



杨冬艳,王丹,桑婷,等.番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗生长及根系形态的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(1): 60–67.

YANG D Y, WANG D, SANG T, et al. Effects of amount of tomato straw compost addition on seedling growth and root morphology[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(1): 60–67.

番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗生长及根系形态的影响

杨冬艳, 王 丹, 桑 婷, 冯海萍, 赵云霞

(宁夏农林科学院 园艺研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要:【目的】我国是番茄生产大国,番茄秸秆废弃物产生量逐年增加,急需无害化处理和利用。试验将番茄秸秆进行高温好氧发酵形成有机肥料,在番茄种植底肥中添加不同用量番茄秸秆堆肥(TS),通过分析番茄幼苗生长、根系形态土壤养分含量变化,优化番茄堆肥施用方案,旨在探索番茄秸秆废弃物肥料化利用技术。【方法】采用盆栽的方法,按照堆肥与干土质量比,设置1%、2%、3%、4%添加量处理,分析定植30 d的番茄幼苗植株生长指标、根系形态指标和根际养分含量以及相关关系。【结果】相比不添加对照CK,1%添加量番茄秸秆堆肥(TS)处理的番茄幼苗株高、茎粗、全株干物质质量和壮苗指数均显著低于CK,其根系在>5 mm 径级范围内的根表面积、投影面积和根体积也低于CK。TS 2%处理能显著增加番茄幼苗根长、根体积和根表面积,降低根系平均直径,但对地上部生长和物质积累没有显著影响。3%TS和4%TS处理能够显著增加番茄幼苗植株株高、茎粗和全株干物质质量的积累,二者之间没有显著差异,但3%TS处理在提高番茄幼苗根体积和根表面积上显著高于4%TS处理。径级范围在0~0.5 mm和0.5~2.0 mm的根系对番茄根系长度的贡献率最大,添加番茄秸秆堆肥处理能够增加<0.5 cm和0.5~2.0 mm 径级范围的根系长度,增加0.5~2.0 mm 径级范围的根表面积和投影面积,其中3%TS处理增加幅度最高。3%TS和4%TS处理能够提高番茄幼苗根际土壤全碳、全氮和速效养分含量,其中土壤速效磷养分含量增幅最高,冗余分析RDA表明土壤速效磷是影响番茄幼苗根系形态建成的关键土壤环境因子。【结论】在日光温室番茄生产中,在底肥中添加干质量比3%的番茄秸秆堆肥可显著改善土壤养分环境,增加番茄幼苗根系生物量,促进地上部物质积累。

关键词:番茄秸秆堆肥;番茄幼苗;根系形态

中图分类号:S641.2 文献标志码:A

文章编号:1000-2286(2024)01-0060-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of amount of tomato straw compost addition on seedling growth and root morphology

YANG Dongyan, WANG Dan, SANG Ting, FENG Haiping, ZHAO Yunxia

收稿日期:2023-09-14 修回日期:2023-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31960592)、宁夏回族自治区重点研发项目(2021BBF02031)和宁夏回族自治区科技科技创新领军人才项目(2021GKLR11)

Project supported by National Natural Science Foundation of China (31960592), Key R&D Projects in the Autonomous Region (2021BBF02031) and the Ningxia Hui Autonomous Region Science and Technology Innovation Leading Talent Project (2021GKLR11)

作者简介:杨冬艳,研究员,主要从事设施蔬菜栽培生理与废弃物资源化应用研究,orcid.org/0000-0002-8862-981X, yangdongyan 2000@163.com。

(Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: [Objective] China is a major producer of tomatoes, the amount of tomato straw waste is increasing year by year, which calls urgently for the harmless treatment and utilization. The experiment involves high-temperature and aerobic fermentation of tomato straw to form organic fertilizer. Different amounts of tomato straw compost (TS) were added to the base fertilizer. By analyzing the response characteristics of tomato seedling growth and root morphology, an optimized application plan for tomato compost was formed. The aim is to explore the fertilizer utilization technology of tomato straw waste. [Method] According to the ratio of compost to dry soil, 1%, 2%, 3% and 4% addition treatments were set up to analyze the plant growth index, root morphological index, rhizosphere nutrient content and correlation of tomato seedlings planted for 30 days. [Result] Compared with the control CK, the height, stem diameter, dry matter mass, and seedling strength index of tomato seedlings treated with 1% added tomato straw compost (TS) were significantly lower than those of CK, and their root surface area, projected area, and root volume were also lower than those of CK within the diameter range of > 5 mm. The tomato straw compost treatments with an addition of 2% could significantly increase the root length, root volume, and root surface area of tomato seedlings, reduce the average root diameter, but have no significant effect on aboveground growth and material accumulation. The 3% TS and 4% TS treatments significantly increased the accumulation of plant height, stem diameter, and whole plant dry matter mass in tomato seedlings, and these was no significant difference between the two treatments in terms of these three indexes. However, the 3% TS treatment significantly increased the root volume and surface area of tomato seedlings compared with the 4% TS treatment. The root system with a diameter range of 0–0.5 mm and 0.5–2 mm had the highest contribution to the length of tomato root system. Adding tomato straw compost treatment could increase the root length within the diameter range of < 0.5 cm and 0.5–2 mm, as well as the root surface area and projection area within the diameter range of 0.5–2 mm. Among them, the 3% TS treatment had the highest increase in root length. 3% TS and 4% TS treatments could increase the total carbon, total nitrogen, and available nutrient content in the rhizosphere soil of tomato seedlings, with the highest increase in soil available phosphorus nutrient content. Redundancy analysis RDA showed that soil available phosphorus was a key soil environmental factor affecting the formation of tomato seedling root morphology. [Conclusion] For tomato production in solar greenhouse, adding 3% tomato straw compost to the base fertilizer can significantly improve the soil nutrient environment, increase root biomass, and promote the accumulation of plant substances.

Keywords: tomato straw compost; tomato seedling; root morphology

【研究意义】我国是世界最大的番茄生产国,据粮农组织(FAO)统计,2020年我国番茄种植面积为111.15万 hm^2 ,产量达到6 486.58万t,分别约占世界比重的22.00%和34.72%^[1]。我国蔬菜废弃物年产生量高达7亿t,占农作物秸秆总量的9.09%,而其中70%的蔬菜废弃物未被利用^[2]。大量的番茄秸秆废弃物被随意的丢弃在田间地头,加重蔬菜产区病虫害传播,污染环境和地下水,因此迫切需要对番茄等蔬菜秸秆废弃物进行资源化、无害化开发利用。【前人的研究进展】番茄秸秆营养丰富,木质化程度高,养分含量高,C/N比值居中^[3],与叶菜低C/N和大田作物高C/N相比较,非常适合堆肥利用。高温好氧堆肥能够使秸秆废弃物在微生物的作用下经历高温腐熟、杀死物料本身携带的病原菌和寄生虫卵等,把有机物转化为稳定的腐殖质,是当前蔬菜秸秆废弃物无害化处理的主要方式之一^[4]。将有机物料堆肥化处理,作为有机肥或土壤改良剂还田应用,能够使土壤保持健康且富有活力^[5]。研究^[6-8]表明番茄堆肥还田能够降低土壤容重,提高土壤有机质含量和生物活性,提高果实品质,且作用效果随用量的增多而加强;番茄秸秆堆肥与土壤混配可促进番茄植株生长,显著提高产量和果实品质^[9]。番茄秸秆堆肥还田能够促进茄果类蔬菜幼苗根系生物量的积累和根系活力增加^[10-11];在宁夏地区日光温室番茄夏秋茬栽培中,利用番茄堆肥与50%追肥配施,能够获得较高的肥料生产效率和产

量^[12]。【本研究切入点】前期的研究表明,番茄秸秆堆肥还田能够改善土壤环境,提升番茄产量品质,但对于番茄秸秆堆肥还田适宜添加量、及对番茄幼苗根系生长和形态特征影响还不明确。【拟解决的关键问题】采用盆栽试验,设置不同番茄堆肥还田量处理,研究对番茄幼苗生长、根系形态指标、根际土壤养分含量的影响,探索番茄幼苗生长-根系形态-土壤养分互作关系,为确定最适番茄堆肥优化施用方案,制定科学合理的番茄底肥管理方案提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

番茄秸秆来源于2021年3—7月在日光温室内种植的番茄秧蔓。拉秧后的番茄秸秆原地进行晾晒,利用小型粉碎机粉碎至1~2 cm碎段。将粉碎的番茄秸秆190 kg,添加玉米秸秆38 kg、羊粪19 kg进行混合堆肥,添加粗纤维素降解菌200 g(广州农冠生物科技有限公司,总菌数 $\geq 10^9$ cfu/g)与葡萄糖1 kg进行充分的混合,均匀喷洒在堆肥中,添加水分至体积含水量60%左右,覆盖薄膜进行堆肥腐熟,定期翻堆和添加水分,堆肥至60 d停止。堆肥后番茄秸秆养分分为总碳465 g/kg,总氮19.5 g/kg,总磷6.83 g/kg,总钾37.7 g/kg。

1.2 试验设计

试验在宁夏农林科学院现代农业科研基地日光温室内(净跨7 m,脊高3.3 m,长63 m)进行。根据日光温室蔬菜生产农家肥常规施肥量6 t/hm²、试验土壤容重参数(1.1 g/cm³)和土层20 cm折算,农家肥施入量为3%左右。因此盆栽农家肥和堆肥添加量均按照干物质质量比例进行添加。称取10 kg干土和300 g牛粪混匀,装入长45 cm×宽25 cm×高20 cm的花盆中,按照番茄秸秆堆肥(TS)干物质质量与干土质量百分比设置4个还田量处理,处理编号依次为4%TS:400 gTS,3%TS:300 gTS,2%TS:200 gTS,1%TS:100 gTS,并设置对照CK:0 gTS。花盆在温室内按照南北方向并排摆放两行为1垄,每垄盆中心间距为1.4 m,每个处理摆放3垄为1个重复,3次重复,随机摆放。

试验番茄品种为“普罗旺斯”,2022年4月7日定植,定植时番茄幼苗4叶1心,每盆种植2株番茄,铺设滴灌带,试验期间定时浇水,水分管理相同,试验期间未施追肥。番茄幼苗生长30 d试验结束。

1.3 测试方法

在番茄幼苗定植30 d时,每个处理随机选择10盆,去掉花盆,放置在无纺布网袋中,采集根际土壤,晾晒风干测量土壤养分(总氮TN、总碳TC、总磷TP、总钾TK、水解氮AN、速效磷AP和速效钾AK),根据鲍士旦^[12]方法测定。利用流水缓慢冲洗掉其余土壤,去除杂质,然后用吸水纸吸去植株表面水分,分别测定地上部和地下部单株鲜质量,一部分秧苗烘干测干物质质量,一部分秧苗用米尺和游标卡尺测量株高和茎粗。彻底清洗根系上土壤,采用根系扫描仪(MICROTEK,上海中晶科技有限公司)扫描,利用LA-S万深植物图像分析软件处理扫描图像,获取根长度L、根系表面积SA、根体积V、根系平均直径等数据。

1.4 数据分析

试验数据使用Excel 2013进行整理与作图,并用SPSS 23.0软件对数据进行统计分析,LSD($P < 0.05$)方法用于检验处理间差异的显著性。采用cannoc 5软件进行RDA分析。

2 结果与分析

2.1 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗生长的影响

由表1可见,1%添加量的番茄秸秆堆肥TS施肥30 d后,番茄幼苗株高、茎粗、植株干物质质量和壮苗指数均显著低于CK;2%TS处理下番茄幼苗植株生长指标与CK没有显著差异。番茄堆肥TS添加量达到3%以上时对番茄幼苗生长有显著的正向促进效应,与对照CK相比,3%和4%TS处理番茄幼苗虽然在株高、茎粗和叶片数表观参数上与CK没有显著差异,但地上部和地下部干物质质量积累显著高于CK,其中地上部干物质质量显著增加了25.39%和16.77%,地下部增加了42.79%和20.93%,可见对根系的促进效应强于地上部。

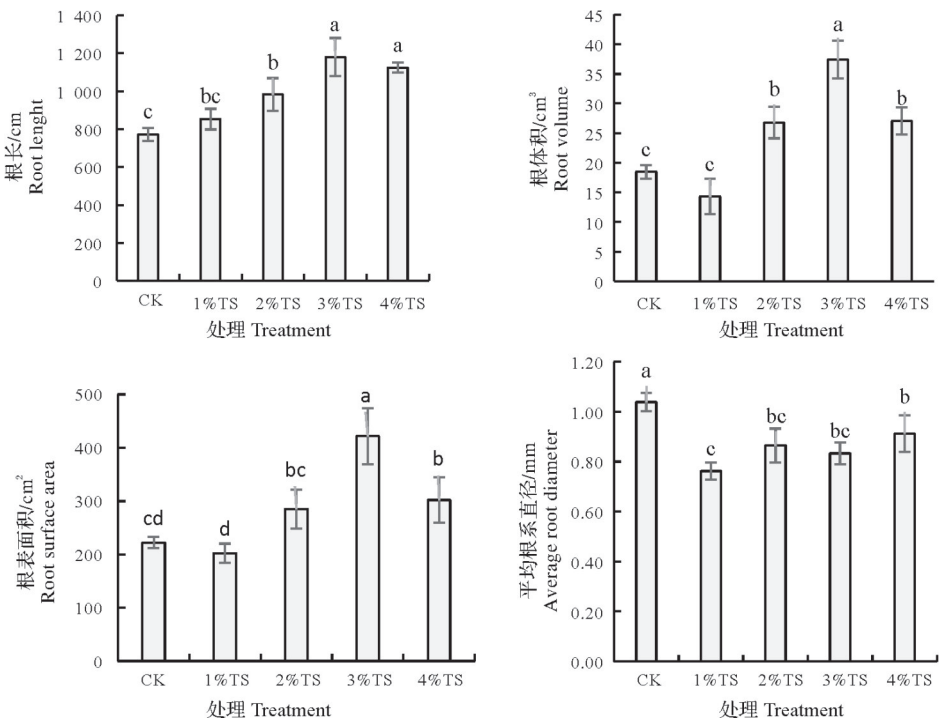
表 1 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗生长的影响
Tab.1 Effect of adding amount of tomato straw compost on tomato seedling growth

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	叶片数 Number of blades	地上部干重/g Shoot dry weight	地下部干重/g Root dry weight	全株干重/g Plant dry weight	壮苗指数 Healthy index
CK	58.77±4.71 ^a	8.08±0.82 ^a	10.33±1.52 ^a	6.38±0.71 ^b	0.71±0.04 ^c	7.09±0.67 ^b	1.78±0.08 ^b
1%TS	50.50±2.90 ^b	6.81±0.69 ^b	10.66±0.57 ^a	5.21±0.46 ^c	0.65±0.06 ^c	5.87±0.45 ^c	1.53±0.11 ^c
2%TS	57.67±2.67 ^a	8.61±0.34 ^a	10.66±0.57 ^a	5.51±0.34 ^{bc}	0.76±0.05 ^{bc}	6.28±0.32 ^{bc}	1.81±0.10 ^b
3%TS	58.36±3.27 ^a	8.21±0.45 ^a	11.00±0.57 ^a	8.00±0.15 ^a	1.02±0.08 ^a	9.03±0.07 ^a	2.42±0.15 ^a
4%TS	55.60±0.89 ^b	8.29±0.06 ^a	11.33±0.57 ^a	7.45±0.59 ^a	0.86±0.05 ^b	8.32±0.57 ^a	2.21±0.08 ^a

表中上标不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different superscript lowercase letters indicate that there are significant differences ($P<0.05$) between the treatments.

2.2 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗根系形态的影响

根系形态是指由复杂的空间结构和各种形态的根系所组成的植物根群,即各级根轴之间精细的空间扩展方式^[13],包括根长、根表面积、根体积、根平均直径等,它决定着植物对水分和营养的吸收,进而影响植物的生长。由图 1 可知,相比不添加番茄秸秆堆肥 CK,番茄秸秆堆肥 TS 添加量达到 2% 以上处理均能显著增加番茄幼苗根长、根体积和根表面积,其中 3%TS 处理增幅最高,较 CK 增加了 52.98%、102.69% 和 89.87%;其次为 4%TS、2%TS 处理,1%TS 处理与 CK 没有显著差异。添加番茄秸秆堆肥处理均显著降低番茄根系平均直径,其中 1%TS 处理根系平均直径最低,比 CK 降低了 26.58%,2%–4%TS 处理之间根系平均直径没有显著差异。



表中上标不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different superscript lowercase letters indicate that there are significant differences ($P<0.05$) between the treatments.

图 1 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗根系形态的影响

Fig.1 Effect of adding amount of tomato straw compost on root morphology of tomato seedlings

2.3 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗不同径级根系形态的影响

不同处理对根系径级影响变化能反映根系在不同环境条件中的适应性^[14],通过根系直径大小,对不同处理间番茄幼苗根系的径级组成进行分析。由图 2 可知,在 0~0.5 mm 和 0.5~2.0 mm 径级范围的根系对番茄根系长度的贡献率最大,随着直径的增大,对根系总长度的贡献率逐渐减少。添加堆肥处理

显著增加了<0.5 cm和0.5~2.0 mm径级范围的根系长度。其中3%TS处理增加幅度最高,在<0.5 cm和0.5~2.0 mm径级范围内显著高于CK 97.69%和104.6%,其余3个处理在<0.5 cm径级范围内增幅相近,均在70%左右;在0.5~2.0 mm径级范围内,增幅依次为4%TS(64.61%)、2%TS(44.4%)、1%TS(27.7%)。说明番茄秸秆堆肥添加能够显著增加细根根长。

随着径级的增大,各处理根表面积呈先增加后降低的趋势。添加番茄秸秆堆肥显著增加番茄在0.5~2.0 mm径级范围的根表面积和根系投影面积,其中3%TS增幅最高,较CK增加了102.7%、80.47%,说明3%TS处理既能增加细根表面积,也能增加主根表面积。0.5~2.0 mm和>5.0 mm径级范围的根体积对根系总体积贡献最大,2%以上的番茄堆肥添加量显著增加了各径级范围的根体积。1%TS处理降低了番茄根系在>5.0 mm径级范围内根表面积、投影面积和根体积。

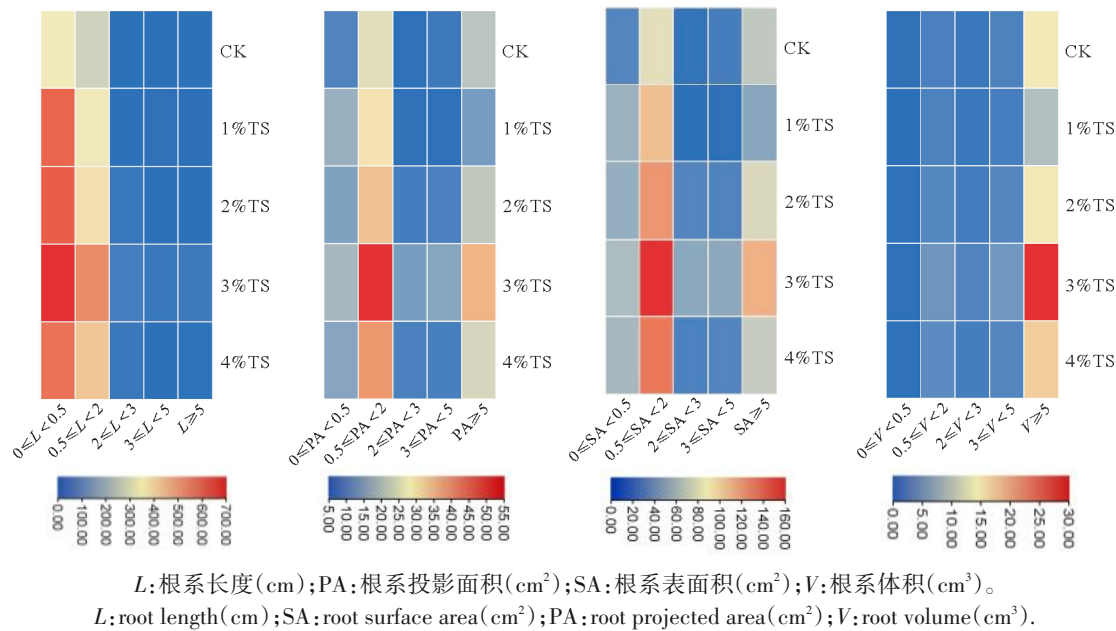


图2 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗不同径级根系形态的影响

Fig.2 Effect of adding amount of tomato straw compost on root morphology of tomato seedlings with different diameter classes

2.4 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗根际土壤养分的影响

由表2可知,TS添加对生长了30 d的番茄幼苗根际土壤全磷和全钾养分含量没有显著影响,但能够增加土壤全碳、全氮和速效养分含量。其中3%TS和4%TS处理土壤全碳含量较CK显著增加9.46%和10.74%,全氮含量增加25.73%和15.47%,水解氮增加18.65%和14.32%,速效钾增加含量18.31%和17.96%。试验4个番茄秸秆堆肥处理土壤速效磷含量均有显著增加,其中3%TS处理增幅最高为35.07%。综合各养分指标,以3%TS处理对土壤肥力提升最佳。

表2 番茄秸秆堆肥添加量对番茄幼苗根际土壤养分的含量的影响

Tab.2 Effect of adding amount of tomato straw compost on nutrient content in rhizosphere soil of tomato seedlings

处理 Treatment	全碳/ (g·kg ⁻¹) TC	全氮/ (g·kg ⁻¹) TN	全磷/ (g·kg ⁻¹) TP	全钾/ (g·kg ⁻¹) TK	水解氮/ (mg·kg ⁻¹) AN	速效磷/ (mg·kg ⁻¹) AP	速效钾/ (mg·kg ⁻¹) AK
CK	13.03±0.45 ^b	1.21±0.08 ^c	1.11±0.08 ^a	20.27±0.76 ^a	89.33±5.50 ^b	181.13±8.00 ^c	295.77±10.57 ^{bc}
1%TS	13.50±0.30 ^b	1.21±0.09 ^c	1.00±0.06 ^a	20.53±0.80 ^a	96.47±6.00 ^b	203.93±10.54 ^b	273.20±8.50 ^c
2%TS	13.00±0.55 ^b	1.22±0.05 ^c	1.07±0.05 ^a	20.80±0.75 ^a	91.17±5.60 ^b	201.73±10.58 ^b	316.53±11.02 ^b
3%TS	14.26±0.65 ^a	1.51±0.08 ^a	1.14±0.04 ^a	20.27±0.60 ^a	106.00±6.02 ^a	244.67±11.93 ^a	349.93±13.13 ^a
4%TS	14.43±0.56 ^a	1.39±0.08 ^b	1.15±0.07 ^a	20.10±0.55 ^a	102.13±7.04 ^a	236.1±9.19 ^a	348.90±11.82 ^a

表中上标不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Different superscript lowercase letters indicate that there are significant differences (P<0.05) between the treatments.

2.5 番茄植株生长、根系形态与土壤养分指标 RDA 分析

为进一步分析番茄植株生长、根系形态、土壤养分含量之间的关系,对番茄植株生长指标株高 height、茎粗 diameter、叶片数 leaf、地上部干重 shoot dry、全株干重 all dry、壮苗指数 index 与根系形态指标根长 long、根体积 volume、根表面积 area、根系直径 diam、根系干重 dry(图 3A)和土壤 TC、TN、TP、TK、AN、AP、AK(图 3B)进行了 RDA 分析。由图 3A 可知,根表面积、根系平均直径与番茄植株生长指标有显著正相关关系($P=0.036$ 、 $P=0.036$),二者能够解释 48.9% 的生长信息,对于番茄植株生长贡献率达到 78.9%。图 3B 可见,AP 与根系形态有显著正相关关系($P=0.002$),能够解释 47.1% 的根系形态建成信息,对于番茄根系形态的贡献率为 64.1%。可见在番茄幼苗定植 30 d 内,土壤 AP 是影响番茄幼苗根系形态建成的关键土壤环境因子,根系根表面积、平均直径是影响番茄幼苗植株生长的主要根系指标。

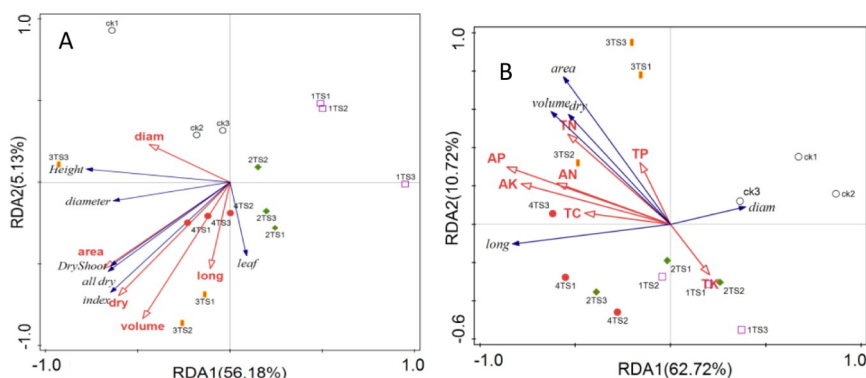


图3 番茄植株生长、根系形态与土壤养分指标 RDA 分析

Fig.3 RDA analysis of plant growth, root morphology, and soil nutrient indicators of tomato

3 讨论

合理的农田管理措施能够优化根系形态^[15]、提高生理活性,促进根系功能发挥^[16],进而影响作物地上部分生长及产量。在日光温室番茄生产中,番茄定植后 30 d 内是植株营养生长和根系发育的旺盛时期。研究表明在底肥中添加番茄秸秆堆肥能够影响番茄幼苗根际养分环境、根系形态建成和植株生长。添加量达到 2%TS 以上处理就能够显著增加番茄幼苗根际土壤速效磷养分含量,提高番茄幼苗根长、根体积和根表面积,降低根系平均直径,但对地上部生长和物质积累没有显著影响;TS 添加量达到 3% 以上的处理土壤全碳、全氮和速效氮磷钾含量均显著高于 CK,同时番茄幼苗植株生长和根系形态指标均显著高于对照,提高了壮苗指数,说明番茄秸秆堆肥在还田初期就能够释放有效养分,促进番茄根系发育和幼苗生长。3%TS 处理在促进番茄幼苗地上部生长、根系干物质质量方面显著优于其他处理,同时在 <0.5 cm 和 0.5~2.0 mm 径级范围内根长显著高于其他处理,在 0.5~2.0 mm 和 >5.0 mm 径级范围的根表面积和根系投影面积增幅也最高。有研究表明添加生物炭能够促进辣椒根系细根长度和表面积的增加,增加了对土壤空间的覆盖,进而增加根系吸收水肥的能力^[17]。番茄幼苗根系主要是通过增加细根的数量来促进根系的伸长,细根与土壤接触较多,可以增加对水分和养分的吸收利用^[18-19],在腐殖质丰富或容重较小的土壤中,植物根长会表现为增加的趋势^[20],添加番茄秸秆堆肥能够改善土壤的物理结构,使番茄根系在土壤中的物理约束减小;同时 TS 处理增加了番茄根际土壤速效养分含量,诱导番茄根系增加新根数量,降低根系平均直径,促进细根、新根生长,扩大根系营养吸收面积,从而提高地上部物质积累。

根系是作物养分获取最直接的器官,其构型变化能增加养分吸收的生物学潜力^[21]。试验发现底肥中 TS 达到 3% 添加量才能够有效增加番茄根际土壤全碳 TC、全氮 TN 和速效养分含量。对土壤速效养分指标增加幅度依次为土壤速效磷 AP、全氮 TN、速效钾 AK、水解氮 AN、全碳 TC,其中 AP 养分增加幅度最大。植物吸收的磷大部分是靠根系从土壤中吸收的,由于磷在土壤中的移动性差,植物对磷素的吸收只能依靠根系在土壤中的分布及接触到的土壤体积,因此根系形态与植物的磷元素利用效率之间存在着紧密的相关性^[22]。有研究^[23]发现番茄的地上部生物量及地下部的总根长、根表面积、根体积受施磷水平影响显著,磷肥的施用对番茄地上部、地下部的生长均具有显著的促进作用。对基础速效磷含量较高

(约220 mg/kg)的土壤研究发现,连续两年减磷70%或一年不施磷肥不影响番茄产量^[23]。试验土壤基础速效磷含量较高,有较大的减磷潜力,添加秸秆能够改变土壤微生物-根系形态,对番茄磷吸收具有显著的调控作用^[24]。试验RDA分析发现,土壤AP是影响番茄幼苗根系形态建成的关键土壤环境因子。因此在底肥中通过增施番茄秸秆堆肥,优化番茄根际磷养分环境,促进番茄根长、根体积和根表面积,来增加番茄根系营养吸收面积。研究^[25]表明减少磷肥用量,可增加干物质和养分在果实中的分配,优化养分分配,因此试验将在进一步研究中在番茄开花坐果期探索增碳减磷施肥方案对番茄产量和品质的影响,以期提出鲜食番茄生产中底肥的优化施用方案。

4 结 论

3%TS处理能够提高番茄根际土壤全量碳氮和速效氮磷钾养分含量,增加番茄幼苗根长、根体积和根表面积,降低平均根系直径;尤其是增加了小径级范围内的根长和根表面积,显著增加根系生物量,进而促进地上部物质积累。RDA分析表明根表面积、根系平均直径与番茄植株生长指标有显著正相关关系,土壤AP是番茄根系形态建成主要影响环境因子,因此生产中在基础磷养分较高的土壤中定植番茄,可通过增施番茄秸秆堆肥,减施磷肥来促进番茄幼苗根系的生长发育。

参考文献 References:

- [1] 孙永珍,贺靖,魏芳,等.“十三五”我国番茄产业发展及其国际竞争力评价[J].中国瓜菜,2023,36(1):112-116.
SUN Y Z, HE J, WEI F, et al. Evaluation on the development and international competitiveness of China's tomato industry during the 13th Five-Year Plan period[J]. Chinese melons and vegetables, 2023, 36(1): 112-116.
- [2] 余亚琳,胡静,樊兆博,等.设施菜田夏季闷棚对还田秸秆矿化和CO₂排放的影响[J].安徽农业科学,2020,48(2):81-84.
YU Y L, HU J, FAN Z B, et al. Effect of stuffy shed on mineralization and CO₂ emission of returning straw in greenhouse vegetable field in summer[J]. Anhui agricultural science, 2020, 48(2): 81-84.
- [3] MADER P, FLIESSBACH A, DUBOIS D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming [J]. Science, 2002, 296 (5573): 1694-1697.
- [4] 葛梦娇.番茄秸秆高温堆肥及在番茄育苗应用中的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.
GE M J. The research on tomato straws compost and the application in tomato seeding [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2016.
- [5] 韩伶,李衍素,于贤昌,等.日光温室蔬菜残株堆腐后还田对根区土壤环境及蔬菜产量的影响[J].应用生态学报,2016,27(5):1553-1559.
HAN L, LI Y S, YU X C, et al. Effects of vegetable residue compost returning to soil on soil properties and vegetable yield in solar greenhouse [J]. Chinese journal of applied ecology, 2016, 27(5): 1553-1559.
- [6] 胡晓婷,陈丹艳,牛博宇,等.番茄秸秆堆肥提高番茄果实风味的适宜添加比例研究[J].植物营养与肥料学报,2019,25(4):611-619.
HU X T, CHEN D Y, NIU B Y, et al. The suitable percentage of tomato straw compost in garden soil for improvement of tomato flavor [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(4): 611-619.
- [7] 杨冬艳,冯海萍,桑婷,等.番茄秸秆不同还田方式对番茄生长及土壤碳氮含量和酶活性的影响[J].中国蔬菜,2018,(10):55-59.
YANG D Y, FENG H P, SANG T, et al. Effects of different methods of returning tomato straw to field on tomato growth, soil carbon/nitrogen contents and enzyme activity [J]. China vegetables, 2018, (10): 55-59.
- [8] 胡晓婷,陈丹艳,牛博宇,等.番茄秸秆堆肥对番茄生长发育、产量及品质的影响[J].江苏农业科学,2019,47(1):10-111.
HU X T, CHEN D Y, NIU B Y, et al. Effects of tomato straw compost on growth, yield and quality of tomato [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(1): 108-111.
- [9] 杨冬艳,桑婷,冯海萍,等.番茄和辣椒秸秆还田对自身蔬菜幼苗生长及根系酶活性的影响[J].上海农业学报,2020,36(5):23-28.
YANG D Y, SANG T, FENG H P, et al. Effects of tomato and pepper straw returning to field on growth and root enzyme activity of self vegetable seedlings [J]. Acta agriculturae Shanghai, 2020, 36(5): 23-28.
- [10] 杨冬艳,桑婷,冯海萍,等.番茄与辣椒秸秆不同还田方式对茄果类蔬菜幼苗生长的影响[J].福建农业学报,2020,35(3):273-279.
YANG D Y, SANG T, FENG H P, et al. Effects of returning tomato and cayenne straw on to field on growth of solanaceous vegetable seedlings [J]. Fujian journal of agricultural sciences, 2020, 35(3): 273-279.

- [11] 杨冬艳,冯海洋,赵云霞,等.番茄、辣椒秸秆堆肥与化肥配施对日光温室番茄产量和品质的影响[J].农业工程技术,2019,39(28):17-21.
YANG D Y, FENG H P, ZHAO Y X, et al. Effects of tomato, pepper straw compost and chemical fertilizer on yield and quality of tomato in greenhouse[J]. Agricultural engineering technology, 2019, 39(28): 17-21.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [13] JONATHAN L. Root architecture and plant productivity[J]. Plant physiology, 1995, 109(1): 7-13.
- [14] 姜宇,陶猛,张雪,等.外源L-苯丙氨酸对番茄幼苗生长及根系形态的影响[J].江苏农业科学,2022,50(22):131-138
JIANG Y, TAO M, ZHANG X, et al. Impacts of exogenous L-phenylalanine on seedling growth and root morphology of tomato [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(22): 131-138.
- [15] 张智勇,董秀秀,王绍明,等.不同连作障碍消减措施对新疆棉花根系形态生理特征的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(4):918-925.
ZHANG Z Y, DONG X X, WANG S M, et al. Influence of different control measures of continuous cropping obstacle on morphological and physiological characteristics of cotton roots in XinJiang[J]. Chinese journal of applied and environmental biology, 2019, 25(4): 918-925.
- [16] 孙三杰,李建明,宗建伟,等.亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗根系形态及叶片结构的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3027-3032.
SUN S J, LI J M, ZONG J W, et al. Effects of sun-low temperature and drought stress on root morphology and leaf structure of tomato seedlings[J]. Chinese journal of applied ecology, 2012, 23(11): 3027-3032.
- [17] 牟舒敏,关月明,高晶霞,等.添加生物炭对连作辣椒生长及根系生理代谢和产量的影响[J].西北农业学报.2023,32(6):1-13.
MOU S M, GUAN Y M, GAO J X, et al. Effects of biochar addition on growth, root physiological metabolism and yield of continuous cropping pepper[J]. Acta agriculturae boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(6): 1-13.
- [18] 曹秀,夏仁学,杨环宇,等.沙培条件下磷、钾、钙亏缺对枳(*Poncirus trifoliata*)幼苗根系形态及营养吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):981-988.
CAO X, XIA R X, YANG H Y, et al. Effects of P, K and Ca deficiency on the root morphology and nutrient absorption of *Poncirus trifoliata* seedlings[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2014, 20(4): 981-988.
- [19] 苗果园,高志强,张云亭,等.水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究[J].作物学报,2002(4):445-450.
MAO G Y, GAO Z Q, ZHANG Y T, et al. Effects of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in wheat [J]. Acta agronomica Sinica, 2002(4): 445-450.
- [20] 邓坤枚,罗天祥,张林.云南松林的根系生物量及其分布规律的研究[J].应用生态学报,2005,16(1):21-24.
DENG K M, LUO T X, ZHANG L. Root biomass of different stand-age *Pinus yunnanensis* forest and its distribution in different soil depths[J]. Chinese journal of applied ecology, 2005, 16(1): 21-24.
- [21] 严小龙,廖红,戈振扬,等.植物根构型特性与磷吸收效率[J].植物学通报,2000(6):511-519.
YAN X L, LIAO H, GE Z Y, et al. Root architecture characteristics and phosphorus acquisition efficiency in plants[J]. Chinese bulletin of botany, 2000(6): 511-519.
- [22] 于洪杰,陈少灿,周新刚,等.不同土层深度及磷水平对番茄生物量及根系形态的影响[J].中国蔬菜,2016(4):42-47.
YU H J, CHEN S C, ZHOU X G, et al. Effects of different soil depth and phosphorus level on tomato biomass and root morphology[J]. China vegetables, 2016(4): 42-47.
- [23] 赵伟,杨圆圆,蒋丽媛,等.减施磷肥提高设施番茄氮磷钾生理效率并减少土壤速效磷累积[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1710-1718.
ZHAO W, YANG Y Y, JIANG L Y, et al. Reduced conventional phosphorus input increase physiological efficiencies of absorbed nitrogen, phosphorus and potassium in greenhouse tomato and decrease soil available phosphorus accumulation [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(10): 1710-1718.
- [24] 何怡,高伟,诸海焱,等.秸秆添加对土壤微生物-根系形态介导的番茄磷吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(2):363-371.
HE Y, GAO W, ZHU H T, et al. Effects of straw addition on soil microbes-root morphology governing phosphorus-acquisition of *Solanum lycopersicum* [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2023, 29(2): 363-371.
- [25] 孔灵君,徐坤,何平,等.氮硫互作对大葱氮、磷、钾、硫吸收分配特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):172-178.
KONG L J, XU K, HE P, et al. Influence of interaction between nitrogen and sulfur on N, P, K and S absorption and distribution of Chinese spring onion[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2014, 20(1): 172-178.