

氮量与株间竞争对番茄幼苗 根系形态、生物量积累及氮素利用的影响

李双, 高阳, 司转运, Tefo Steve Ramatshaba, 段爱旺*

(中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点实验室, 河南 新乡 453002)

摘要:【目的】阐明不同氮素供应和株间竞争对番茄幼苗根系形态、叶片光合特性、地上部生物量积累及氮素吸收利用的影响。【方法】在步入式人工气候室内,以盆栽番茄幼苗为研究对象,营养液的氮质量浓度设置为高氮(15 mmol/L, N15)和低氮(1 mmol/L, N1)2个水平,株间竞争设置为每桶种植4株(P4)和单株种植(P1)2个水平,所有处理均充分供水。【结果】随幼苗生长, N15P1处理的幼苗根系形态、 P_n 和 G_s 显著优于其他处理,且相同氮质量浓度下4株种植幼苗的 P_n 小于单株种植。番茄幼苗的单株叶面积随施氮量的增加而增加,在相同氮素供应条件下,株间竞争的存在显著降低幼苗个体的光合面积,进而影响干物质积累。土壤硝态氮量和叶片全氮量均随施氮量的增加而增加,竞争群体叶片氮吸收量呈增加趋势。【结论】营养液中氮质量浓度为15 mmol/L,单株种植的幼苗个体长势最佳;营养液中氮质量浓度为15.0 mmol/L,竞争群体番茄幼苗的氮吸收量最高。

关键词:株间竞争;根系形态;光合特性;生物量积累;氮素利用

中图分类号:S274.3

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0020

李双,高阳,司转运,等. 氮量与株间竞争对番茄幼苗根系形态、生物量积累及氮素利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018,37(5):13-18,74.

0 引言

近年来,在土地资源日益紧张的环境下,适宜密度栽培作为一种能够提高作物群体产量的栽培模式越来越受到学者和生产者的广泛关注^[1-2]。尽管高密度栽培能提高作物群体对光、水、肥的综合利用,依靠群体发挥增产效益^[3],但有研究认为高密度种植加大了群体内个体对养分和生长空间的竞争强度,不利于作物根系的发育^[4],并使个体生长受到抑制。Vysotskaya等^[5]发现株间竞争易降低莴苣和番茄的气孔导度和蒸腾速率,影响地下和地上部干物质积累。氮素作为限制番茄生长发育以及产量形成的重要因素,对根系形态和生理生态特征影响显著^[6]。研究表明,植物根系的生长情况与氮素营养密不可分,根系氮营养过少会影响根系伸长、减少根系吸收表面积,增加根冠比,影响光合产物分配;而过量施氮反而抑制根系生长,进而影响冠层结构^[7],降低氮肥利用率^[8]。适宜的密植和施氮量可使群体维持较高的光合面积,提高群体光合效率,减少株间竞争强度,促进群体干物质积累^[9]。而李广浩等^[2]研究认为相同施氮水平下增加密植能够增加不耐密品种作物的空杆率和倒伏率,对籽粒产量增加不显著,但可显著提高氮素利用率。盛耀辉等^[10]研究认为,氮肥对产量的调控作用尤为重要,且氮肥与密度竞争间的互作效应显著。基于此,合理的氮肥水平和株间竞争是作物充分利用水分、养分等资源,构建良好群体结构,发挥群体优势的基础,在作物生产中,二者要高度协调^[11]。

目前,国内外已有许多有关氮素对玉米、小麦等作物根系形态和生理生态影响的研究,也初步明确了竞争对作物生理过程的影响机理,然而关于氮素和株间竞争互作对番茄苗期根系形态特征和地上部生长发育的调控效应尚不明晰。因此,为优化番茄的氮肥施用和株间竞争,通过设置不同氮肥水平和株间竞争处理,

收稿日期:2017-12-04

基金项目:中国农业科学院基本科研业务费项目(FIRI2016-05);国家自然科学基金项目(51409249)

作者简介:李双(1992-),女。硕士研究生,主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: li_shuang0712@163.com

通信作者:段爱旺(1963-),男。研究员,主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: duanaiwang@aliyun.com

研究氮素供应和株间竞争双因素对番茄苗期根系形态特征、幼苗生物量积累及氮素吸收利用的影响,为番茄合理密植及精准氮素施用提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在中国农业科学院七里营综合试验基地的人工气候室内进行。气候室光源由卤素灯和钠灯提供,植株冠层上方的光强约为 $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;每天光照时间为06:00—20:00,共14 h,温度为 $25\sim 30\ ^\circ\text{C}$,相对湿度为40%~45%。试验为氮素和株间竞争2因素设计,其中2个氮素水平分别为:低氮(1 mmol/L, N1)与高氮(15 mmol/L, N15);2个株间竞争分别为:单株种植处理(P1)和4株种植处理(P4)。试验采用随机区组设计,每个处理共10次重复。供试番茄品种为“荷兰108”。种子清洗后放于装有基质(水藓泥炭,品氏基质,丹麦)的育苗盆中且保持湿润,黑暗条件 $25\sim 28\ ^\circ\text{C}$ 下培育4 d,然后置于步入式人工气候室内培育,待幼苗长至2叶1心时,挑选长势基本一致的幼苗分单株和4株移栽到装有细砂的桶内。桶的高度为15 cm,外径为16 cm,每桶装细砂的质量为3.5 kg。

移栽时每桶各浇600 mL不同N质量浓度的1/2 Hoagland 营养液(N1的N质量浓度为1 mmol/L, N15的N质量浓度为15 mmol/L),N1中的营养液用 Cl^- 平衡 NO_3^- 差异,其余养分离子质量浓度不变,用KOH溶液将pH值调至 6.0 ± 0.2 ,桶间距为10 cm,共培育16 d。桶表面覆盖铝箔以防止土壤蒸发,保持培养介质含水率占沙子饱和含水率的70%~75%(盆栽桶总质量4.53~4.55 kg),每天08:00和18:00称取桶质量计算灌水量,每次上午灌水时,每个处理先将20 mL的1/2 Hoagland 营养液(对于不同N处理,营养液中含N量不同)与二次水均匀混合,后浇至桶总质量上限,下午直接用二次水浇至上限。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系形态指标

分别于移栽后第4、8和12天,将单株和4株处理的植物根系放在尼龙袋内冲洗干净后,分多次置于 $30\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 的树脂玻璃槽内,注水15 mm左右,用扫描仪(EPSON scan v3.771,日本)在400 dpi的精度下扫描根系,采用WinRHIZO Pro 2007a软件分析根系长度、根系表面积、平均直径和根系总体积(其中4株处理取均值)等指标。

1.2.2 叶面积与根冠比

采用便携式叶面积仪(LI-3000C, LICOR, 美国)测定番茄幼苗的叶面积。测定叶面积后将番茄幼苗根、茎、叶在烘箱内 $105\ ^\circ\text{C}$ 下杀青30 min,然后 $75\ ^\circ\text{C}$ 下烘至恒质量,称量其地上和地下干物质质量,计算根冠比。

1.2.3 叶片净光合速率和气孔导度

考虑到移栽后前8 d的番茄幼苗长势较弱,因此只在移栽后第12天,于09:00—11:00采用LI-6400XT便携式光合作用测定系统(LICOR, 美国)测定最新完全展开叶片中部位置的净光合速率和气孔导度。测定条件为:红蓝光源叶室,设定PAR为 $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, CO_2 样品物质的量浓度设为 $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,叶室温度为 $(28\pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$ 。

1.2.4 基质硝态氮量和叶片全氮量

移栽第16天,待番茄幼苗收获后,取桶内细砂过2 mm筛,称取10 g样品,加入50 mL 2 mmol/L KCl溶液(水土质量比为5:2),振荡30 min,过滤,采用AA3流动分析仪(SEAL, 德国)测定 NO_3^- 量。植株叶片样品烘干称取质量后,磨碎过0.5 mm筛,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮,用AA3流动分析仪测定番茄叶片的全氮量。

叶片和群体的氮吸收量计算方法为:

单株叶片的氮吸收量=单株叶干质量 $\times$ 叶片全氮量

群体叶片的氮吸收量=群体叶干质量 $\times$ 叶片全氮量

1.3 数据处理

数据、图表及文字处理采用Office 2010软件,用DPS 7.05进行双因素方差分析(least significant difference test, LSD, $p<0.05$)。图表中数据均表示为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 氮素供应和株间竞争对番茄幼苗根系形态指标和根冠比的影响

图1(a)和图1(b)是不同氮质量浓度和株间竞争下番茄幼苗的根系总长和根系总表面积随移栽时间的变化情况。移栽第8天时,N15P1处理的根系总长度及根系总表面积较N1P1处理分别增加54.7%、51.9%,且与N1P1处理差异显著($p<0.05$);N15P1处理的根系总长度及根系总表面积分别较N15P4处理增加35.7%和45.3%,且二处理的根系总表面积差异显著($p<0.05$);N1P1处理的根系总长度及根系总表面积分别比N1P4处理增加44.6%和32.5%,且差异显著($p<0.05$)。移栽第12天时,N15P1处理的根系总长度和根系总表面积分别较N1P1显著提高62.3%、69.7%;N15P1处理的根系总长度及根系总表面积分别较N15P4处理增加18.9%和37.3%,且差异显著($p<0.05$);N1P1处理的根系总长度及根系总表面积分别较N1P4处理增加57.0%和27.9%,且差异显著($p<0.05$)。

由图1(c)和图1(d)给出的根系平均直径和根系总体积的动态变化可以得出,移栽第8天时,N15P1处理的根系平均直径和根系总体积较N1P1处理分别增加13.5%、86.8%,且差异显著($p<0.05$);N15P1处理的根系平均直径和根系总体积分别比N15P4处理增加8.2%和33.5%,且差异显著($p<0.05$);N1P1处理的根系平均直径和根系总体积分别比N1P4处理增加5.1%和35.7%,且差异显著($p<0.05$)。移栽第12天时,N15P1处理的根系平均直径和根系总体积较N1P1处理分别显著增加11.1%和73.7%;N15P1处理的根系平均直径和根系总体积分别较N15P4处理显著增加19.6%和19.5%,N1P1处理的根系平均直径和根系总体积分别比N1P4处理显著增加4.1%和30.1%。

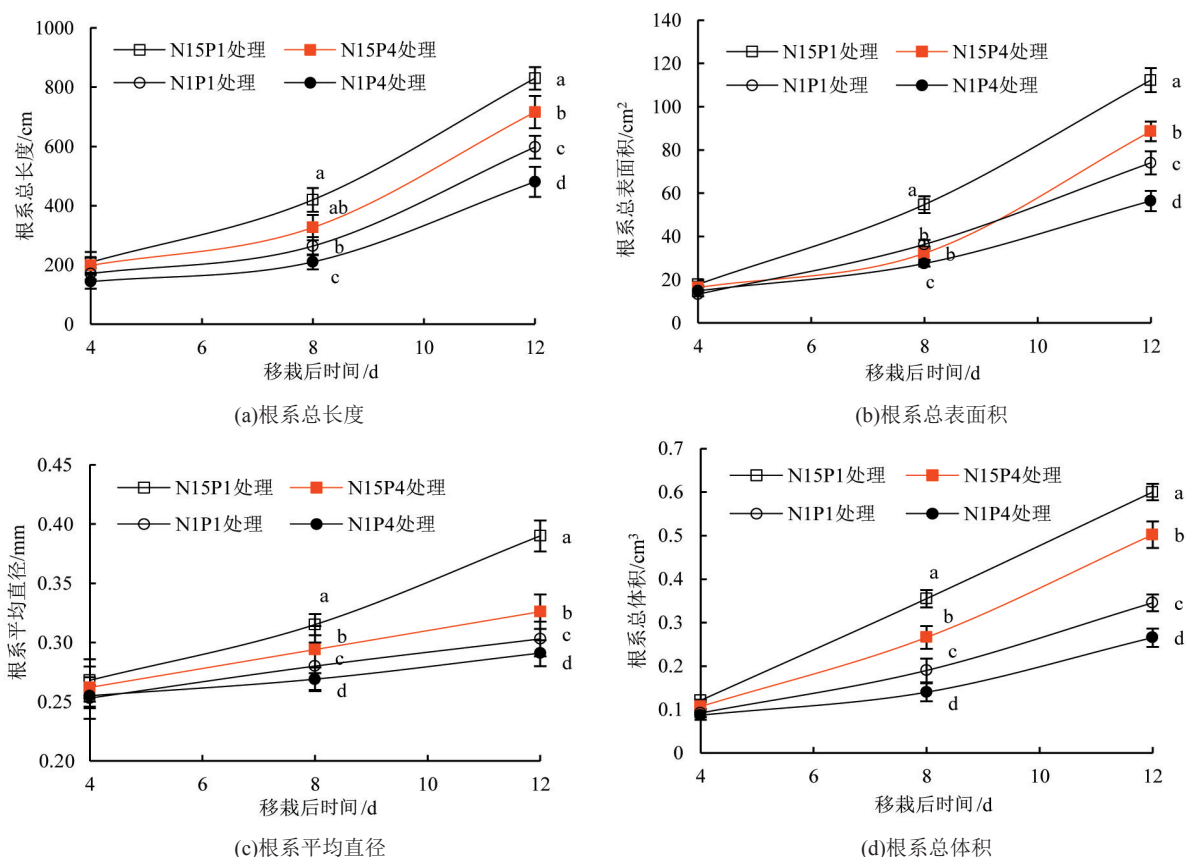


图1 氮素供应和株间竞争条件下根系形态指标

表1 氮素供应和株间竞争条件下根系形态指标方差分析结果

因素	根系总长度		根系总表面积		根系平均直径		根系总体积		根冠比	
	8 d	12 d	8 d	12 d	8 d	12 d	8 d	12 d	8 d	12 d
氮素供应	*	**	**	*	*	**	**	**	*	**
株间竞争	*	*	*	*	ns	*	*	**	*	*
氮肥×竞争	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*

注 *表示在0.05水平显著,**表示在0.01水平显著,ns表示差异不显著。下同。

由表1可知,氮素供应对番茄幼苗根系总长、总表面积、平均直径、总体积及根冠比的影响显著或极显著;株间竞争对移栽第8天和第12天的根系总长度、根系总表面积、根系总体积、根冠比影响显著($p<0.05$),对移栽8 d时的根系平均直径影响不显著,且氮素供应和株间竞争的交互作用对移栽第12天时的根长、根系总体积及根冠比影响显著($p<0.05$)。

由图2可以看出,N1P4处理的番茄幼苗根冠比最大,且显著高于其他处理。移栽第8天和第12天时,相同氮素条件下,N15P4处理的根冠比分别较N15P1处理增加37.2%和21.4%,且差异显著($p<0.05$);N1P4处理的根冠比分别较N1P1处理显著增加38.9%和15.2%。相同竞争条件下,N1P1处理的根冠比较N15P1处理显著增加49.1%、59.2%;N1P4处理的根冠比较N15P4处理显著增加80.4%、51.2%。可见,番茄幼苗根冠比随供氮水平的提高呈降低趋势,幼苗在低氮条件下易将更多干物质分配到根系,一定程度上促进根系发育,且相同氮素供应条件下,邻近植株的出现能够影响幼苗根系发育。

2.2 氮素供应和株间竞争对番茄幼苗光合速率和气孔导度的影响

氮素供应和株间竞争对移栽第12天的番茄叶片的净光合速率和气孔导度影响显著或极显著,但二者交互作用不显著(表2)。番茄幼苗叶片的净光合速率随施氮量增加而增大,N15P1处理的净光合速率最大,且与其他处理差异显著($p<0.05$)。相同种植条件下,增施氮素有利于提高幼苗净光合速率,N15P1的净光合速率较N1P1处理增加15.5%,且差异显著($p<0.05$);相同氮肥供应下,净光合速率由于株间竞争的影响呈降低趋势,N15P1处理较N15P4处理显著增加14.4%,N1P1处理较N1P4处理显著增加8.1%。番茄幼苗叶片的气孔导度对氮素供应与株间竞争的响应规律与净光合速率相同,气孔导度随施氮量的增加呈增加趋势,N15P1处理的气孔导度最大,且显著高于N1P1、N1P4处理的。相同氮肥供应条件下,N15P1处理的气孔导度略高于N15P4处理的,且差异并不显著($p>0.05$),而N1P1处理的气孔导度则较N1P4处理增大18.6%,且差异显著($p<0.05$)。可见,相同施氮量下,幼苗个体的气孔导度和光合速率因株间竞争强度的增加而降低,但适当增加氮素供应,可促进细胞气孔开放,提高幼苗的光合固碳能力。

表2 不同处理幼苗光合特性

处理	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
N15P1	13.70±0.71a	0.56±0.02a
N15P4	11.98±0.29b	0.52±0.03ab
N1P1	11.86±0.14b	0.51±0.03b
N1P4	10.97±0.37c	0.43±0.05c
氮素供应	**	*
F 检验 株间竞争	*	*
氮肥×竞争	ns	ns

2.3 氮素供应和株间竞争对番茄幼苗地上部生长发育的影响

表3为不同氮素供应和株间竞争条件下番茄幼苗叶面积和地上部生物量的变化情况。由表3可知,氮肥供应对幼苗叶面积和地上部生物量影响显著($p<0.05$),随移栽后培养时间的推延,株间竞争可显著影响幼苗的叶面积和地上部生物量,且在移栽第12天时,氮肥供应与株间竞争对番茄幼苗的叶面积和地上部生物量的交互作用达显著水平($p<0.05$)。

移栽第4天时,N15P1处理的叶面积与N15P4处理间的差异不显著($p>0.05$),较N1P1处理显著增加31.0%;N1P1处理的叶面积较N1P4处理增加16.5%,且差异显著($p<0.05$)。移栽第8天时,N15P1处理的叶面积最大,较N1P1处理显著增加87.4%,较N15P4处理显著增加32.4%,N1P1处理较N1P4处理显著增加44.2%。移栽第12天时,N15P1处理的叶面积较N1P1处理显著增加98.3%,N15P1处理较N15P4处理显著增加46.7%,N1P1处理较N1P4处理显著增加57.0%。

移栽第4、8和12天时,N15P1处理的地上部生物量显著高于N15P4、N1P1、N1P4处理的。移栽第8天和第12天时,N15P1处理的地上部生物量分别较N1P1处理分别增加88.4%、129.1%,且差异显著($p<0.05$);

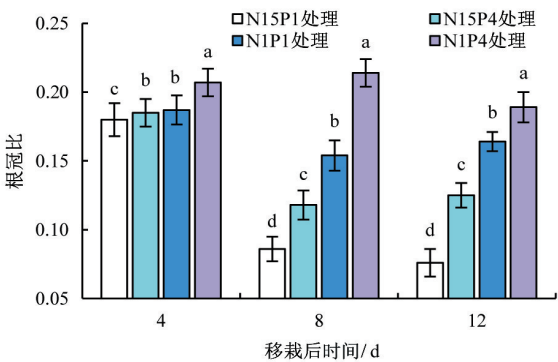


图2 不同处理根冠比随时间变化

N15P1 处理的地上部生物量较 N15P4 处理增加 49.1%、62.5%，N1P1 处理较 N1P4 处理增加 48.3%、33.8%，且各处理间差异均达到显著水平($p<0.05$)。

表 3 各处理不同叶龄幼苗叶面积和地上部生物量

处理	单株叶面积/(cm ² ·株 ⁻¹)			单株地上部生物量积累/(g·株 ⁻¹)		
	4 d	8 d	12 d	4 d	8 d	12 d
N15P1	12.69±0.99a	87.51±5.07a	138.23±9.71a	0.053±0.001a	0.243±0.024a	0.598±0.03a
N15P4	12.23±1.09a	66.08±2.16bc	94.21±7.58b	0.051±0.001b	0.163±0.008b	0.368±0.02b
N1P1	11.44±1.04c	46.69±1.98c	69.69±6.12c	0.037±0.001c	0.129±0.001c	0.261±0.01c
N1P4	9.82±0.84d	32.38±1.31d	44.38±3.70d	0.042±0.002bc	0.087±0.001d	0.195±0.01d
氮素供应	*	**	**	*	**	**
F 检验 株间竞争	ns	*	*	ns	*	*
氮肥×竞争	ns	ns	*	ns	*	*

2.4 氮素供应和株间竞争对番茄幼苗氮素吸收的影响

由表 4 可知，移栽第 12 天时，氮素供应和株间竞争对基质硝态氮量、叶片全氮量、单株和群体叶片吸氮量的影响显著或极显著，且二者交互作用对群体叶片吸氮量影响显著($p<0.05$)。N15P1 处理的基质中存留的硝态氮量最多，显著高于其他处理($p<0.05$)；相同氮素供应下，N15P4 处理较 N15P1 处理的基质硝态氮量减少 120.6%，N1P4 处理较 N1P1 处理减少 89.2%。N15P1 处理的叶片全氮量及单株叶片吸氮量最高，且显著高于 N1P1 和 N1P4 处理；相同氮素供应下，N15P4 处理的叶片全氮量及单株叶片吸氮量分别较 N15P1 处理减少 40.3%和 68.0%，且差异显著($p<0.05$)；N1P4 处理较 N1P1 处理显著减少 62.5%和 163.6%。相同氮素供应下，叶片全氮量和单株叶片吸氮量随株间竞争的增强而降低，相对于群体叶片吸氮量而言，N15P4 处理的群体叶片吸氮量最高，较 N15P1 处理显著增加 54.4%，N1P4 处理较 N1P1 处理增加 16.0%。可见，相同氮肥供应下，土壤中留存硝态氮量随单位面积上种植数量的增加而降低，株间竞争能够增加群体植株叶片吸氮量，提高氮素利用率。

表 4 各处理基质硝态氮和叶片吸氮量

处理	基质硝态氮量/(mg·g ⁻¹)	叶片全氮量/(mg·g ⁻¹)	单株叶片吸氮量/(mg·株 ⁻¹)	群体叶片吸氮量/(mg·盆 ⁻¹)
N15P1	26.67±2.61a	64.96±5.91a	31.50±1.89a	31.50±1.89b
N15P4	12.09±1.17b	46.31±3.25b	18.75±1.24bc	48.63±2.74a
N1P1	1.93±0.23c	28.67±2.10c	6.88±0.52c	6.88±0.52d
N1P4	1.02±0.26d	17.64±1.84d	2.61±0.17d	7.98±0.41c
氮素供应	**	**	**	**
F 检验 株间竞争	*	*	*	**
氮肥×竞争	ns	ns	ns	*

3 讨 论

3.1 氮素供应和株间竞争对番茄幼苗根系形态发育的调控作用

根系形态和空间分布是影响植株养分吸收的重要因素，很大程度上决定着作物获取养分的能力^[12]。试验表明，移栽第 12 天时，N15P1 处理的根系总长、根系表面积、平均直径、根系总体积较 N1P1 处理分别增加 62.3%、69.7%、28.7%、73.7%，与朱晋宇等^[6]研究认为施氮量能显著改善番茄幼苗根系构型的研究结果一致。同时，番茄幼苗的根系形态指标随株间竞争的出现呈不同程度的降低趋势，原因可能为盆栽种植根系生长空间受限，群体根系分布集中，养分水分竞争强度随之增大，造成根系生长饥饿，影响根系发育，这与陈延玲等^[13]在水培条件下发现苗期作物根系生长对密度响应更为强烈，密度栽培能显著抑制根系生长的研究相似。根冠比能够较好地反应光合产物在地上部和地下部的分配情况。本研究表明，根冠比随株间竞争的产生和氮素供应的减少呈增加趋势，其中 N1P4 处理具有较大根冠比，相比 N1P1 处理显著增加 15.2%，N1P1 处理较 N15P1 处理显著增加 59.2%，表明胁迫环境下植株会将更多的光合产物分配给地下根系，相对促进根系生长，使得作物根系的生长优于地上部，增大根冠比。

3.2 氮素供应和株间竞争对番茄幼苗地上部光合特性和生物量积累的调控作用

许多研究表明，氮素供应^[14]和株间竞争^[11]对作物的气孔导度、净光合速率等光合参数均具有显著影响。肖万欣等^[15]认为氮密互作对玉米的光合速率影响显著，且光合速率对增密响应程度高于氮肥调控。而本研究表明，氮素和株间竞争对番茄幼苗光合特性调控作用显著，但二者交互作用不显著，这可能与作物品种、生长环境及栽培条件有关。本试验结果表明，N1 条件下，番茄幼苗净光合速率和气孔导度均显著低于 N15

处理的,可见较高的氮素供应能够改善作物的光合特性^[9]。同时相同氮素供应下,净光合速率和气孔导度随竞争强度的增加呈降低的趋势,这与 Vysotskaya 等^[16]研究认为邻株竞争能够促进幼苗脱落酸合成或影响生长素的运输,从而影响植物与外界的气体交换的结论相似。N15P1 处理的叶面积较 N1P1 和 N15P4 处理分别增加 98.3%和 46.7%,表明氮胁迫和株间竞争能够减少植株的光合面积,且氮素对叶面积的调控作用更为显著,因而降低了个体生物量的积累。这与已有研究^[17-18]表明的田间试验条件下适当增加种植密度有利于群体干物质的积累,而过度增加种植密度不利于作物生长和产量的提高的结论一致。

3.3 氮素供应和株间竞争对土壤硝态氮量和单株、群体叶片吸氮量的影响

植物组织中的氮量与氮素的累积量能够直接反应土壤氮素供给能力^[19],其中植株叶片中的吸氮量在一定程度上代表着作物生长能力的强弱。朱晋宇等^[6]利用 ¹⁵N 示踪法研究认为,番茄幼苗器官氮素分配与营养液氮质量浓度成正比。本试验中,氮质量浓度由 1 mmol/L 增加至 15 mmol/L,幼苗根系发育渐好,有利于对氮素的吸收及分配,因而叶片全氮量和单株叶片吸氮量较高。但不合理的种植密度使得土壤留存硝态氮量也随之增加,易造成氮流失和环境污染。N15 处理下群体吸氮量较单株种植提高 54.4%,表明相同氮肥供应下,增加单位面积上的种植密度能够增加群体吸氮量,降低土壤氮素的积累,提高氮素利用率,这与曹倩等^[20]关于一定范围内氮素和种植密度互作有利于土壤氮素利用的结论较为一致。

4 结 论

1)充足氮肥供应可以显著促进根系形态发育,低氮供应和较强的株间竞争易增加根冠比,影响光合产物分配。

2)一定范围内,幼苗光合速率随施氮量增加而增加,充足氮肥供应有利于增加幼苗光合叶面积,促进干物质积累,群体较强的株间竞争不利于幼苗个体干物质积累。

3)土壤硝态氮量和叶片全氮量随氮肥用量增加而增加,株间竞争降低了土壤留存硝态氮量,增加了群体叶片全氮量,提高了氮肥利用。

参考文献:

- [1] 陈传永,侯海鹏,李强,等.种植密度对不同玉米品种叶片光合特性与碳、氮变化的影响[J].作物学报,2010,36(5):871-878.
- [2] 李广浩,刘娟,董树亨,等.密植与氮素供应对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2 247-2 258.
- [3] 窦超银,孟维忠.种植密度对大垄双行膜下滴灌玉米生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(6):97-100.
- [4] 石德杨,李艳红,夏德军,等.种植密度对夏玉米根系特性及氮肥吸收的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2 006-2 017.
- [5] VYSOTSKAYA L B, WILKINSON S, DAVIES W J, et al. The effect of competition from neighbours on stomatal conductance in lettuce and tomato plants[J]. Plant Cell and Environment, 2011, 34(5):729-737.
- [6] 朱晋宇,惠放,李苗,等.氮水平对盆栽沙培番茄苗期根系三维构型与氮素利用的影响[J].农业工程学报,2015,31(23):131-137.
- [7] 李树庭,于捷,岳钉伊,等.不同密度和氮素水平对设施袋培番茄产量、品质及冠层结构的影响[J].西北农业学报,2016,25(6):903-911.
- [8] 张学军,赵营,陈晓群,等.氮肥施用量对设施番茄氮素利用及土壤 NO₃⁻-N 累积的影响[J].生态学报,2007,27(9):3 761-3 768.
- [9] 吴亚男,齐华,盛耀辉,等.密度、氮肥对春玉米光合特性、干物质积累及产量的影响[J].玉米科学,2011,19(5):124-127.
- [10] 盛耀辉,王庆祥,齐华,等.种植密度和氮肥水平对春玉米产量及氮素效率的影响[J].作物杂志,2010(6):58-61.
- [11] 马国胜,薛吉全,路海东,等.密度与氮肥对关中灌区夏玉米(*Zea mays* L.)群体光合生理指标的影响[J].生态学报,2008,28(2):661-668.
- [12] 姜琳琳,韩立思,韩晓日,等.氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):247-253.
- [13] 陈延玲,吴秋平,陈晓超,等.不同耐密性玉米品种的根系生长及其对种植密度的响应[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):52-59.
- [14] 孙旭生,林琪,李玲燕,等.氮素对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):840-844.
- [15] 肖万欣,刘晶,史磊,等.氮密互作对不同株型玉米形态、光合性能及产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3 690-3 701.
- [16] VYSOTSKAYA L B, VESELOV S Y, KUDOYAROVA G R. Effect of competition and treatment with inhibitor of ethylene perception on growth and hormone content of lettuce plants[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2017, 36(2): 1-10.
- [17] 刘伟,张吉旺,吕鹏,等.种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J].作物学报,2011,37(7):1 301-1 307.
- [18] 冯尚宗,王伟伟,彭美祥,等.不同种植密度对夏玉米产量、叶面积指数和干物质积累的影响[J].江西农业学报,2015(3):1-5.
- [19] 李霞,饶龙兵,郭洪英,等.氮水平对桉木属幼苗根系形态及氮素累积利用影响[J].土壤,2013,45(1):34-40.
- [20] 曹倩,贺明荣,代兴龙,等.密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):815-822.

(下转第 74 页)