

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.009

李慧敏, 王瑞, 石承智, 等. 不同辣椒品种混种根系互作对产量及根际氮转化的影响. 土壤, 2021, 53(6): 1167–1173.

不同辣椒品种混种根系互作对产量及根际氮转化的影响^①

李慧敏^{1,2}, 王 瑞^{1,2}, 石承智^{1,2}, 施卫明¹, 李奕林^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以不同辣椒品种薄皮椒(*Capsicum annuum*)、线椒(*Capsicum frutescens*)为试验材料, 采用盆栽方式, 通过分析同种植或混种(交叉及同行)模式下两种辣椒的产量、生物量、氮素积累量及根际土中氮形态和含量的变化, 探究同种或混种辣椒根系互作对氮吸收积累的影响。结果表明, 两种辣椒混合种植的果期茎叶干物质量、产量及果实氮积累量均高于同种植, 其中果期茎叶干物质量、产量及果实氮积累量平均增加 26.67%、63.65%、15.08%; 且同行种植的产量及果实氮积累量均为最高, 但果期不同处理之间的根系干物质量无显著差异。果期时混种植辣椒的铵硝比显著低于同种植, 平均降低 67.39%。通过两种辣椒混合种植, 特别是同行种植, 能够达到增加产量、提高氮素积累量的目的, 在实际的生产中具有一定的可行性和推广前景。

关键词: 辣椒; 根系互作; 根际; 氮素积累量; 铵硝比

中图分类号: S143.1; S181 **文献标志码:** A

Effects of Root Interaction of Interplanted Different Pepper Varieties on Yield and Rhizosphere Nitrogen Transformation

LI Huimin^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, SHI Chengzhi^{1,2}, SHI Weiming¹, LI Yilin^{1*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the varieties of thin-bark pepper (*Capsicum annuum*) and line pepper (*Capsicum frutescens*) were used as the experimental materials, and a pot experiment was conducted in order to explore the effects of root interaction between the same and different pepper varieties on nitrogen (N) uptake and accumulation by analyzing the yield, biomass, nitrogen accumulation of pepper, as well as nitrogen form and content changes in rhizosphere soils under individual or interplanting (cross and parallel) planting modes. The results showed that the dry weights of stems and leaves, pepper yield and fruit N accumulation were higher in the interplanting mode than those of the two individual planting modes, which were meanly increased by 26.67%, 63.65% and 15.08% at fruit stage, respectively. In addition, the pepper yield and fruit N accumulation of parallel planting were the highest, but there was no significant difference in root dry weights among different planting modes at fruit stage. At fruit stage, rhizosphere ammonium/nitrate ratio in interplanting mode was significantly lower than those of the individual planting modes, meanly decreased by 67.39%. Interplanting mode of pepper, especially parallel planting could increase the pepper yield and improve N accumulation, which has a certain feasibility and promotion prospect in the actual vegetable production.

Key words: Pepper; Root interaction; Rhizosphere; Nitrogen accumulation; Ammonium nitrate ratio

我国蔬菜种植面积不断增加, 据中国统计年鉴统计, 2019 年我国蔬菜生产面积约为 $2.09 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占农作物总面积的 12.57%^[1], 并且蔬菜不同于水稻、小麦、玉米等大田作物, 它对水肥的需求量大, 且复种指数高^[2]。目前菜地肥料的施用量和施用面积不断增长, 导致的环境问题也在不断加剧^[3]。如辣椒的施

氮量远高于大田作物(水稻、小麦、玉米、马铃薯等), 平均为 $5\ 700 \text{ kg/hm}^2$ ^[4]。李俊良等^[5]研究发现露天菜地氮的总损失率高达 67.20% ~ 97.70%。盲目过量施用氮肥也是造成设施土壤次生盐渍化的重要因素之一, 氮肥利用率将进一步降低^[6]。因此研究蔬菜系统氮减施增效迫在眉睫。

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31872957)和中国科学院南京土壤研究所“一三五”计划和领域前沿项目(ISSASIP1608)资助。

* 通讯作者(ylli@issas.ac.cn)

作者简介: 李慧敏(1996—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜根际氮磷转化与调控研究。E-mail: lihuimina@issas.ac.cn

在不改变养分供应强度的基础上,通过植物根系互作提高植物群体养分吸收利用是增加集约化农田肥料利用率的有效途径之一。间套作即为利用植物根系互作来提高产量并增加植物对养分的活化及利用的一种栽培方式,现已成为我国农业种植中重要栽培方式之一。例如,玉米/大豆间套作体系的氮肥吸收利用率比玉米单作高 20.2%^[7],玉米/蔬菜间套作体系的菜地氮肥利用率提高 14%^[8]。目前在蔬菜间套作种植中主要采用深浅根系互作,如农民通常将茄果类等深根系蔬菜与叶菜类、葱蒜类等浅根系蔬菜通过间套作以达到充分利用土壤氮养分资源的目的。同时强化根系互作效应的规模化种植能够减少菜地肥料的投入,研究表明规模化种植蔬菜,每年肥料的施用总量可比分散型种植减少 17.8%^[9]。在农业生态系统中,同种或异种植物间的根系都会产生相互作用,种内互作是同种植物根系对养分及水分的高效获取,种间互作是异种植物根系对养分及水分的高效利用^[10]。但目前针对植物根系互作提高氮肥利用率方面的研究对象主要为粮食作物(如玉米、小麦等),且大部分为异种作物之间的互作,对于土壤养分累积及当季养分投入量相对较高的蔬菜种植体系研究相对较少,而对于同一种类型蔬菜的同种或不同品种混种根系间的互作对于养分获取的影响未见报道。我们以常见蔬菜辣椒作为研究对象,选取常食用的两个辣椒品种:薄皮椒和线椒,通过混种研究根系互作对氮素吸收及产量以及根际土壤氮转化的影响,为高投入种植体系氮肥减施增效提供参考。

1 材料与方法

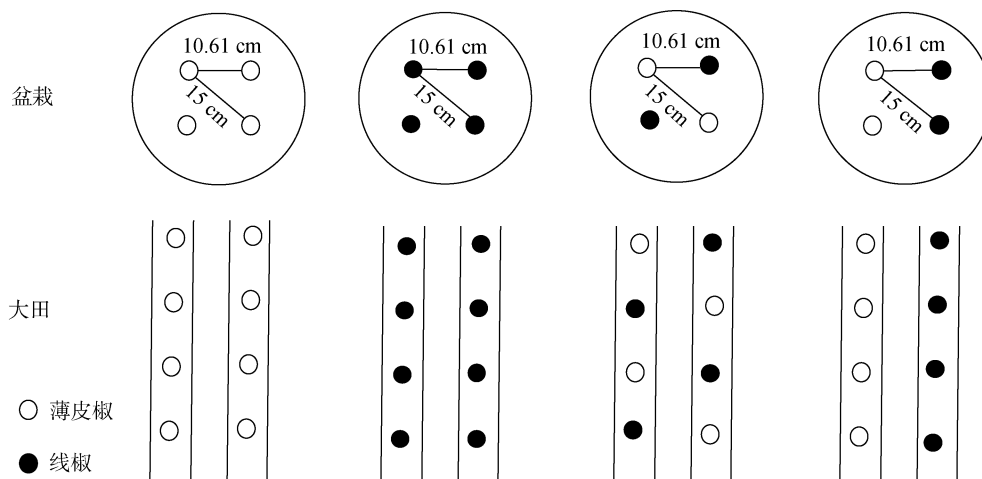
1.1 试验材料

盆栽试验土壤为粉质壤土,2019 年 6 月取自江苏省无锡市宜兴市周铁镇和渎村蔬菜生产基地(119°59'21"E, 31°24'19"N)。土壤全氮含量为 0.90 g/kg,全磷 0.84 g/kg,全钾 13.11 g/kg,碱解氮 110.25 mg/kg,有效磷(Olsen-P)95.97 mg/kg,速效钾 102.50 mg/kg。将土壤取回后自然风干,过 2 mm 筛储存备用。

盆栽试验在中国科学院南京土壤研究所日光温室内进行。试验所用辣椒品种为薄皮椒和线椒,光照培养箱育苗。2019 年 9 月 30 日,选择长势均匀的辣椒苗(六叶期)定植于盆中,生长期土壤含水量控制在田间持水量的 70% 左右。

1.2 试验设计

试验用塑料盆内径 25 cm,高 16 cm,每盆装干土 6 kg,种植辣椒 4 棵。辣椒采用同种及不同品种混种种植,共计 4 种模式(图 1):单独种植薄皮椒(T1)、单独种植线椒(T2)、交叉种植薄皮椒及线椒(T3)(即与一株辣椒临近的两株辣椒为不同品种,较远一株辣椒为同种,在大田中相当于一垄同时交错种植两种辣椒)、同行种植薄皮椒及线椒(T4)(即同种辣椒种植在同一列,另一品种辣椒与其平行,在大田中相当于一垄种植同种辣椒,另一垄种植另一品种辣椒)。试验所施肥料分别为尿素(含 N 46.00%,N 160 mg/kg)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 60.65%,P₂O₅ 80 mg/kg)及硫酸钾(含 K₂O 53.95%,K₂O 130 mg/kg)。肥料施用量均为田间常规施肥量。每个处理 3 次重复,分 3 个生育期采样。



(塑料盆内径 25 cm, 每株辣椒与盆壁的最短距离为 5 cm, 4 株辣椒对称分布)

图 1 辣椒盆栽与对应大田种植示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pepper pot-planting and corresponding field planting

1.3 样品采集

分别在辣椒苗期(移栽后 20 d)、花期(移栽后 45 d)、果期(移栽后 70 d)进行取样。先取 4 株辣椒的地上部,将茎叶分离后用去离子水清洗干净。果期时将果实与茎叶分开,分别称量鲜物质量,茎叶与果实分别置于烘箱 105 ℃ 中杀青 30 min, 80 ℃ 烘干称量干物质量,粉碎用作氮含量分析测试。根系取样采用整盆取样法,将土壤全部置于转运箱内,检出所有根系并装入自封袋中,同时将附着于根系上的土壤(根际土壤)充分混匀后留取部分鲜土置于 4 ℃ 冰箱用于土壤铵态氮、硝态氮及全氮的测定。取出的根系用去离子水清洗后,吸去多余水分,称量根系鲜物质量,杀青烘干称量干物质量,粉碎后用于氮含量测定。

1.4 样品分析

辣椒生物量、产量的测定采用称重法。地上部、果实及根系氮含量的测定采用钒钼黄比色法(H₂SO₄-H₂O₂ 消煮)。土壤铵态氮、硝态氮用 2 mol/L KCl 浸提后,分别用靛酚蓝比色法及紫外分光光度法测定。根际土全氮采用凯氏定氮法测定。

1.5 数据处理

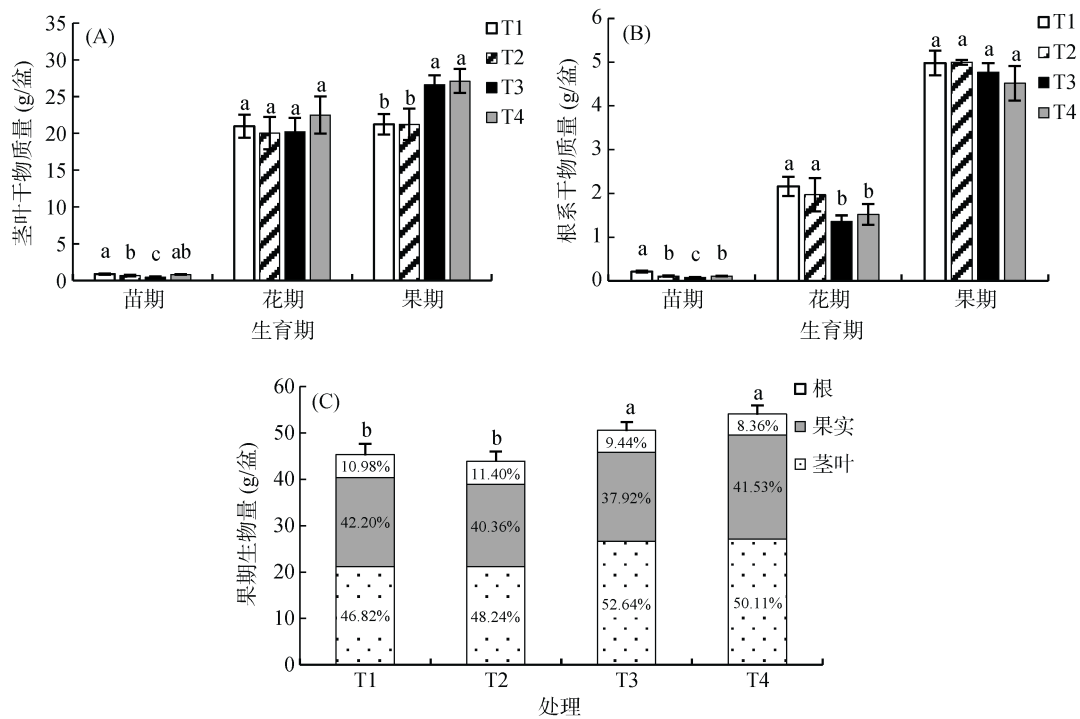
所有数据采用 SPSS 20.0 进行统计分析,单因素方差分析(ANOVA)、LSD 法比较处理间的差异显著性。图表绘制采用 Excel 2010、Origin 2016 软件。

植物氮积累量的计算公式为:氮积累量=生物量×氮含量

2 结果与分析

2.1 同种和混种根系互作对辣椒干物质积累量的影响

如图 2A、2B 所示,随着辣椒的生长,其茎叶及根系的干物质量不断增加,但不同种植模式下辣椒干物质积累量的变化趋势以及增加幅度存在差异。苗期时,T1 处理的茎叶干物质量显著高于 T2、T3 处理,其中 T1 处理分别比 T2 和 T3 处理高 25.71%、72.55%,T4 处理分别比 T2 和 T3 处理高 18.57%、62.75%;T1 处理的根系干物质量显著高于其他处理,分别是 T2、T3 与 T4 处理的 1.91 倍、2.63 倍和 1.91 倍。花期时,不同种植模式下茎叶干物质量无显著差异;根系干物质量 T1、T2 处理显著高于 T3、T4 处理,平均提高 1.43 倍。果期时,T3、T4 处理的茎叶干物质量显著高于 T1、T2 处理,平均提高 26.67%;不同处理之间根系干物质量无显著性差异。综上,混种种植时辣椒前期生长较慢,但后期生长较快,同时能够维持较高的茎叶干物质量;但对根系生长表现出抑制作用,尤其是苗期和花期。从果期整株干物质量来看(图 2C),T3、T4 处理的干物质量显著高于 T1、T2 处理,



(图中小写字母不同表示同一生育期不同处理之间差异显著(P<0.05),下同)

图 2 不同生育期辣椒的茎叶干物质量(A)、根系干物质量(B)及果期整株干物质量(C)

Fig. 2 Pepper stem and leaf dry weights(A), root dry weights (B) at different growth stages and whole plant dry weight (C) at fruit stage

平均高 17.21%。同时 T3、T4 处理茎叶占整株干物质量的比例较大, 平均提高 3.85%; T3 处理的果实占比最低, 仅为 37.92%, 但与其他处理的差异不显著; T3、T4 处理的根系占比较低, 平均为 8.90%, T1、T2 处理的根系占比平均为 11.19%。由此可以推断出辣椒混种植时能够维持较高的茎叶占比, 同时根系占比降低, 交叉种植果实占比较低, 但各处理之间差异不显著。

2.2 同种和混种根系互作对辣椒产量的影响

从图 3 能够看出辣椒混种植的产量高于同种植, 其中 T4 处理产量最高, 分别比 T1、T2、T3 处理高 42.75%、130.45%、16.75%; T3 处理分别比 T1、T2 处理高 22.27% 和 97.39%。不同品种辣椒产量存在显著性差异, 尽管两个品种辣椒果实干物质没有差异(图 2C), 但线椒单独种植时的产量显著低于薄皮椒, 这可能是由于线椒的水分含量较低造成的。

2.3 同种和混种根系互作对辣椒氮素积累量的影响

苗期 T1 处理的茎叶氮积累量最高, 与 T2、T3 处理有显著性差异, 分别是 T2、T3 处理的 1.24 倍和 2.18 倍, 而 T4 处理与 T1、T2 处理的差异不显著; 花期时 T4 处理的茎叶氮积累量为最高, 与 T2 处理差异显著, 增加了 0.45 倍; 果期时 T1 处理与 T2、

T3、T4 处理具有显著性差异, 平均降低 21.67%(图 4A)。由此能够看出, 同行种植两种辣椒时花期及果期的茎叶氮积累量均为最高。如图 4B 所示, 同种植辣椒的果实氮积累量比混种植低, 其中 T4 处理的果实氮积累量最高, 平均比其他处理高 20.80%。果期 T4 处理的整株氮积累量也为最高, 达到 1.16 g/盆, 与 T1 处理相比具有显著性差异; 果期时 T1、T4 处理的茎叶氮积累量占整株氮积累量的比例略低于 T2、T3 处理, 平均低 3.18%, 但 T1、T4 处理的果实氮积累量的占比高于 T2、T3 处理, 平均高 3.71%, 各处理间根系氮积累量占比差异不显著(图 4C)。说明果期时 T1、T4 处理的根系吸收的氮向果实中转运比例更高, 有利于辣椒经济产量的形成(图 3)。

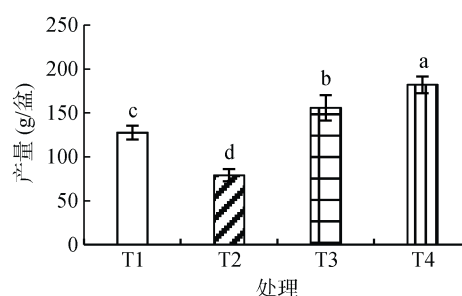


图 3 不同处理下的辣椒产量

Fig. 3 Pepper yields under different treatments

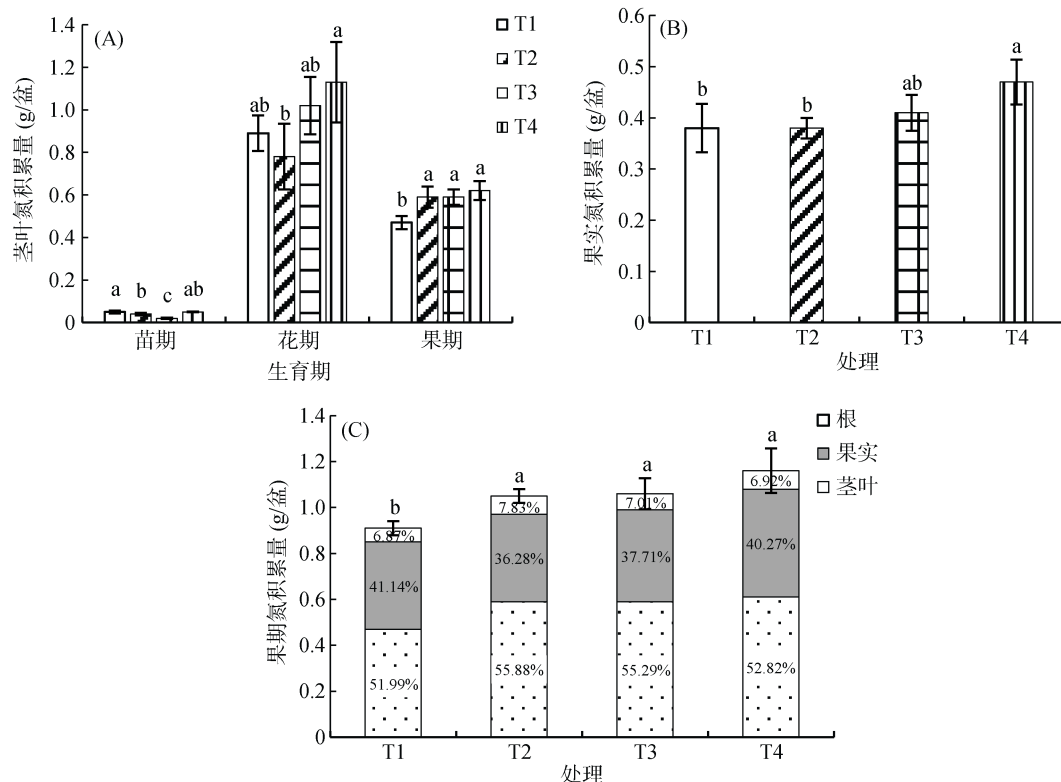


图 4 不同生育期辣椒茎叶氮积累量(A)、果实氮积累量(B)以及果期整株氮积累量(C)

Fig. 4 Nitrogen accumulation in stems and leaves of pepper at different growth stages (A), nitrogen accumulation in fruits (B) and nitrogen accumulation in whole plant at fruit stage (C)

2.4 同种和混种根系互作对辣椒根际土壤铵态氮和硝态氮的影响

从图 5A 可以看出, 同种植辣椒时, 根际土中铵态氮的含量呈现逐渐上升的趋势; 混种植辣椒时, 根际土中铵态氮的含量在花期时略微升高, 在果期时显著下降。苗期和花期不同处理之间的根际土硝态氮含量差异变幅相较于铵态氮较小(图 5B), 不同处理间差异不显著; 果期时混种植辣椒的根际土硝

态氮含量高于同种植, 其中 T3 处理与 T1、T2 处理具有显著性差异, 分别高 25.62% 和 28.09%。如图 5C 所示, 苗期时 T4 处理的铵硝比显著高于其他处理, 平均高 0.93; 花期时各处理间的铵硝比差异不显著; 果期时 T1、T2 处理的铵硝比显著高于 T3、T4 处理, 平均提高 67.39%, 这可能是由于果期时混种植辣椒的根际土中维持较高的硝态氮含量, 而同种植根际土壤铵态氮含量相对较高。

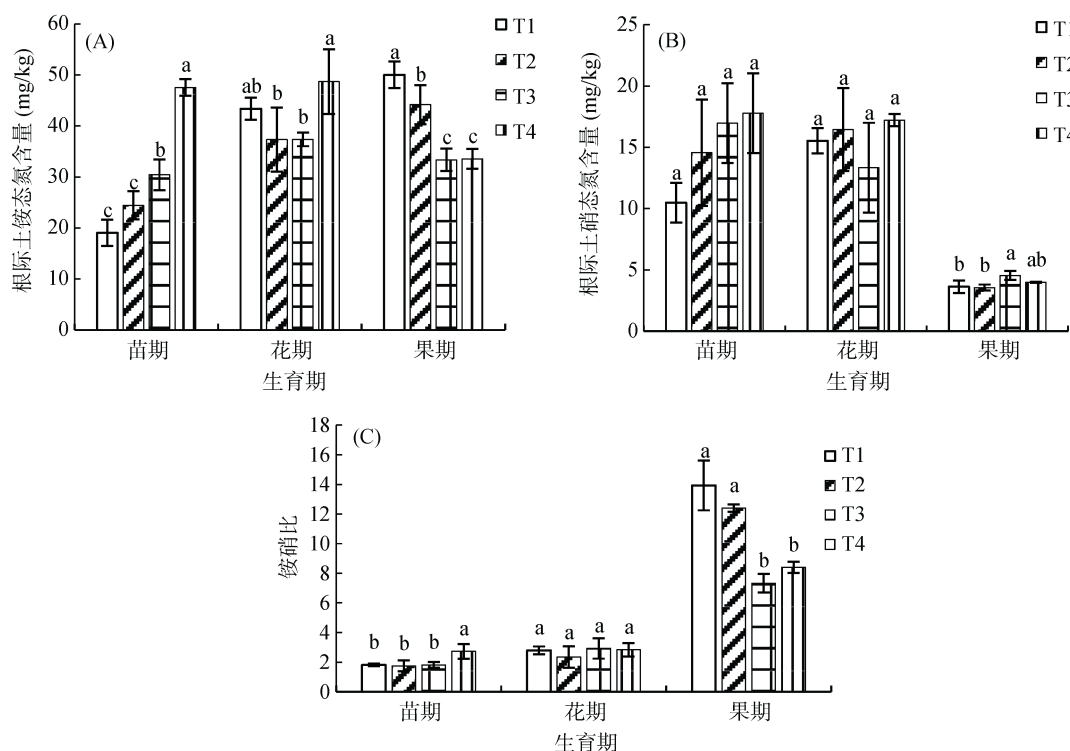


图 5 不同生育期辣椒根际土铵态氮含量(A)、硝态氮含量(B)及铵硝比(C)

Fig. 5 Rhizosphere ammonium nitrogen contents(A), nitrate nitrogen contents (B) and ammonium/nitrate ratios (C) at different growth stages of pepper

2.5 同种和混种根系互作对辣椒根际土壤全氮的影响

根际土全氮的含量随着辣椒的生长不断降低, 苗期时平均为 1.08 g/kg, 花期时平均为 0.92 g/kg, 下降 14.81%, 果期时平均为 0.86 g/kg, 比花期时下降 6.52%(图 6)。其中 T1 处理花期根际土全氮含量与苗期差异不显著, 但果期比苗期显著降低; 而 T2 和 T3 处理花期比苗期显著降低, 但与果期无显著差异; T4 处理不同生育期根际土壤全氮含量均显著降低。而在同一生育期各处理之间的全氮含量无显著性差异。

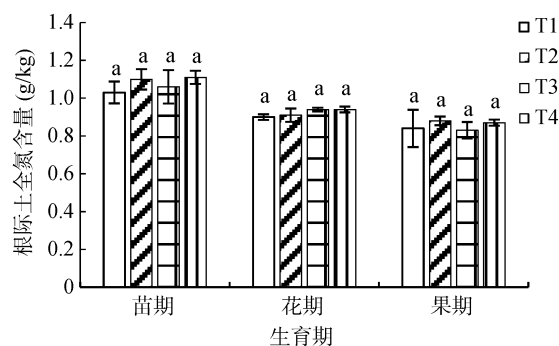


图 6 不同生育期辣椒根际土全氮含量

Fig. 6 Total nitrogen contents in rhizosphere soils at different growth stages of pepper

3 讨论

混种植两种辣椒时的整株干物质质量显著高于

同种植, 茎叶与果实干物质质量不同种植方式间差异不显著, 但根系生物量占比低于同种植(图 2)。通过分析辣椒不同部位干物质积累量的变化发现, 同种

种植辣椒根系的扩张并没有增加与扩张成本相当的养分(根系的生产能力),也就是说根系的扩张是以牺牲地上部干物质为代价的^[11]。尽管混种植种的根系生物量低,但地上部生物量较高,这可能是两种辣椒通过某些根系合作行为,例如通过根系分泌物的介导,识别邻株根系并减少根系的资源分配,使得更多的资源分配到地上部^[12]。朱莉等^[12]将两种春小麦混合种植,与单独种植相比,整株生物量显著提高,而根系生物量无显著变化。朱永和^[11]的研究发现,两种春小麦混合种植的整株生物量与单独种植相比没有差异,但是根系生物量增加。以上研究表明邻近植株根系的存在可以导致根系生物量的增加^[13-14]、减少^[15-16]或变化不显著^[17-18],这可能是由于根系竞争策略的不同导致的。Meta 分析表明,种内根系竞争策略是由该植物的进化历史和当前所处的生存环境共同决定的^[19]。植物根系在感知到可利用资源发生变化或周边有其他根系存在时,会调整自身的结构或生理特性,在外界因素相同的情况下,不同植物根系之间或共同在资源丰富的空间繁殖,或产生化感作用使得根系背离^[20-22],前者为资源利用型竞争,后者为干扰型竞争^[23]。根系生物量变化不显著的原因可能是植株无法感知到邻株的存在,或者能够感知但不能区分自身根系与邻株根系^[15]。

混种植两种辣椒的产量与氮素积累量均高于单独种植,且同行种植的产量达到最高。袁彬等^[24]研究发现两个水稻品种(两优 312 和 R312)混合种植时的产量与两优 312 品种单独种植的差异不显著,与 R312 品种单独种植相比,不仅产量提高了 7.47%,并且稻米的品质更好。朱永和^[11]的研究发现,在黄土高原混合种植两种春小麦(和尚头和陇春 8275),其产量比单独种植陇春 8275 减少 24.51%,比单独种植和尚头增加 20.94%。吴琼等^[25]将深根系茄子与浅根系大葱间作,结果表明,间作区茄子的生物量和氮素积累量分别比单作区提高 15.0% 和 6.0%,间作区大葱的生物量及氮素积累量均有所降低。但间作区茄子和大葱氮素积累量的总和要高于单作区,说明间作产生的根系互作能够增加总体的地上部氮素积累量。以上结果表明,不同作物及不同品种之间的根系互作对产量及氮素积累量的影响是不同的,对于辣椒而言,混合种植薄皮椒和线椒可能促进了两种根系的互作,使得根系吸收的氮素及其他养分更多地转运到地上部,从而获得了更高的产量(图 3)和氮素积累量(图 4)。

随着辣椒的生长,根际土中全氮含量不断下降(图 6),可能是由于本试验氮肥采用一次性施用导致

的。生长后期混种植辣椒的全氮含量下降较多,可能是由于根系互作增加了对氮素的吸收。有研究表明,玉米/大豆间作的根系互作使玉米茎中的氮素积累量提高了 25.2%^[26]。果期时混种植辣椒的根际土中铵态氮含量显著低于同种植,硝态氮含量高于同种植,铵硝比具有显著性差异(图 5)。辣椒为喜硝型作物,果期时根际土中硝态氮维持较高的含量可能是混合种植产量增加的原因之一。有研究表明植物根系对氮肥的竞争更多地依赖根系在生理上的可塑性,这是由于铵态氮比较容易被土壤固定,而硝态氮容易淋失。同时菜地地膜覆盖较多,地膜残留会对土壤硝态氮和铵态氮的迁移产生阻滞作用^[27]。当根系吸收养分的速率高于养分在土壤中的迁移速率时,根系周围就会出现养分耗竭区,当多个根系的耗竭区域叠加在一起时,根系为获得更多的养分将会产生资源利用型竞争^[28]。并且迁移性较高的养分离子通常具有较大的养分耗竭区域,比较容易发生养分耗竭区域的重叠,且耗竭区域内养分浓度的差异较小。混种植辣椒之后由于根系的互作,根际土中能够维持比较高浓度的硝态氮,缩小了养分耗竭区,使得根系能够有效地吸收更多的氮素,从而转运到地上部(图 4),进而增加产量(图 3)。

综上,混种植辣椒的两种种植方式均能够促进辣椒的生长、提高产量并增加对土壤中氮素的转化与吸收,同行种植的促进作用最明显;且交叉种植在田间种植条件下不利于实际的操作。因此为获取更高的经济产量,田间条件下推荐采用混种植的方式,即隔行混种蔬菜,每垄种植同种蔬菜。

4 结论

与同种植辣椒相比,混种植时辣椒前期生长较慢,但后期生长较快,同时能够维持较高的茎叶干物质量;但对根系生长表现出抑制作用,尤其是苗期和花期。混种植两种辣椒的茎叶干物质量、产量、果期整株干物质量和氮积累量都有不同程度的增加,且同行种植的产量、果期整株干物质量和氮积累量均为最高。果期时混种植两种辣椒根际土壤铵硝比显著低于单独种植。混种植两种辣椒,尤其是同行种植,可以达到增加产量、提高氮素积累量的目的。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] 姜慧敏. 氮肥管理模式对设施菜地氮素残留与利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

- [3] 王瑞, 施卫明, 李奕林, 等. 增氧提高蔬菜磷素吸收利用的作用机制研究进展[J]. 土壤, 2019, 51(3): 419–424.
- [4] 赵恒栋, 葛茂悦, 王怀栋, 等. 我国三种主要蔬菜氮肥的利用现状分析[J]. 北方园艺, 2017(5): 151–155.
- [5] 李俊良, 朱建华, 张晓晟, 等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 126–129.
- [6] 李涛, 于蕾, 吴越, 等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 100–110.
- [7] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474–482.
- [8] 仲惟磊. 玉米蔬菜不同间套模式对菜田土壤特性影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [9] 韩沛华, 闵炬, 诸海焘, 等. 长三角地区设施蔬菜施肥现状及土壤性状研究[J]. 土壤, 2020, 52(5): 994–1000.
- [10] 张德闪, 李洪波, 申建波. 集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1547–1555.
- [11] 朱永和. 黄土高原旱作农业地区两个春小麦品种的根系竞争[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [12] 朱莉, 席念勋, 张大勇. 根系竞争对两个不同年代春小麦品种生长及资源分配的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 945–953.
- [13] Semchenko M, Zobel K, Hutchings M J. To compete or not to compete: An experimental study of interactions between plant species with contrasting root behaviour[J]. *Evolutionary Ecology*, 2010, 24(6): 1433–1445.
- [14] McNickle G G, Brown J S. An ideal free distribution explains the root production of plants that do not engage in a tragedy of the commons game[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(4): 963–971.
- [15] Cahill J F Jr, McNickle G G. The behavioral ecology of nutrient foraging by plants[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, 42(1): 289–311.
- [16] Murphy K M, Dawson J C, Jones S S. Relationship among phenotypic growth traits, yield and weed suppression in spring wheat landraces and modern cultivars[J]. *Field Crops Research*, 2008, 105(1/2): 107–115.
- [17] Litav M, Harper J L. A method for studying spatial relationships between the root systems of two neighbouring plants[J]. *Plant and Soil*, 1967, 26(2): 389–392.
- [18] Novoplansky A. Picking battles wisely: Plant behaviour under competition[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(6): 726–741.
- [19] Smyčka J, Herben T. Phylogenetic patterns of tragedy of commons in intraspecific root competition[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1/2): 87–97.
- [20] Wilson J B. Shoot competition and root competition[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1988, 25(1): 279.
- [21] Rajaniemi T K, Allison V J, Goldberg D E. Root competition can cause a decline in diversity with increased productivity[J]. *Journal of Ecology*, 2003, 91(3): 407–416.
- [22] Schenk H J. Root competition: Beyond resource depletion[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 725–739.
- [23] Dawson T E. Water sources of plants as determined from xylem-water isotopic composition: Perspectives on plant competition, distribution, and water relations//Ehleringer J R, Hall A E, Farquhar G D. *Stable isotopes and plant carbon-water relations*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1993: 465–496.
- [24] 袁彬, 明兴权, 雷斌, 等. 两优 312 与 R312 混播种植模式[J]. 江西农业学报, 2016, 28(2): 39–42.
- [25] 吴琼, 赵同科, 安志装, 等. 茄子/大葱间作及氮肥调控对植株硝酸盐含量及养分吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2071–2075.
- [26] 张雷昌, 汤利, 董艳, 等. 根系互作影响玉米大豆间作作物氮吸收[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(6): 1111–1119.
- [27] 高维常, 蔡凯, 曾陨涛, 等. 农用地膜残留对土壤氮素运移及烤烟根系生长的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1556–1563.
- [28] Weidenhamer J D. Distinguishing resource competition and chemical interference: Overcoming the methodological impasse[J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88(6): 866–875.