

氮肥与生物炭互作对设施番茄生长及根结线虫病害的影响

周琦 吴芳 王振龙 徐志鹏 邓超超
施志国 张靖 宿翠翠 余亚琳 周彦芳

(甘肃省农业工程技术研究院, 730000, 甘肃兰州)

摘要 为探索氮肥和生物炭互作对番茄生长及根结线虫病害的影响, 筛选合适的氮肥和生物炭的施用量, 采用盆栽试验, 设置二因素(氮肥和生物炭)3水平完全随机区组试验设计, 研究3个施氮量(N1: 0 mg/kg 土, N2: 200 mg/kg 土, N3: 400 mg/kg 土)和3个施生物炭量(C1: 0 g/kg 土, C2: 2 g/kg 土, C3: 4 g/kg 土)不同组合处理对番茄生长、产量品质、光合特性及根结线虫指标影响。结果表明, 施氮肥、生物炭和二者互作效应对番茄生长、产量品质、光合特性及根结线虫指标影响均达到极显著水平($P < 0.01$)或显著水平($P < 0.05$)。随着施氮量和生物炭量的增加, 番茄生长、光合特性、产量及品质均呈先增加后降低的趋势。根结数、根结线虫数、虫卵数呈现先降低后升高的趋势, N2C3处理下达到最低值; N2C3处理下叶面积、净光合速率、产量、维生素C等指标显著高于其他处理, 根结线虫数和虫卵数显著低于其他处理。因此, 在甘肃省河西地区已感染根结线虫病害的设施土壤(全氮 1.52 g/kg, 有效磷 191.9 mg/kg, 速效钾 323 mg/kg)中, 当氮肥的施用量为 200 mg/kg 土, 生物炭的施用量为 4 g/kg 土时利于番茄生长, 品质较优, 对根结线虫病害有较好的防效。

关键词 番茄; 生物炭; 产量; 品质; 光合特性; 根结线虫

随着蔬菜产业结构升级及农业供给侧结构改革, 甘肃省河西地区设施蔬菜种植面积逐年扩大, 专业化、规模化水平日益提高, 设施蔬菜已成为农民增收的主要途径之一。但受经济利益和有限土地资源等因素的影响, 大水大肥和设施蔬菜单一连作成为我国设施蔬菜生产体系中普遍存在的现象^[1-3], 导致设施蔬菜连作障碍问题日益严重, 主要表现为有益微生物数量减少、植食性线虫增多等^[4]。根结线虫是设施菜田种植中常见的土传病害, 发病范围广、危害程度大、防治效果差。我国番茄每年因根结线虫病害而导致的产量损失在 20%~30%^[5]。在设施番茄生产中, 为了提高蔬菜产量, 氮肥施用量过多, 一些地区甚至超过 4000 kg/hm²^[6], 氮肥过量施用使氮素利用效率降低, 氮素大量流失造成地下水污染, 影响番茄果实品质, 同时也造成环境的污染和资源浪费等问题^[7-8]。最佳的施肥管理措施可提高作物经济产出和养分资源利用效率, 抑制病虫害发生。适量施用氮肥不仅能够促进番茄植株生长发育, 提高品质和产量, 还能增加番茄植株光合性能^[9-11], 降低土壤线虫总数和减

轻根结线虫病害发生^[12-14]。因此, 适当施用氮肥既能保证作物产量, 又能降低根结线虫病害发生, 实现农业绿色发展、减本增效的目标。

生物炭是指在缺氧或者低氧状态下, 高温热解农业废弃物(如小麦、玉米秸秆)炭化后产生的物质, 具有改良调节土壤 pH、增加土壤养分、增强土壤保水保肥性、提升微生物群落丰度及多样性等功能^[15]。研究^[16-18]表明, 施用生物炭不仅能够改良土壤, 提高土壤保水保肥能力, 而且可以增加作物叶面积指数, 提高叶绿素含量, 促进光合作用, 延缓植株衰老, 促进生长, 提高产量, 改善品质。前人^[19]通过施用生物炭对土壤线虫影响的有关试验表明, 随着生物炭添加量的增加, 食细菌类线虫与食真菌类线虫所占的比例增加, 植物寄生性线虫所占的比例随生物炭用量的提高而下降。

目前, 对设施番茄根结线虫防治主要通过化学农药防治间套作豆科作物、微生物菌剂、秸秆还田、选用抗病品种或土壤强还原剂等措施, 在根结线虫病害研究方面取得了许多突破^[3,20], 然而

作者简介: 周琦, 主要从事作物高效栽培与水肥调控研究, E-mail: 1610821576@qq.com

周彦芳为通信作者, 主要从事作物高效栽培与地力提升研究, E-mail: 151245056@qq.com

基金项目: 甘肃省青年科技基金计划(21JR7RA750, 23JRRH0018); 甘肃省民生科技专项一科技特派员(基地)专项(23CXNH0019)

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-06-20; 网络出版日期: 2024-07-26

通过优化土壤环境缓解设施番茄根结线虫病害发生方面的研究还相对不足，如何因地制宜确定具体措施并筛选关键性指标来评价生物炭和氮肥培肥效果，从而寻求最佳培肥模式，仍需结合当地设施蔬菜生产实际开展深入研究。本研究通过筛选氮肥和配施生物炭最佳组合，为甘肃省河西地区设施番茄科学施肥和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

盆栽试验在甘肃省武威市凉州区黄羊镇大棚中 (102°51' E, 37°40' N) 进行，试验区海拔 1510 m，年均气温 7.8 °C，无霜期 152 d，降水量 145 mm 左右，年蒸发量 2021 mm，≥ 10 °C 年有效积温 3250 °C，太阳年辐射总量 580~660 kJ/cm²。灌溉以地下水为主。

1.2 试验材料与试验设计

盆栽土来自基地连续种植番茄且根结线虫发病严重地块。除去表层土后，采集 0~20 cm 土样，多点采样混匀，过 50 目筛，充分混匀。土壤基本理化性质为有机质 72 g/kg、全氮 1.52 g/kg、碱解氮 522.2 mg/kg、有效磷 191.9 mg/kg、速效钾 323 mg/kg、pH 7.63、电导率 611.5 μS/cm、容重 0.95 g/cm³。

供试作物为番茄 (*Solanum lycopersicum*)，品种为当地主栽品种毛粉 802；供试生物炭为玉米秸秆炭，由河南立泽环保科技有限公司提供，生物炭主要性质为碳质量分数 42.21%、总氮 5.34 g/kg、全钾 11.23 g/kg、总磷 2.32 g/kg、碳氮比 61.22%、pH 8.78、碱解氮 125.33 mg/kg、有效磷 65.23 mg/kg、速效钾 125 mg/kg。供试氮肥为纯硝酸铵，氮肥的 1/3 作为基肥施入，其余 2/3 在生长期分 2 次追施。供试磷、钾肥分别为化学纯磷酸氢二钾和硫酸钾。所有处理磷、钾肥施用量相同 (分别为 P₂O₅ 100 mg/kg 土，K₂O 200 mg/kg 土)，均作为基肥施入。

试验用圆底花盆 (深 30 cm、直径 40 cm)，每盆装土 10 kg。采用二因素完全区组试验。氮肥设 3 个水平，分别为 N1 (0 mg/kg 土)、N2 (200 mg/kg 土)、N3 (400 mg/kg 土)；生物炭设 3 个水平，分别为 C1 (0 g/kg 土)、C2 (2 g/kg 土)、C3 (4 g/kg 土)。参考吕昊峰等^[3]试验用量，并结合处理要求计算获得试验具体氮肥和生物炭用量，

每个处理 6 个重复，每个重复定植 1 株长势一致的番茄苗，共 54 盆。土壤水分保持在田间持水量 40% 左右。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标 每个处理选择 3 株长势一致的番茄植株，用卷尺测量根部到主茎顶端的距离，记为株高；用游标卡尺 (DWKC-2038，杭州德力西集团有限公司) 测定茎基部以上 3 cm 处的茎粗及生长点向下第 3 片叶片长和宽，叶面积=叶长×叶宽×0.78^[21]。

1.3.2 光合特性 在番茄果实膨大期，选晴天上午 9:00-10:30，用便携式光合仪 (LI-6400XT，美国) 测定番茄叶片蒸腾速率 (T_r)、光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 等参数，每个处理重复测定 3 次。每个处理选择长势一致的 3 株番茄植株，用手持叶绿素仪 (SPAD-502 Plus，日本) 测定番茄生长点向下第 3 片叶片的相对叶绿素含量 (SPAD 值)，每个叶片测定 3 次，取其均值。

1.3.3 产量和品质 选取 3 个具有代表性的成熟果实用天平测定单果重，计算每个单株产量。用游标卡尺测定横径。每个处理取植株中部番茄用于番茄红素、可溶性糖、维生素 C (V_c) 等品质指标的测定。用硫酸-萘酚比色法测定可溶性糖含量，采用钼蓝比色法测定 V_c 含量，采用分光光度计法测定番茄红素含量。

1.3.4 根重、土壤根结数及根结线虫数 成熟期将各处理番茄茎秆贴土面剪断，用自来水洗去根系周围土壤，吸水纸吸干后用天平称量根重。

成熟期将番茄根系与土壤分离，用清水将根系冲洗干净，用计数器统计根结数量。

取 50 g 鲜土样，采用改进的贝曼漏斗法^[22]过夜处理，收集根结线虫二龄幼虫，在显微镜下观察并统计根结线虫数量。

1.3.5 根系中线虫卵数 将根部的明水用吸水纸轻轻吸干，称其鲜重 1 g，然后用剪刀剪成 5 mm 的小段，放入烧杯中，加入浓度为 1% 的 NaClO 溶液，放入摇床 150 转/min 转速下振荡 5 min，分离根结线虫虫卵，在显微镜下统计观察根结线虫卵的数量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件分析与处理数据，运用 SPSS 21.0 软件对试验数据进行方差分析

($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氮肥和生物炭互作对番茄生长的影响

随着施氮肥和生物炭量的增加,番茄株高、茎粗和叶面积均呈先增后降的趋势,且所有施肥处理均高于对照(N1C1)处理(表1)。番茄株高 N2C3 处理最高, N3C2 处理次之, N2C3 与 N2C1、N2C2、N3C3 处理间差异不显著,但显著高于其他处理;所有处理中, N2C3 处理番茄茎粗最粗(11.02 mm), N1C1 处理最细(8.10 mm), N2C3 较 N1C1 处理提高 36.05%, N2C3 与 N3C2 处理间差异不显著,与其他处理均显著;番茄叶面积 N3C1 处理最大(16.99 cm²), N2C3 处理次

表 1 氮肥、生物炭互作对番茄株高、茎粗和叶面积的影响
Table 1 Effects of nitrogen fertilizer and biochar interaction on tomato plant height, stem diameter and leaf area

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (cm ²)
N1C1	37.33±1.02c	8.10±0.19e	10.43±0.09g
N1C2	37.90±1.40c	10.21±0.19bc	12.29±0.21f
N1C3	39.00±0.60c	9.73±0.34bcd	13.33±0.17e
N2C1	47.30±1.06ab	9.35±0.13d	12.48±0.19f
N2C2	47.77±0.75ab	9.88±0.20bcd	14.17±0.10d
N2C3	49.67±0.59a	11.02±0.32a	16.31±0.14b
N3C1	36.37±2.92c	8.40±0.08e	16.99±0.09a
N3C2	44.07±2.33b	10.40±0.25ab	15.83±0.24bc
N3C3	45.33±2.12ab	9.51±0.22cd	15.63±0.23c

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。
Different lowercase letters in same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

表 2 氮肥、生物炭互作对番茄光合特性的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilizer and biochar interaction on the photosynthetic characteristics of tomatoes

处理 Treatment	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	SPAD
N1C1	8.26±0.16d	0.38±0.03d	187.80±2.69e	2.58±0.04e	45.33±1.76c
N1C2	11.76±0.08c	0.42±0.02d	244.36±2.49c	3.38±0.33cd	47.20±0.87c
N1C3	11.38±0.07c	0.50±0.03c	216.24±2.19d	3.04±0.28de	44.67±2.91c
N2C1	11.56±0.13c	0.55±0.03bc	264.42±2.68b	3.71±0.11bcd	55.00±1.15b
N2C2	12.37±0.05b	0.61±0.03ab	285.44±2.99a	4.16±0.33abc	60.67±2.03ab
N2C3	15.98±0.14a	0.67±0.02a	294.55±4.28a	4.75±0.08a	65.00±2.52a
N3C1	12.41±0.20b	0.51±0.01c	255.98±8.23bc	3.57±0.25bcd	59.67±0.88ab
N3C2	12.79±0.50b	0.54±0.02bc	193.88±2.67e	4.33±0.10ab	62.67±1.20a
N3C3	11.14±0.07c	0.60±0.02ab	253.24±1.66bc	3.86±0.43bcd	63.67±2.33a

2.3 氮肥和生物炭互作对番茄产量及品质的影响

随着施氮肥和生物炭量的增加,番茄产量、

之(16.31 cm²), N1C1 最小(10.43 cm²), N3C1 处理均显著高于其他处理,较其他处理叶面积提高 4.17%~62.90%。以上表明,适宜的氮肥和生物炭组合能提高番茄生长,其中 N2C3 处理效果最优。

2.2 氮肥和生物炭互作对番茄光合特性及叶绿素含量的影响

番茄叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 和 SPAD 值随着施氮肥和生物炭量的增加整体均呈先升高后降低的趋势,同时番茄 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 各指标所有施肥处理均高于对照(N1C1)处理,SPAD 值除 N1C3 处理外,其余处理也均高于 N1C1 处理(表2)。其中,番茄叶片 P_n 以 N2C3 处理最高,为 15.98 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,与其他处理相比均达到显著差异水平($P < 0.05$),较其他处理提高 24.94%~93.46%。 G_s 以 N2C3 处理最高,达 0.67 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,与 N1C1、N1C2、N1C3、N2C1、N3C1 和 N3C2 处理差异显著,与 N2C2、N2C3、N3C3 处理差异不显著, N2C3 处理较其他处理提高 9.84%~76.32%。 C_i 以 N2C3 处理最高,达 294.55 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,与 N2C2 差异不显著,与其他处理差异显著。其中, N2C3、N2C2 处理 C_i 分别较 N1C1 处理提高 56.84%和 51.99%。 T_r 以 N2C3 处理最高,与 N2C2、N3C2 处理差异不显著,与其他处理差异显著。其中, N2C3、N2C2、N3C2 处理 T_r 分别较 N1C1 提高 84.11%、61.24%和 67.83%。SPAD 值以 N2C3 处理最高,较其他处理提高 2.09%~45.51%。以上说明,适宜的氮肥和生物炭组合能提高番茄光合性能, N2C3 处理光合性能最强。

单果重、单果直径、番茄红素、可溶性糖和 Vc 含量均呈先增后降的趋势,所有处理中 N2C3 最高,

N1C1 处理最低（表 3）。在番茄产量、单果重和 V_c 指标中，N2C3 处理较其他处理均达到显著差异，较其他处理增高幅度分别为 3.91%~43.95%、9.98%~49.00% 和 6.40%~92.10%。番茄单果直径 N2C3 与 N3C1、N3C2 处理差异不显著，与其他处理相比均达到显著，N2C3 处理较其他处理提高 1.79%~87.12%。番茄红素 N2C3 与 N3C1 处理差

异不显著，与其他处理相比均达到显著，N2C3 处理较其他处理提高 7.32%~144.44%。番茄可溶性糖 N2C3 与 N3C2 差异不显著，与其他处理相比均达到显著，N2C3 处理较其他处理提高 3.00%~43.28%。以上表明，适宜的氮肥和生物炭量可以提高番茄产量及品质，其中 N2C3 处理产量最高，品质最优。

表 3 氮肥、生物炭互作对番茄产量及品质的影响
Table 3 Effects of nitrogen fertilizer and biochar interaction on tomato yield and quality

处理 Treatment	产量 (g/株) Yield (g/plant)	单果重 Single fruit weight (g)	单果直径 Single fruit diameter (mm)	番茄红素 Lycopene (mg/kg)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	V_c (mg/kg)
N1C1	346.13±7.22e	74.86±2.57d	39.43±1.28e	0.54±0.02f	3.35±0.08e	78.19±0.48h
N1C2	355.21±5.79de	86.95±2.53c	57.90±1.35c	0.65±0.02e	4.06±0.05cd	88.92±0.39g
N1C3	366.73±5.98d	95.09±1.55b	51.80±1.55d	0.82±0.01d	4.30±0.05b	99.54±0.23f
N2C1	411.24±2.95c	94.73±2.64b	55.04±1.27cd	0.75±0.03d	3.97±0.10d	88.08±0.58g
N2C2	464.11±3.22b	101.42±2.05b	65.67±1.66b	1.09±0.05b	4.22±0.06bc	125.26±0.50d
N2C3	498.27±4.74a	111.54±2.97a	73.78±1.00a	1.32±0.03a	4.80±0.06a	150.20±0.55a
N3C1	479.46±5.04b	94.42±1.96b	72.42±1.45a	1.23±0.03a	4.09±0.05cd	132.15±0.46c
N3C2	479.50±3.62b	99.26±2.02b	72.48±1.45a	1.01±0.04bc	4.66±0.06a	141.16±0.51b
N3C3	463.84±4.33b	97.20±1.64b	65.62±1.39b	0.96±0.03c	4.21±0.05bc	115.28±0.50e

2.4 氮肥和生物炭互作对番茄根结线虫防治效果的影响

随着施氮肥和生物炭量的增加，可以不同程度增加根系重量和减少番茄根结数、根结线虫数、虫卵数（表 4）。番茄根系重量呈先增再降的趋势，根结数、根结线虫数和虫卵数呈现先降再升的趋势。N2C3 处理根重最高，达到 73.53 g；N1C1 处

理最低，为 29.48 g；N2C3 处理与 N2C2、N3C2 处理差异不显著，与其他处理差异显著。N2C3 处理番茄根结数、根结线虫数和虫卵数最低，分别为 388.67、454.33 和 3240.67，显著低于其他处理，降低幅度分别为 3.56%~26.57%、7.84%~24.61% 和 10.89%~32.66%。以上表明，适宜的氮肥和生物炭量可以有效抑制番茄根结线虫对根系的侵染。

表 4 氮肥、生物炭互作对番茄根结线虫的影响
Table 4 Effects of nitrogen fertilizer and biochar interaction on tomato root-knot nematodes

处理 Treatment	根重 Root weight (g)	根结数 Number of root-knots	线虫数 Number of nematodes	虫卵数 Number of eggs
N1C1	29.48±0.48c	529.33±4.70a	602.67±5.36a	4812.67±51.40a
N1C2	31.21±2.17c	523.00±7.51ab	532.00±6.43c	4338.33±62.65b
N1C3	34.27±2.59c	510.00±4.16ab	511.00±5.29d	4130.67±54.91c
N2C1	61.80±2.17b	446.33±8.57d	534.67±6.57c	3713.00±80.65ef
N2C2	66.50±2.21ab	403.00±6.51f	493.00±9.07e	3636.67±38.52f
N2C3	73.53±4.22a	388.67±5.24f	454.33±4.70f	3240.67±41.95g
N3C1	60.76±3.07b	475.00±7.37c	528.33±4.33c	3890.33±44.21de
N3C2	65.42±2.25ab	425.67±8.51e	500.33±4.91de	4024.67±58.72cd
N3C3	63.85±4.32b	507.33±1.20b	572.00±1.15b	4470.67±86.90b

2.5 氮肥和生物炭互作对番茄生长、产量、品质、光合特性及根结线虫指标影响的显著性分析

施氮肥对番茄株高、茎粗、叶面积、光合特性 (P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r)、SPAD 值、产量、单果重、

单果直径、品质指标（番茄红素、可溶性糖、 V_c ）、根重、根结数、线虫数和虫卵数的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)（表 5）；施生物炭对番茄茎粗、叶面积、光合特性 (P_n 、 G_s 、 C_i)、产量、

表5 氮肥、生物炭和二者互作对番茄生长、产量、品质、光合特性及根结线虫指标影响
Table 5 Effects of nitrogen, biochar and their interaction on tomato growth, yield and quality, photosynthetic characteristics and root-knot nematode indicators

项目 Item	因素 Factor		
	施氮量 Nitrogen rate (N)	施生物炭量 Biochar rate (C)	互作 效应 (N×C)
株高 Plant height	++	+	ns
茎粗 Stem diameter	++	++	++
叶面积 Leaf area	++	++	++
P_n	++	++	++
G_s	++	++	ns
C_i	++	++	++
T_r	++	+	ns
SPAD	++	+	ns
产量 Yield	++	++	++
单果重 Single fruit weight	++	++	+
单果直径 Single fruit diameter	++	++	++
番茄红素 Lycopene	++	++	++
可溶性糖 Soluble sugar	++	++	++
V_c	++	++	++
根重 Root weight	++	+	ns
根结数 Number of root-knots	++	++	++
线虫数 Number of nematodes	++	++	++
虫卵数 Egg mass	++	++	++

“+”表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关，“++”表示 $P < 0.01$ 水平上显著相关，“ns”表示无显著相关。

“+” indicates significant correlation at $P < 0.05$ level, “++” indicates significant correlation at $P < 0.01$ level, “ns” indicates no significant correlation.

表6 番茄生长、产量、品质、光合特性及根结线虫指标相关性分析

Table 6 Correlation analysis of tomato growth, yield and quality, photosynthetic characteristics and root-knot nematode indicators

指标 Index	SD	LA	SPAD	Y	L	SS	V_c	P_n	G_s	C_i	T_r	PK	NN
PH	0.502**	0.367	0.616**	0.526**	0.404*	0.486*	0.407*	0.469*	0.740**	0.576**	0.662**	-0.692**	-0.448*
SD		0.416*	0.365	0.345	0.384*	0.799**	0.484*	0.696**	0.446*	0.350	0.567**	-0.533**	-0.751**
LA			0.804**	0.908**	0.905**	0.797**	0.935**	0.750**	0.704**	0.435*	0.712**	-0.572**	-0.599**
SPAD				0.907**	0.745**	0.599**	0.798**	0.560**	0.717**	0.507**	0.727**	-0.666**	-0.410*
Y					0.906**	0.666**	0.916**	0.661**	0.755**	0.502**	0.738**	-0.738**	-0.535**
L						0.707**	0.927**	0.786**	0.704**	0.591**	0.660**	-0.705**	-0.692**
SS							0.806**	0.817**	0.667**	0.365	0.707**	-0.643**	-0.833**
V_c								0.797**	0.680**	0.387*	0.736**	-0.734**	-0.710**
P_n									0.669**	0.591**	0.711**	-0.698**	-0.845**
G_s										0.645**	0.700**	-0.707**	-0.582**
C_i											0.524**	-0.559**	-0.521**
T_r												-0.758**	-0.655**
RK													0.797**

PH: 株高, SD: 茎粗, LA: 叶面积, Y: 产量, L: 番茄红素, SS: 可溶性糖, PK: 根结数, NN: 线虫数。“*”表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$), “**”表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)。

PH: Plant height, SD: Stem diameter, LA: Leaf area, Y: Yield, L: Lycopene, SS: Soluble sugar, RK: Number of root-knot, NN: Number of nematodes. “*” indicates significant correlation at $P < 0.05$ level, “**” indicates extremely significant correlation at $P < 0.01$ level.

单果重、单果直径、品质指标（番茄红素、可溶性糖、 V_c ）、根结数、线虫数、虫卵数、株高、SPAD 值、 T_r 和根重的影响达到极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) 水平；同时，施氮肥和施生物炭二者的互作效应除对株高、 G_s 、 T_r 、SPAD 值和根重无显著影响外，对其他指标的影响达到极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) 水平。说明施氮肥和生物炭对番茄生长、产量品质、光合特性及根结线虫数量均有不同程度的影响。

2.6 番茄生长、产量、品质、光合特性及根结线虫指标相关性分析

不同氮肥和生物炭量处理下番茄株高与根结数呈极显著负相关，与线虫数呈显著负相关，与茎粗、SPAD 值、产量、 G_s 、 C_i 和 T_r 呈极显著正相关，与番茄红素、可溶性糖、 V_c 和 P_n 呈显著正相关（表 6）。茎粗与番茄根结数、线虫数呈极显著负相关，与可溶性糖、 P_n 、 T_r 呈极显著正相关，与番茄红素、 V_c 、 G_s 呈显著正相关。叶面积与根结数、线虫数呈极显著负相关，与 SPAD 值、产量、番茄红素、可溶性糖、 V_c 、 P_n 、 G_s 、 T_r 呈极显著正相关，与 C_i 呈显著正相关。SPAD 值和根结数呈极显著负相关，与线虫数呈显著负相关，与产量、番茄红素、可溶性糖、 V_c 、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 呈极显著正相关。产量与根结数、线虫数呈极显著负相关，与番茄红素、可溶性糖、 V_c 、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 呈极显著正相关。番茄红素与根结数、线虫

数呈极显著负相关，与可溶性糖、 V_c 、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 呈极显著正相关。可溶性糖与根结数、线虫数呈极显著负相关，与 V_c 、 P_n 、 G_s 、 T_r 呈极显著正相关。 V_c 与根结数、线虫数呈极显著负相关，与 P_n 、 G_s 、 T_r 呈极显著正相关，与 C_i 呈显著正相关。 P_n 与根结数、线虫数呈极显著负相关，与 G_s 、 C_i 、 T_r 呈极显著正相关。 G_s 与根结数、线虫数呈极显著负相关，与 C_i 、 T_r 呈极显著正相关。 C_i 与根结数、线虫数呈极显著负相关，与 T_r 呈极显著正相关。 P_n 与根结数、线虫数呈极显著负相关。根结数与线虫数呈极显著正相关。以上说明适宜的施氮量和生物炭量提高了番茄株高、茎粗、SPAD 值、产量、品质和光合性能，抑制了根结线虫侵染。

3 讨论

3.1 氮肥和生物炭配施对番茄生长、产量和品质的影响

氮是花生植株生长所需的主要营养元素之一，在植物生长发育中起着重要作用，合理施用氮肥在一定程度上不仅能够促进番茄植株生长发育，提高产量和品质，还能增加番茄植株干物质和氮素积累^[11,23]。本研究结果表明，氮肥和生物炭对番茄株高、茎粗和叶面积的影响均达到了极显著 ($P < 0.01$) 或显著水平 ($P < 0.05$)。随着氮肥用量和生物炭用量的增加，番茄株高、茎粗和叶面积均呈先升高再降低的趋势，所有处理均高于对照，且 N2C3 处理下达到最高，N2C3 处理株高、茎粗和叶面积较 NIC1 处理分别提高 33.06%、36.05% 和 62.90%。研究^[24-25]表明，随着氮肥施用量的增加，植株株高和茎粗呈先增大后减小的趋势，施氮肥处理的茎粗与不施氮肥处理存在显著差异。此结果与本试验株高、茎粗变化规律基本一致，其原因可能是生物炭具有提高土壤孔隙度、比表面积大等特点，能够促进根系发育，吸附固持土壤水分和养分，提高微生物的种群和数量，改善土壤环境^[26-27]。氮肥和生物炭在提高番茄产量和品质方面也发挥重要作用。本试验表明，氮肥和生物炭处理提高了番茄产量、单果重、单果直径、番茄红素、可溶性糖和 V_c 含量，但随着氮肥和生物炭用量的增加，上述指标出现逐渐降低

的现象。此结果与前人^[18]研究结果基本一致。这主要是因为氮肥和生物炭施用促进了植株的营养生长，增加番茄叶绿素含量和叶面积，提高了光合作用，进而促进了光合产物向果实的运输，增加了果实数量和单果重，提高了产量。高氮肥和生物炭施用量对番茄品质有降低作用，可能是由于高生物炭施入量抑制土壤改良的效果，进而影响了果实品质^[28]。因此，合理的氮肥和生物炭用量是番茄获得高产和好品质的关键。

3.2 氮肥和生物炭配施对番茄光合特性的影响

光合作用可将无机物转化为有机物可供植株吸收利用，为各项生命活动提供必要的物质基础，叶绿素含量和光合特性是衡量光合强弱的重要指标^[29]。本研究结果表明，施氮肥和生物炭不仅提高了番茄叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r ，同时提高了番茄生育期 SPAD 值。番茄 N2C3 处理叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 和 SPAD 值较 NIC1 处理分别提高 93.46%、76.32%、56.86%、84.11% 和 45.51%。此结果可能是合理的土壤养分供应改善了番茄叶片的生理特性，促使水、肥、气、热等资源高效利用，从而提高叶片叶绿素含量和光合作用^[30]，但是当氮肥和生物炭施用达到临界点后开始下降，这与张艳玲等^[31]研究结果相一致。其原因是过量施氮时 G_s 会达到阈值，导致 C_i 和 P_n 出现差异，引起叶片内外 CO_2 交换出现异常，使 C_i 增加，光合速率下降^[32]。

3.3 氮肥和生物炭配施对番茄根结线虫防效的影响

合理的氮肥和生物炭用量是影响番茄根结线虫数量的重要因素。本研究结果表明，随着氮肥和生物炭用量增加，番茄根重呈先升再降的趋势，番茄根结数、根结线虫数和虫卵数呈现先降再升的趋势，N2C3 处理根结数、根结线虫数和虫卵数较 NIC1 处理分别降低 26.57%、24.61%、32.66%。此结果与前人^[13-14]研究结果相似，研究^[13-14]表明长期施用氮肥增加了土壤线虫总数，减氮处理比传统施氮处理，根结线虫数量降低。陈威等^[33]研究表明，随着生物炭用量的提高，根结线虫侵染作物根系的能力被抑制，根系根结数随施用量增加而减少。但不同生物炭用量对根结线虫侵染能力的影响在文献报道中存在差异，牛亚茹等^[34]研

究表明,在设施黄瓜大棚内施用不同用量的生物炭,发现随着生物炭用量的增加,根结线虫侵染黄瓜根系的能力被促进,根系根结数量显著提高,可能是根系体积的增大,特别是须根增多,从而增加了根结线虫的侵染位点。生物质炭对根结线虫病的影响可能会因作物种类、生物质炭种类、施用剂量、土壤类型的不同而存在差异,而生物质炭与土壤的相互作用以及生物质炭对植物的促根效应也会随着施炭时间的推移而发生改变。

4 结论

综上所述,在甘肃省河西地区已感染根结线虫病害的设施土壤(全氮 1.52 g/kg,有效磷 191.9 mg/kg,速效钾 323 mg/kg)中,设施番茄氮肥的施用量为 200 mg N/kg 土,生物炭的施用量为 4 g/kg 土,此条件下不仅可以促进番茄生长,提高光合特性,提升产量和品质,同时也会降低根结线虫数量。

参考文献

- [1] Chen Y, Huang B, Hu W, et al. Environmental assessment of closed greenhouse vegetable production system in Nanjing, China. *Journal of Soils & Sediments*, 2013, 13(8): 1418-1429.
- [2] Guo H J, Liu J X, Zhang Y, et al. Significant acidification in major chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] 吕昊峰,王亚芳,李国元,等.施氮量和土壤灭菌对根结线虫侵染番茄根系的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2450-2455.
- [4] 田永强,王敬国,高丽红.设施菜田土壤微生物学障碍研究进展. *中国蔬菜*, 2013(20): 1-9.
- [5] 吴超群,杨泽茂,吴才君,等.设施蔬菜根结线虫危害及其防控机制研究进展. *北方园艺*, 2018(11): 164-172.
- [6] 余海英,李廷轩,张锡洲.温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征. *中国农业科学*, 2010, 43(3): 514-522.
- [7] Min J, Zhao X, Shi W, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern china. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464-472.
- [8] He F, Chen Q, Jiang R, et al. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in northern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(1): 1-14.
- [9] 沙海宁,孙权,李建设,等.不同施氮量对设施番茄生长与产量的影响及最佳用量. *西北农业学报*, 2010, 19(3): 104-108.
- [10] 韩雪,曲梅,李银坤,等.不同施肥水平对温室番茄生长、氮吸收及产量品质的影响. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 162-169.
- [11] 赵耀东,张传忠.氮肥减量施加生物炭对花生幼苗生理特性及根系生长的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(22): 100-106.
- [12] Hu C, Qi Y. Effect of compost and chemical fertilizer on soil nematode community in a Chinese maize field. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(3/4): 230-236.
- [13] Ruan W B, Sang Y, Chen Q, et al. The response of soil nematode community to nitrogen, water, and grazing history in the Inner Mongolian steppe, China. *Ecosystems*, 2012, 15(7): 1121-1133.
- [14] 姜翼来,李慧,姜勇,等.设施菜地长期施肥对土壤线虫群落结构和多样性的影响. *土壤通报*, 2013, 44(1): 106-109.
- [15] 严陶韬,高婷,周之栋,等.基于文献计量的生物炭土壤效应分析. *江苏农业科学*, 2021, 49(4): 191-199.
- [16] 唐政,邱建军,邹国元,等.有机种植条件下水肥管理对氮素淋洗和氮素平衡的影响研究. *中国土壤与肥料*, 2010(1): 19-24.
- [17] 张瑞花,兰超杰,刘雯,等.生物炭对反季节露地樱桃番茄生长及产量品质的影响. *分子植物育种*, 2019, 17(14): 4831-4839.
- [18] 刘国玲,王宏伟,蒋健,等.生物炭对郑单 958 生理生化指标及产量的影响. *玉米科学*, 2016, 24(4): 105-109.
- [19] Xiao K Z, Qi L, Wen J L, et al. Soil ematode response to biochar addition in a Chinese wheat field. *Pedosphere*, 2013, 23(1): 98-103.
- [20] 闫芳芳,曾庆宾,官宇,等.猪屎豆与淡紫拟青霉联合防治烟草根结线虫病的效果评价. *中国农学通报*, 2018, 34(9): 136-140.
- [21] 翟鹏飞,李受鹏,覃丽霞,等.秸秆与生物炭配施对樱桃番茄生长及产量品质的影响. *分子植物育种*, 2022, 20(21): 7216-7223.
- [22] 张寅寅,黑多尔,刘玥婷,等.荷兰进境百合种球中线虫的分离及分子鉴定. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2805-2809.
- [23] 陈康.密度和氮肥互作对单粒精播花生 SPAD 值、植株和产量性状的影响. *中国油料作物学报*, 2021, 43(6): 1070-1076.
- [24] 曾博玲,孙权,刘喆,等.不同施氮量对樱桃番茄生长、品质和氮素积累量的影响. *江苏农业科学*, 2024, 52(1): 148-54.
- [25] 景博,牛宁,张文龙,等.不同施氮量对加工番茄生长及土壤氮素平衡的影响. *新疆农业科学*, 2020, 57(10): 1830-1838.
- [26] Steiner C, Teixeira G W, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 275-290.
- [27] 李欣雨,张川,闫浩芳,等.生物炭和灌水量对土壤保水性及温室番茄生理特性的影响. *排灌机械工程学学报*, 2022, 40(3): 317-324.
- [28] 魏彬萌,王益权,李忠徽.烟杆生物炭对砒砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 217-222.
- [29] 张树衡,丁德东,何静,等.两种生物肥料配施对再植花椒生长及光合特性的影响. *西北农业学报*, 2021, 30(9): 1355-1364.
- [30] 郑剑超,张巨松,闫曼曼,等.氮肥追施模式对遮阴下棉花光合效率及产量的影响. *干旱区研究*, 2016, 33(5): 1036-1042.
- [31] 张艳玲,宋述尧.氮素营养对番茄生长发育及产量的影响. *北方园艺*, 2008(2): 25-26.
- [32] 张凯,张勃,王润元,等.CO₂浓度升高对半干旱区春小麦光合作用及水分生理生态特性的影响. *生态环境学报*, 2021, 30(2): 223-232.
- [33] 陈威,胡学玉,张阳阳,等.番茄根区土壤线虫群落变化对生物炭输入的响应. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 998-1003.
- [34] 牛亚茹,付祥峰,邱良祝,等.施用生物质炭对大棚土壤特性、黄瓜品质和根结线虫病的影响. *土壤*, 2017, 49(1): 57-62.

Effects of Nitrogen Fertilizer and Biochar Application Rate Interaction on Growth and Root-Knot Nematode Disease of Greenhouse Tomatoes

Zhou Qi, Wu Fang, Wang Zhenlong, Xu Zhipeng, Deng Chaochao,
Shi Zhiguo, Zhang Jing, Su Cuicui, Yu Yalin, Zhou Yanfang

(Gansu Academy of Agri-Engineering Technology, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract To explore the effects of combined application of nitrogen fertilizer and biochar interaction on tomato growth and root-knot nematode disease, a suitable nitrogen fertilizer application rates and biochar application rates were screened. A two-factor three-level randomized block pot experiment design was adopted to study three nitrogen application rates (N1: 0 mg/kg soil, N2: 200 mg/kg soil, N3: 400 mg/kg soil) and three biochar application rates (C1: 0 g/kg soil, C2: 2 g/kg soil, C3: 4 g/kg soil) were used this study. The effects of different treatments on tomato growth, yield, quality, photosynthetic characteristics and root-knot nematode indicators were analyzed under different combinations of treatments. The results showed that the effects of nitrogen fertilizer, biochar and their interaction on tomato growth, yield and quality, photosynthetic characteristics and root-knot nematode indicators all reached extremely significant ($P < 0.01$) or significant ($P < 0.05$) level. With the increase of nitrogen fertilizer and biochar application, the growth, photosynthetic characteristics, yield and quality of tomatoes were showed a trend of firstly increased and then decreased. The number of root nodules, root-knot nematodes and eggs were showed a trend of firstly decreased and then increased, reached the lowest value under the N2C3 treatment combination; The leaf area, net photosynthetic rate, yield and vitamin C of the N2C3 treatment combination were reached significant than other treatment combinations. The number of root-knot nematodes and eggs were significantly lower than other treatment combinations. Therefore, in the facility soil (total nitrogen 1.52 g/kg, available phosphorus 191.9 mg/kg, and available potassium 323 mg/kg) infected with root-knot nematode disease in the Hexi area of Gansu province, the condition of 200 mg/kg nitrogen fertilizer of soil and 4 g/kg biochar of soil was conducive to tomato growth and quality, and had a good control effect on root-knot nematode disease.

Key words Tomato; Biochar; Yield; Quality; Photosynthetic characteristics; Root-knot nematode