉水平下 K 累积量平均值而言, 茎、叶和果实中 K 累积量均随施氮量的增大呈显著的先增大后减小变化趋势 (图 2b), 其中茎中 K 累积量在 N2 处理时最大, 为 1.25 g/株, 叶和果实中 K 累积量均在 N1 处理时最大, 分别为 1.00、5.13 g/株。与 N1 处理比较, N2 茎中 K 累积量提高了 8.70%, 叶和果实中的分别下降了 16.00% 和 10.72%。

由图 2b 还可知, 在任一施氮水平条件下, 茎、叶和果实 (N3 除外) 中 K 累积量均随灌溉水平的增大而极显著增大, 其中 N1 条件茎、叶、果 K 总累积量最大, 与 N1I3 处理比, N1I2 处理果实中 K 累积量下降了 12.08%。

### 2.3.3 水氮交互作用对番茄地上各组织 P 累积量的影响

植株中 P 含量虽少, 但其与活细胞的能量代谢、各种有机物的合成和分解代谢、信号转导和基因表达调控等几乎所有的生命活动密切相关, 因此植株体内 P 含量对植物具有重要作用。由图 2c 可知, 果实中 P 累积量最大, 叶次之, 茎最小。在各施氮水平条件下, 茎、叶和果实 (果实中除 N2 和 N3 外) 中 P 累积量均随灌溉水量的增大而显著增大, 但果实中 P 累积量占地上组织 P 累积量的比例随灌溉水量的增大而减小, 说明灌溉水量增大不利于番茄生殖器官对 P 的吸收。在水分胁迫 (I1) 条件下, N0、N1、N2 和 N3 处理果实中 P 累积量分别占地上组织 P 累积量的 61.29%、68.29%、70.27% 和 75.00%, 而在中水和高水 (I2 和 I3) 条件下, 果实中 P 累积量占地上组织 P 累积量比例无明显规律, 说明水分胁迫条件下增施氮肥有利于番茄生殖器官中 P 的累积。由表 2 可知, 灌溉对果实、茎和叶中 P 累积量均产生极显著影响, 施氮显著影响叶和果实中 P 累积量, 而两者交互作用均极显著影响果实和茎中 P 累积量。就相同施氮水平不同灌溉条件下 P 累积量平均值而言, 果实和叶中 P 累积量最大值均出现在 N1 处理, 分别为 0.36、0.11 g/株, 茎的最大值出现在

N<sub>2</sub> 处理,为 0.08 g/株,与 N<sub>2</sub> 比较,N<sub>1</sub> 茎中 P 累积量提高了 15.27%,但果实和叶分别下降了 19.44% 和 18.18%。

## 2.4 番茄地上组织养分累积量、干物质质量、养分含量和含水率之间的关系

地上组织养分累积量是对应的干物质质量与养分含量的乘积。图 3a 结果表明地上组织养分累积量与地上干物质质量呈极显著的正相关关系,图 3d 表明地上组织 P 累积量与其含量呈显著的负相关,而 N

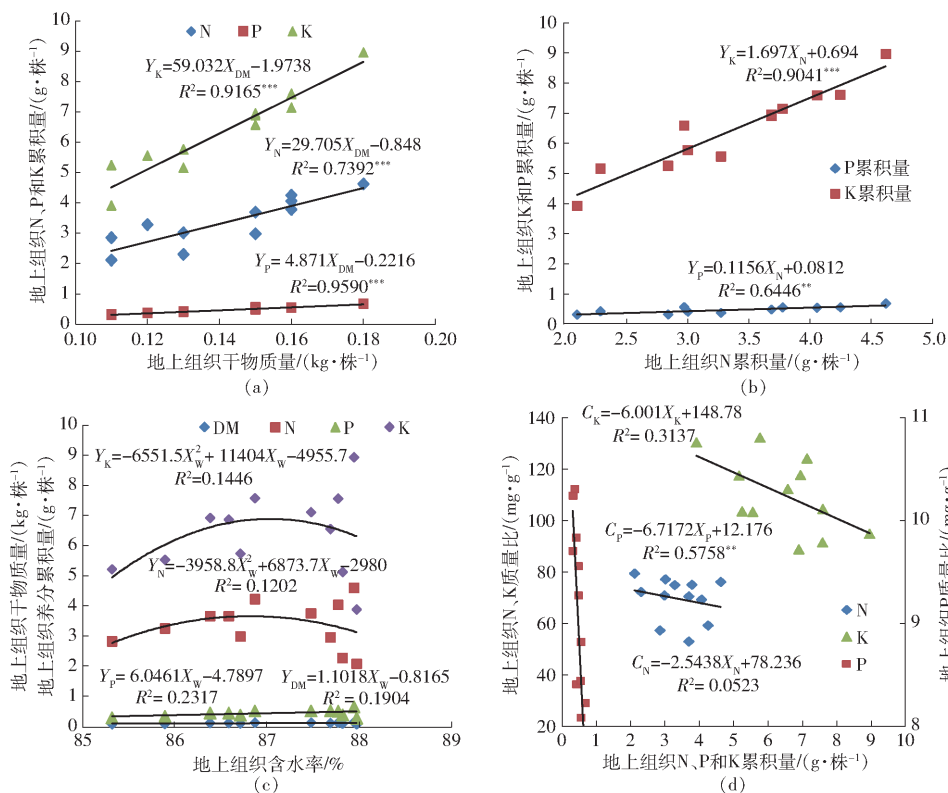


图3 地上组织养分累积量、干物质质量、含水率和养分含量之间的关系

Fig. 3 Relationship between nutrient accumulation, dry matter content, water content and nutrient content in aboveground tissues

## 3 讨论

### 3.1 水氮供应对番茄生长发育的影响

水分亏缺不仅会导致作物发生一系列的生理变化,如气孔关闭、光合作用下降、植株水势降低、植株叶片受损等<sup>[5]</sup>,水分亏缺还会抑制作物对养分的吸收(图2),因土壤有效含水率降低导致养分的溶解度降低,进而减小作物的生物量(表1),最终使作物叶面积、株高和茎粗生长缓慢,本文研究结果与文献[15-16]的研究一致。施氮量为 0.13 g/kg 时,叶面积、茎粗和株高最大,这是因为施氮量超过番茄最佳需氮量时会使作物根际土壤渗透压增大,作物需要更多的能量来保持细胞的含水率,从而使蒸腾作用和养分吸收下降,因此作物的生长也受到一定的影响<sup>[2]</sup>。

和 K 累积量与其含量也呈负相关,但无显著影响,故养分累积量主要受干物质质量影响,其次受养分含量影响。图 3b 结果表明地上组织 N 累积量与 P 和 K 累积量均呈极显著的正相关关系 ( $R^2$  分别为 0.6446 和 0.9041),说明施氮可以促进番茄植株对养分的吸收,特别是促进对 K 的吸收。由图 3c 可知,地上组织含水率与其 N、P、K 累积量和干物质质量无显著关系,说明地上组织含水率对干物质质量和养分累积量无影响。

### 3.2 水氮供应对番茄地上各组织含水率和生物量的影响

研究表明,番茄果实含水率随灌溉水平的增大而显著增大,而茎和叶含水率均不受灌溉水平的影响,MOLES<sup>[17]</sup> 研究表明番茄茎、叶和果实含水率是否受灌水量影响主要由番茄品种决定。叶和果实含水率均随施氮量的增大而显著减小,其原因可能是增施氮肥增加了渗透压而降低茎秆与果实和叶片之间的水势梯度,使叶和果实部位吸水难度加大而使其含水率降低,而施氮量对茎含水率的影响不显著有可能是因为茎生长发育所需氮养分阈值要高于叶和果实的(图2a),茎从土壤中吸 N 量要远大于水对其的稀释作用。

番茄地上各组织干物质质量随灌溉水平的增大而显著增大,是因灌水量增多提高了作物根际土壤渗透势和作物蒸腾作用<sup>[2]</sup>,促进植株主动运输和对养



分的吸收(图2),故地上各组织干物质量增多,本研究结果与文献[18-20]的研究结论一致。施氮显著影响番茄果实和叶干物质量( $P < 0.01$ ),果实、叶和地上总干物质量随施氮量的增大呈先增大后减小变化趋势,施氮量为0.13 g/kg时干物质量最大,有可能是因为施氮量太大抑制了番茄植株各器官组织对养分氮磷钾的吸收(图2),进而影响到各器官干物质量形成。茎干物质量在各施氮水平下无显著差异,是因茎生长主要在番茄生育前期,底肥的施入可能足以满足其生长需求。N2I2和N3I2果实干物质量分别大于N2I3和N3I3,是因为N2I3和N3I3果实含水率分别大于N2I2和N3I2(表1)。

### 3.3 水氮供应对番茄植株 N、P 和 K 累积量的影响

番茄各组织 N、P、K 累积量随灌溉水平的增大而增大,这与 LAHOZ 等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。GONZALEZ-DUGO 等<sup>[22]</sup>研究发现,在干旱胁迫条件下尽管给植株提供足够矿质氮,但大部分植株氮吸收量仍会下降。本研究中,在水分胁迫条件下(II),地上各组织 N、P、K 累积量减小主要原因有两方面:①水分胁迫使土壤有效含水率降低,N、P、K 的溶解度随之降低,致使作物根际周围可利用的养分减少<sup>[2]</sup>,导致作物根部养分运输困难。②水分胁迫可能会使土壤中微生物活性降低,从而抑制了作物对养分的吸收<sup>[23]</sup>。干旱胁迫对养分吸收的负面影响可以通过适度增加氮素的供应来减轻,在水分胁迫(II)条件下(图2),N1处理各组织中 N、P、K 的累积量均比 N0(不施氮)处理大,但施氮量太大会抑制各器官对养分的吸收,因为施氮量过大,在一定程度上降低了作物根际的土壤溶质势,造成水势降低,作物水分和养分运输受阻,进而影响作物对养分的吸收,而一定的施氮量会提高作物的抗旱能力进而促进植物对养分的吸收。

各组织养分累积量取决于干物质量和养分含量<sup>[24]</sup>。各施氮水平下,灌水量对茎叶干物质量均产生显著影响,而对茎叶含水率无显著影响,因此灌溉对茎叶 N、P、K 累积量均产生显著性差异,主要是由干物质量引起的<sup>[24]</sup>。本研究也表明,地上组织 N、P、K 累积量与干物质量之间呈极显著的正相关关系,与养分含量呈显著的负相关关系(N 和 K 除

外),而与含水率无显著关系(图3)。与 N2 处理比较,N1 茎中 N、K、P 累积量均有所下降,但果实和叶中 N、P 和 K 累积量提升幅度较大,特别是 P 和 K 提升幅度均在 20% 左右,这与干物质量在各施氮水平下的均值变化是一致的(表1)。是因为叶中 N、K、P 累积量与植物体内碳水化合物的合成、代谢、运输及光合作用和呼吸作用有关,N、K、P 充足则会促进碳水化合物的合成、代谢、运输以及光合作用产物更多的转向生殖器官,最终使叶和果实干物质量增多<sup>[3]</sup>。

DOBERMAANN 等<sup>[25]</sup>研究表明,给植株提供足够的有效氮可以促进植株对磷钾养分的吸收。而本研究回归分析也表明,地上组织 N 累积量与 K 累积量( $R = 0.9508$ )和 P 累积量( $R = 0.8029$ )呈极显著的正相关关系,由此说明增施氮肥可促进番茄对 P 和 K 的吸收,进而促进番茄的生长及产量和品质的形成。

## 4 结论

(1) N1I3 处理最有利于番茄植株叶面积、茎粗和株高的生长。茎和叶的含水率在各处理间无明显变化规律,而果实含水率随灌溉水平的增大而显著增大,随施氮量的增大而减小。N1 最有利于番茄各组织干物质量的形成和同化物向生殖器官的分配。N1 最有利于番茄茎、叶和果实对 N、P、K 的吸收,水分胁迫条件下增施氮肥有利于 N、P 和 K 更多的向生殖器官转移。

(2) 地上组织 N、P、K 累积量主要由干物质量决定,其次由对应的养分含量决定,不受组织含水率影响,增施氮肥有利于各组织对 P 和 K 的吸收,特别是促进对 K 的吸收。

(3) 与 N1I3 比较,N1I2 的株高、叶面积、茎粗、果实干物质量和果实中 N、P 和 K 累积量分别下降了 2.14%、23.30%、7.49%、3.04%、10.67%、20.45% 和 12.08%,但节水 25%。综合考虑认为 N1I2(施氮量为 0.13 g/kg 和灌水下限为 65% 田间持水率)组合最适合温室番茄植株的生长,养分的吸收和同化物的分配,并达到以水促肥、以肥调水的目的,为最终产量和品质的形成奠定基础。

## 参 考 文 献

- [1] BADR M A, ABOUHUSSEIN S D, ELTOHAMY W A. Tomato yield, nitrogen uptake and water use efficiency as affected by planting geometry and level of nitrogen in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 169:90-97.
- [2] SHESHBAHREH M J, DEHNAVI M M, SALEHI A, et al. Effect of irrigation regimes and nitrogen sources on biomass production, water and nitrogen use efficiency and nutrients uptake in coneflower (*Echinacea purpurea* L.) [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 358-367.
- [3] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 102-103.

- [4] 孙永健. 水氮互作对水稻产量形成和氮素利用特征的影响及其生理基础[D]. 成都:四川农业大学, 2010.  
SUN Yongjian. Effects of water-nitrogen interaction on yield formation and characteristics of nitrogen utilization in rice and its physiological basis[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [5] TALBI S, ROMERO-PUERTAS M C, HERNANDEZ A, et al. Drought tolerance in a Saharian plant *Oudneya africana*: role of antioxidant defences[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 111: 114 – 126.
- [6] WARAICH E A, AHMAD R, ASHRAF M Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(6): 764 – 777.
- [7] 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.  
TANG Mingyao, ZHANG Yan, HU Wei, et al. Effects of different nitrogen rates on nutrition absorption, distribution and yield in tomato[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1238 – 1245. (in Chinese)
- [8] DRENOVSKY R E, KHASANOVA A, JAMES J J. Trait convergence and plasticity among native and invasive species in resource-poor environments[J]. *American Journal of Botany*, 2012, 99(4): 629 – 639.
- [9] MIN J, ZHAO X, SHI W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464 – 472.
- [10] SUN Y, HU K, FAN Z, et al. Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU – Rotate\_N model[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128: 72 – 84.
- [11] 龚雪文, 刘浩, 孙景生, 等. 调亏灌溉对温室番茄生长发育及其产量和品质的影响[J]. *节水灌溉*, 2016(9): 52 – 56.  
GONG Xunwen, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Effects of regulated deficit irrigation on solar greenhouse tomato growth, yield and quality[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(9): 52 – 56. (in Chinese)
- [12] NOVOZAMSKY I, ECK R V, SCHOUWENBURG J C V, et al. Total nitrogen determination in plant material by means of the indophenol-blue method[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1974, 22(1): 3 – 5.
- [13] PATTERSON B D, MACRAE E A, FERGUSON I B. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium(IV) [J]. *Analytical Biochemistry*, 1984, 139(2): 487 – 492.
- [14] REITEMEIER R F. Methods of analysis for soils, plants, and waters[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27(1): 68 – 69.
- [15] 王学文, 付秋实, 王玉珏, 等. 水分胁迫对番茄生长及光合系统结构性能的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2010, 15(1): 7 – 13.  
WANG Xuewen, FU Qiushi, WANG Yuyu, et al. Effects of water stress on growth and photosynthetic system characters of *Lycopersicon esculentum* L. [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(1): 7 – 13. (in Chinese)
- [16] 牛云慧, 曹红霞, 石小虎, 等. 水分亏缺对温室番茄生长发育及生理特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(4): 67 – 70.  
NIU Yunhui, CAO Hongxia, SHI Xiaohu, et al. Effects of water deficit on growth-development and physiological characteristics of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(4): 67 – 70. (in Chinese)
- [17] MOLES T M, MARIOTTI L, PEDRO L F D, et al. Drought induced changes of leaf-to-root relationships in two tomato genotypes[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2018, 128: 24 – 31.
- [18] PATANE C, TRINGALI S, SORTINO O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(4): 590 – 596.
- [19] ZHANG L X, LI S X, ZHANG H, et al. Nitrogen rates and water stress effects on production, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities in two maize (*Zea mays* L.) Genotypes[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 193(6): 387 – 397.
- [20] DARWISH T M, ATALLAH T W, HAJHASAN S, et al. Nitrogen and water use efficiency of fertigated processing potato[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1 – 2): 95 – 104.
- [21] LAHOZ I, PEREZ-DE-CASTRO A, VALCARCEL M, et al. Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 200: 55 – 65.
- [22] GONZALEZ-DUGO V, DURAND J L, GASTAL F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3): 529 – 544.
- [23] MARSCHNER H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London: Academic Press, 1995: 549 – 561.
- [24] ERDAL I, ERTEK A, SENYIGIT U, et al. Effects of different irrigation programs and nitrogen levels on nitrogen concentration, uptake and utilisation in processing tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2006, 46(12): 1653 – 1660.
- [25] DOBERMANN A, FAIRHURST T. Rice: nutrient disorders & nutrient management[M]. Makati City: International Rice Research Institute, 2000.