

纳米碳对草莓氮素吸收利用及植株生长的影响

王国栋, 肖元松, 彭福田, 张亚飞, 郜怀峰, 孙希武, 贺月

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 以盆栽妙香 7 号草莓为试材, 利用¹⁵N 同位素示踪技术探究尿素配施 0, 2, 4, 6, 8 mL 纳米碳溶胶 (CK、T1、T2、T3) 对土壤理化性状、植株氮素吸收利用及生长发育的影响。结果表明: 施用纳米碳显著提高了土壤氧化还原电位和土壤脲酶活性; 随纳米碳用量的增加处理前期土壤的电导率呈现降低趋势后期呈现增大的趋势。纳米碳的施用促进了草莓植株对氮素的吸收利用, 提高了草莓各器官的 Ndff 值; 与对照相比, T1、T2、T3 处理草莓植株的氮素利用率分别提高了 71.2%, 126.8%, 98.9%, 土壤氮素残留率分别提高了 8.2%, 16.7%, 16.1%, 显著减少了氮素的损失。纳米碳的施用不同程度提高了植株叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素 SPAD 值, 干物质比对照增加了 17.5%, 45.8%, 32.3%。研究表明, 尿素配施纳米碳可改善土壤理化性状, 有效吸附土壤中的氮素, 提高植株氮素利用率和土壤氮素残留率, 减少氮素损失, 促进了草莓植株的生长。

关键词: 纳米碳; 草莓; ¹⁵N; 氮素利用率; 氮素损失

中图分类号: S668.4; TB383

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0335-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.052

Effects of Nano-carbon on Nitrogen Absorption, Utilization and Plant Growth of Strawberry

WANG Guodong, XIAO Yuansong, PENG Futian,

ZHANG Yafei, GAO Huaifeng, SUN Xiwu, HE Yue

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Potted Miaoxiang 7 strawberry was selected and ¹⁵N isotope tracer technology was used to investigate the effects of urea combined with 0, 2, 4 and 8 mL nano-carbon sol (CK, T1, T2 and, T3), on soil physiochemical properties, plant nitrogen uptake and utilization, and plant growth. The results showed that the application of nano-carbon significantly increased the soil redox potential and soil urease activity, and with the increasing of nano-carbon amount used, soil electrical conductivity showed a downward trend at the early stage and showed an increase trend at the later stage. The application of nano-carbon promoted the absorption and utilization of nitrogen in strawberry plants, increased Ndff value of each organ of strawberry. Compared with the CK, the nitrogen utilization efficiency of strawberry plants in T1, T2 and T3 increased by 71.2%, 126.8% and 98.9%, and the soil nitrogen residue rate increased by 8.2%, 16.7% and 16.1%, respectively, reduced nitrogen loss significantly. The application of nano-carbon increased the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and the chlorophyll SPAD values of plant leaves in different degrees. Compared with the CK, dry matter of leaves in T1, T2 and T3 increased by 17.5%, 45.8%, and 32.3%, respectively. The study showed that the application of urea with nano-carbon could improve soil physical and chemical properties, adsorb nitrogen in soil effectively, increase plant nitrogen utilization rate and soil nitrogen residual rate, reduce nitrogen loss, and promote the growth of strawberry plants.

Keywords: nano-carbon; strawberry; ¹⁵N; nitrogen utilization rate; nitrogen loss

收稿日期: 2018-05-21

资助项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-30-2-02); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BC017); 山东省“双一流”建设奖补资金项目(SYL2017YSTD10); 山东省教育厅省高等学校科技计划项目(J16LF54)

第一作者: 王国栋(1993—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事果树矿质营养研究。E-mail: 18706388358@163.com

通信作者: 彭福田(1969—), 男, 山东莒南人, 博士, 教授, 主要从事果树矿质营养研究。E-mail: pft@sdau.edu.cn

肖元松(1986—), 男, 山东平原人, 博士, 讲师, 主要从事果树矿质营养研究。E-mail: ysxiao@sdau.edu.cn

氮肥的合理施用是提高果树产量与品质的主要技术措施之一。施用氮肥不仅能提高叶片叶绿素含量,改善光合性能,达到“以氮增碳”的效果,还能增强果实库活性,延长果实发育期,从而影响果实产量与品质^[1-2]。草莓是一种宿根性的多年生草本植物,在实际生产中,草莓种植者片面追求产量,大量施用肥料,尤其是氮肥投入量过高。但土壤保肥保水能力差,加之氮肥的过量使用,造成养分利用率低、资源浪费、农业投入成本增加等问题,严重影响草莓果实的品质,不利于草莓安全高效可持续发展^[3]。因此,如何提高氮肥肥效,减少氮肥用量是目前草莓生产中亟需解决的问题。

纳米材料具有小尺寸效应、量子尺寸效应和表面界面效应等许多传统材料不具备的特性^[4],目前已在不少工业领域得到广泛应用。近年来,很多学者将纳米材料应用到农业领域,探究纳米碳材料对作物生长、产量和品质等方面的影响逐渐成为新的研究热点^[5-6]。已有研究^[7]表明,纳米材料能够调节植物基因表达,刺激种子萌发和根系生长。Giraldo 等^[8]研究发现,单壁碳纳米管经植物的被动运输过程嵌入到叶绿体后,可以提高植物叶绿体的电子转移速率和光合作用活性。此外,纳米材料能够调节植物体内多种酶的活性,改善植物光合性能,提高作物产量^[9]。Khodakovskaya 等^[10]研究发现,多壁碳纳米管能够诱导烟草的水分运输基因、细胞分裂基因和细胞壁形成基因等基因的表达上调,从而促进作物种子萌发和植株的生长。

然而,关于纳米碳材料能否对多年生草本作物草莓的生长发育起调控作用,对氮素的吸收利用情况及植株生长发育影响的研究未见报道。为此,本试验通过向盆栽草莓苗中施用不同用量的纳米碳溶胶配施相同质量尿素,运用同位素示踪技术探究纳米碳对土壤理化性状、草莓氮素吸收利用及植株生长发育的影响,挖掘纳米碳在农业生产中的潜力,为明确纳米碳是否能对草莓生产起促进作用及筛选出纳米碳与尿素的最佳配比,以期为草莓栽培过程中施用纳米碳材料提供新的思路和有益的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验以草莓妙香 7 号匍匐茎苗为试材,于 2017 年在山东农业大学园艺试验站进行。本试验中所用的纳米碳溶胶由北京奈艾斯新材料有限公司提供,纳米碳为圆球状,粒径为 20~50 nm,pH 6.80,比表面积 > 460 m²/g,导电性 > 15 S/cm,用水分散剂 TNWDIS 连续超声 30 min 后离心制得,浓度为 0.3%。盆栽用土为棕壤土,采自山东农业大学园艺试验站 0—

20 cm 表层园土,自然风干后去除植物残体和石块,过筛后使用。供试土壤基本理化性状为:pH 6.93,碱解氮 45.48 mg/kg,全氮 0.87 g/kg,有机质 13.24 g/kg,速效磷 47.43 mg/kg,速效钾 72.14 mg/kg。选取生长势基本一致,无病虫害的草莓匍匐茎苗 40 株,进行花盆栽植(1 株/盆),花盆规格为:直径 30 cm,高 25 cm,每盆装土 14 kg。试验于 2017 年 4 月 12 日(缓苗后 20 天)进行相同质量尿素配施不同体积纳米碳处理,设 4 个处理,分别为:CK(2.2 g 尿素),T1(2.2 g 尿素+纳米碳 2 mL)、T2(2.2 g 尿素+纳米碳 4 mL)、T3(2.2 g 尿素+纳米碳 8 mL)和未施磷钾肥,单株为 1 次重复,每处理重复 10 次。其中每株均匀施入¹⁵N-尿素(上海化工研究院生产,丰度 10.16%)0.2 g,将其溶于 1 L 水中,混合纳米碳均匀浇施入盆内。

1.2 测定方法

1.2.1 叶片叶绿素、光合水平测定 于 4 月 22 日、5 月 12 日、6 月 2 日 3 个时期,选取方位、生长发育时间一致的功能叶片进行标记,每株草莓标记 3 片叶,测定叶绿素相对含量(SPAD-502 叶绿素计测定,日本);于 5 月 2 日(天气晴朗的上午)测定叶片净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度。

1.2.2 土壤 pH、氧化还原电位、电导率测定 于 5 月 5 日、6 月 5 日采用电位法测定盆土 pH^[11]、于 5 月 16 日采用铂电极直接测定法测定土壤氧化还原电位^[11]、于 5 月 1 日、5 月 16 日、6 月 2 日采用电导法测定土壤电导率^[11]。于施肥后 28,58 天采取盆土混合土样,用苯酚钠比色法测定土壤脲酶活性^[12]。每处理 3 次重复,结果取其平均值。

1.2.3 植株解析样品测定 于 2017 年 6 月 9 日,破坏性整株取样,用清水将植株从土壤中完整冲洗出来,整株解析分为根、茎、叶 3 部分。样品按清水→洗涤剂→清水→0.1% 盐酸→3 次去离子水顺序冲洗后,105 ℃下杀青 30 min,随后在 80 ℃下烘干至恒重,电磨粉碎后过 80 目筛,混匀后装袋备用。同时用土钻采用四分法采集土样,自然风干后过 0.25 mm 筛备用。植株样品全氮用凯氏定氮法测定^[11]。¹⁵N 丰度由中国农业科学院原子能所用 MAT-251 质谱计测定。每处理 3 次重复,结果取其平均值。

1.3 数据处理与统计分析

计算公式为:

$$\text{Ndff}(\%) = (\text{植物样品中}^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) / (\text{肥料}^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) \times 100\%$$

$$\text{氮肥利用率}(\%) = (\text{Ndff} \times \text{器官全氮量}(\text{g})) / \text{施肥量}(\text{g}) \times 100\%$$

氮肥分配率(%) = 各器官从氮肥中吸收的¹⁵N 量(g) / 总吸收¹⁵N 量(g) × 100 %

土层氮肥残留率(%) = 土壤¹⁵N 残留量(g) / ¹⁵N 施用量(g) × 100 %

氮肥表观损失率(%) = 1 - ¹⁵N 利用率(%) - ¹⁵N 残留率(%)

运用 Excel 2010 软件进行数据处理,采用 SPSS 20.0软件单因素试验统计分析方法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同纳米碳施用量对盆土理化性状及土壤脲酶活性的影响

2.1.1 不同纳米碳施用量对盆土理化性状的影响

由表 1 可知,施用纳米碳处理土壤的 pH 变化幅度

较小,各处理间数值相对稳定。纳米碳的施加对土壤电导率影响显著,且随草莓植株的生长发育及施肥时间的延长发生显著变化。分析结果表明,至 5 月 1 日,各处理随纳米碳施用量的增加土壤电导率呈降低趋势且差异显著($P<0.05$ 。下同),以对照处理的土壤电导率最高,为 268 μS/cm,比 T1、T2、T3 处理提高了 7.2%,22.9%,37.4%;此后,土壤电导率随纳米碳用量的增加而增大,以 T3 处理的土壤电导率最高,至 6 月 2 日,T1、T2、T3 处理比对照提高了 15.0%,31.8%,44.9%,差异显著。土壤氧化还原电位反映了土壤溶液中养分的氧化还原状况,施用纳米碳显著提高了土壤氧化还原电位,表现为 T3>T2>T1>CK。

表 1 不同纳米碳用量对盆土 pH、电导率及氧化还原电位的影响

处理	pH		电导率/(μS·cm ⁻¹)			氧化还原 电位/mV
	5 月 5 日	6 月 5 日	5 月 1 日	5 月 16 日	6 月 2 日	
CK	6.80±0.03c	6.77±0.06c	268±9a	148±4d	107±2d	162.1±2.9c
T1	6.81±0.02c	6.83±0.01bc	250±2b	163±2c	123±7c	170.6±3.7b
T2	6.86±0.02b	6.90±0.11ab	218±9c	167±5b	141±2b	172.0±3.5b
T3	6.90±0.02a	6.96±0.03a	195±2d	174±3a	155±4a	197.6±6.2a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。下同。

2.1.2 不同纳米碳施用量对土壤脲酶活性的影响

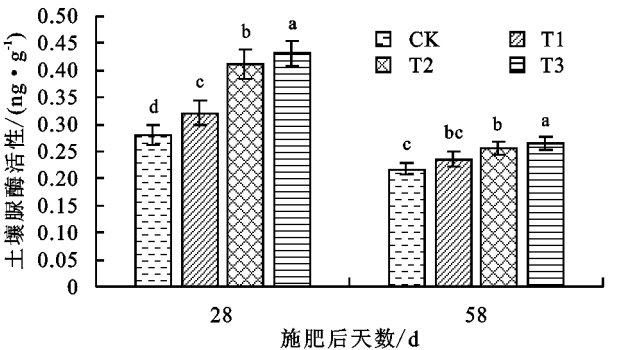
土壤脲酶是决定土壤中氮素转化的关键酶,土壤脲酶活性可以表征土壤的氮素吸收状况^[13]。由图 1 可知,处理 28 天后的土壤脲酶活性高于处理 58 天后的脲酶活性。与对照相比,施入 28,58 天后,T1、T2、T3 处理土壤脲酶活性分别提高了 14.6%,46.8%,54.3%和 8.8%,15.6%,22.6%,差异显著。由于土壤脲酶活性与氮素的吸收利用有关,这可能是纳米碳促进作物氮素吸收的原因之一。施用纳米碳有利于土壤微生物活动,影响了土壤的理化性质,给草莓根系的生长提供了良好的土壤环境。

2.2 不同纳米碳施用量对草莓氮素吸收利用的影响

2.2.1 不同纳米碳施用量对草莓各器官的 Ndff 值及¹⁵N 分配率的影响

器官的 Ndff 是指植株器官从¹⁵N 肥料中吸收分配到的¹⁵N 量对该器官全氮量的贡献率,反映了植株器官对¹⁵N 肥料的吸收征调能力^[14]。由表 2

可知,施用纳米碳后草莓各器官的 Ndff 明显高于对照,差异显著,其中,根系和叶片的 Ndff 值以 T3 处理最大为 2.34%和 2.84%,茎中以 T2 处理的 Ndff 最大为 2.60%,分别比对照提高了 75.94%,29.10%,34.02%。分析结果表明,施用纳米碳显著提高了草莓各器官对氮素的吸收转运,促进了各器官对氮素的征调。



注:不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。下同。

图 1 不同纳米碳用量对土壤脲酶活性的影响

表 2 不同纳米碳用量对草莓各器官 Ndff 值及氮素分配率的影响

处理	Ndff/%			氮素分配率/%		
	根系	茎	叶片	根系	茎	叶片
CK	1.33±0.03c	1.94±0.05c	2.20±0.04b	23.11±1.02b	14.74±1.01a	62.15±0.30a
T1	2.20±0.06b	2.35±0.05b	2.73±0.05a	25.70±1.59b	11.23±0.95b	63.07±1.24a
T2	2.31±0.03a	2.60±0.03a	2.80±0.08a	34.01±0.83a	12.09±0.86b	53.90±1.44b
T3	2.34±0.06a	2.51±0.09a	2.84±0.08a	32.74±2.56a	12.75±0.97b	54.51±1.63b

各器官中¹⁵N 的量占全株¹⁵N 总量的百分率反映了肥料氮在植物体内的分布及在各器官迁移的规

律^[15]。由表 2 可知,不同用量的纳米碳处理,植株各器官的¹⁵N 分配率不同。草莓根系¹⁵N 分配率随纳米碳施用量的增多有先升高后下降趋势,以 T2 处理最大为 34.0%,分别为 CK、T1、T3 的 1.47,1.32,1.04 倍;草莓茎的¹⁵N 分配率以 CK 处理最大为 14.7%,与各施纳米碳处理有显著差异;草莓叶片的¹⁵N 分配率以 T1 处理最大为 63.1%,趋势为 T1>CK>T3>T2。结果表明,草莓施用纳米碳后,氮素优先分配到根系,然后再向地上部(根和茎)转移,最终氮素主要在叶片中分配。纳米碳将尿素有效吸附,持续缓慢释放,高纳米碳施用量的处理对草莓根系生长的促进作用明显,而施用少量的纳米碳有利于促进氮素往草莓叶片中转运。

2.2.2 不同纳米碳施用量对草莓氮素吸收、土壤氮素残留及损失的影响 不同用量的纳米碳处理,草莓植株的¹⁵N 利用率不同。由表 3 可知,纳米碳增强了草莓对氮素的利用能力,与对照相比,T1、T2、T3 处理下草莓植株的氮素利用率分别提高了 71.2%,126.8%,98.9%,差异显著。结果说明纳米碳可以显著提高草莓植株吸收利用氮素的能力,促进氮素在植株内的转运,同时,纳米碳与尿素复配对草莓生长的促进作用存在最佳配比,即 T2 处理。

表 3 不同纳米碳用量对草莓各器官氮素吸收、土壤氮素残留及损失率的影响

处理	植株氮素利用率/%				土壤氮素	氮素
	根系	茎	叶	植株	残留率/%	损失率/%
CK	1.22±0.05d	0.78±0.07c	3.27±0.08c	5.27±0.15d	51.39±2.20c	43.34±2.21a
T1	2.32±0.24c	1.01±0.04b	5.69±0.39b	9.02±0.56c	55.60±0.67b	35.38±1.08b
T2	4.07±0.16a	1.44±0.07a	6.45±0.30a	11.95±0.35a	59.97±0.87a	28.08±0.60c
T3	3.43±0.29b	1.34±0.16a	5.71±0.39b	10.48±0.58b	59.66±1.20a	29.86±1.06c

由表 3 可知,纳米碳的施用显著影响了氮素在土壤中的残留情况,随纳米碳用量增加,土壤氮素残留率提高,T1、T2、T3 处理比 CK 提高了 4.21%,8.58%,8.27%。T2 处理氮素损失率最低,为 28.08%,分别比 CK、T1、T3 处理降低 35.2%,20.6%,6.0%。可见,施用纳米碳有利于草莓植株对氮素的吸收利用,有利于剩余氮素在土壤中保留,减少了氮素的损失,其中以 T2 处理作用效果最显著。

2.3 纳米碳对盆栽草莓生长的影响

2.3.1 不同纳米碳施用量对草莓叶片叶绿素 SPAD 值的影响 叶绿素 SPAD 值在一定程度上反映出植株叶片的氮素营养状况,施用不同浓度的纳米碳与尿素复配液后,草莓叶片叶绿素 SPAD 值在不同时期表现出明显的差异(图 2)。其中,T2 和 T3 处理下草莓叶片一直保持相对较高的叶绿素 SPAD 值,而 CK 和 T1 处理下草莓叶片的叶绿素 SPAD 值随植株生长及施肥时间的延长逐渐降低。在同一施氮水平处理下,4 月 22 日测定结果表明,草莓叶片叶绿素 SPAD 值随纳米碳用量的增加而增加,以 T3 处理的 SPAD 值最高,为 53.3,是 CK 的 1.05,1.03,1.02 倍,各处理间差异显著。5 月 12 日前后,草莓生长旺盛,纳米碳促进了叶片数量的增加,此时以 CK 处理的叶绿素 SPAD 值最高,T3 次之,T2 最低。而 6 月 12 日统计结果表明,施用纳米碳增效尿素的 T1、T2、T3 处理的植株叶绿素 SPAD 值分别比对照增加了 4.1%,11.3%,10.5%,各处理间差异显著。

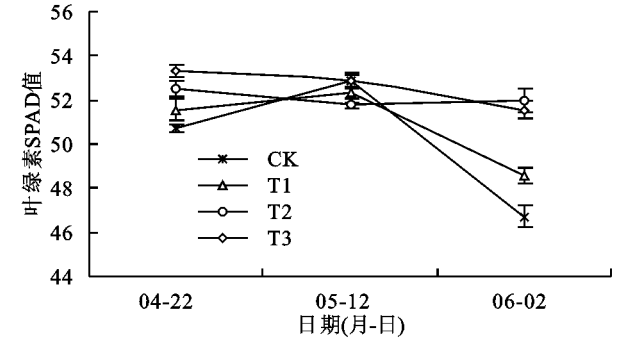


图 2 不同纳米碳用量对草莓叶片叶绿素 SPAD 值的影响

2.3.2 不同纳米碳施用量对草莓叶片光合效率的影响 已有研究^[16]表明,气孔导度与净光合速率和蒸腾速率均呈高度线性关系,气孔导度是控制叶片光合合成和蒸腾水分丢失动态平衡的主要因素。统计分析表明,不同用量的纳米碳对草莓叶片光合水平有不同影响。

由表 4 可知,纳米碳处理均对草莓叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)的影响达到显著水平,其中 P_n 随纳米碳用量的增加先升高后降低,T2 处理最高,为 $19.1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,T3 处理次之,为 $17.6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,CK 最低,为 $13.3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,差异显著。各处理中以 T2 处理的净光合速率、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度最高,分别是对照的 1.44,1.21,1.10 倍,T3 处理的气孔导度最大,是 CK 的 1.36 倍。由上可知,施用纳米碳后草莓叶片的气孔导度显著增大,有利于叶片利用更多的 CO_2 进行光合作用,净光合速率显著提高。

表 4 不同纳米碳用量对草莓叶片光合参数的影响

处理	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
CK	13.3±0.2c	4.2±0.3c	192±3b	127±3d
T1	15.7±0.6b	4.6±0.1abc	198±2b	141±4c
T2	19.1±1.2a	5.1±0.5a	211±8a	162±6b
T3	17.6±1.0a	4.8±0.3ab	194±4b	173±4a

2.3.3 不同纳米碳施用量对草莓各器官生物量的影响 由表 5 可知,盆栽草莓施用纳米碳对草莓干物质积累有显著影响。施用纳米碳明显增加了植株的生物量,T1、T2、T3 处理草莓干物质积累比对照增加了 17.5%,45.8%,32.3%,其中 T2 处理下草莓干物质积累最多,其各器官(根、茎、叶)干物质积累量比 CK 增加了 43.3%,46.0%,48.8%,高施用量的纳米碳对植株生长的促进作用有所减弱;少量的纳米碳对根系的促进作用比对照地上部更明显。试验结果表明,纳米碳能有效促进草莓根系对氮素的吸收利用,有利于根系的生长发育,进而促进地上部茎和叶的分生和生长,叶绿素相对含量和叶片的光合水平显著提高,促进了草莓植株总生物量的累积。

表 5 不同纳米碳用量对草莓生物量的影响

处理	根系干重/ ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	茎干重/ ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	叶片干重/ ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	总生物量/ ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	根冠比
CK	6.89±0.19c	3.26±0.08b	6.06±0.25c	16.21±0.24d	0.58±0.01b
T1	7.33±0.13c	3.50±0.14b	8.23±0.31b	19.05±0.51c	0.62±0.01a
T2	9.87±0.24b	4.76±0.26a	9.02±0.26a	23.64±0.58a	0.58±0.01b
T3	8.83±0.70a	4.57±0.53a	8.04±0.39b	21.44±1.15b	0.59±0.02ab

3 讨论

3.1 纳米碳对土壤理化性状的影响

纳米材料由于自身具有不同于其他宏观离子和微观分子及原子的特殊性质,在土壤结构的形成、营养元素迁移转化、土壤化学生物反应的调控方面具有重要的作用^[17]。李淑敏等^[18]通过设置不同供氮水平且添加纳米碳增效剂,结果表明,添加纳米碳增效肥能明显提高土壤酶活性,改变土壤的理化性质,促进玉米生长。相关研究^[19]表明,纳米碳能够提高土壤持水性,减少水分深层渗漏,可以有效提高土壤吸持溶质的能力。本试验研究表明,与对照相比,在施肥后的较短时间内,各施纳米碳处理土壤电导率呈降低趋势,这是由于纳米碳能有效吸附土壤中养分离子,形成以纳米碳为胶核的新的胶体颗粒进行土壤微团聚体重组,一定程度上束缚了养分的移动,导致土壤电导率降低;之后,随降雨和浇水增多,对照中的养分随水分淋失严重,而纳米碳则将吸附的养分缓慢释

放,土壤中的离子浓度增大,土壤电位差变大,持续的养分供应促进了草莓的生长发育。土壤脲酶活性与土壤微生物数量、氮素的吸收利用、可溶性有机碳含量及氮矿化率等因子密切相关^[13]。施用纳米碳提高了土壤酶活性,有利于土壤微生物活动,给草莓根系的生长提供了良好的环境。植物根系对养分的吸收,涉及复杂的电化学过程,土壤的氧化还原电位是反映土壤氧化还原状况综合性的强度指标^[20],纳米碳可能参与并影响了这一过程。

3.2 纳米碳对草莓植株生长的影响

纳米碳作为一种具有高表面能的小尺度碳纳米材料,在影响作物代谢、促进作物生长发育方面具有良好的效果。纳米碳增效肥施入土壤,有效促进了植株叶片叶绿体内淀粉粒的合成、运输,提高了植物的光和利用效率,并使植物细胞中的线粒体大量增多,增强呼吸作用^[21]。梁太波等^[22]研究发现,普通肥料中加入纳米碳增加了烟株干物质积累量,有利于烟叶产量的提高。本试验研究表明,纳米碳能显著提高草莓叶片叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度,草莓植株各器官干物质的积累显著增加,并且纳米碳对根部生长的促进作用要大于茎和叶,根系生长状况良好进一步促进植株对养分和水分的吸收利用,从而促进整株的生长发育,这与武美燕等^[23]在小麦上的研究结果一致。因此,纳米碳具有促进作物营养吸收和生物合成的双重功效。

植物主要通过根系从土壤中吸收水分和养分,土壤养分供应状况直接影响到植株根系的吸收与生长以及地上部的生长发育^[24]。作物根系分泌物(如小分子有机酸、次生代谢物、醇化物等)以及根际微生物可能会对纳米碳产生修饰作用,改变其理化性质,从而影响到作物对养分的吸收。草莓从萌芽到开花,为大量需氮期,此时稳定的氮素供应,可促进器官分化、形成以及植株生物量的增加。已有研究^[25]表明,植物吸收利用外界营养物质的适宜浓度极低($<1 \mu\text{mol/L}$),因此,作物根系区域的肥料维持在很低的浓度就可以使植物处于最佳的生长状态。本试验研究结果表明,施用纳米碳有利于养分的缓慢、持续、长时间释放,较低

的养分浓度能促进根系的生长。

3.3 纳米碳对草莓植株氮素吸收利用的影响

肖强等^[26]研究表明,纳米级材料胶结包膜型缓/控释肥料能有效的减少硝态氮的淋溶损失。本试验结果表明,纳米碳可有效促进草莓植株对氮素的吸收利用,有利于剩余氮素保留在土壤中减少流失。这可能是由于纳米碳的表面效应和小尺寸效应,能增强对肥料的吸附性能,减少肥料流失、淋失。Serag 等^[27]研究发现,植物拟南芥体内木质素的生物合成过程中,可通过氧化桥联作用将体内的碳纳米管与单体木质素连接起来,从而利用碳纳米管来构建导管,促进植物对各种营养元素的运输。另外,刘安勋等^[28]研究也表明,纳米材料可改变水分子结构和能态,提高其活性,在植物不断吸收水的过程中可携带大量营养元素进入植物体内,达到促进养分吸收的目的。然而,仅从纳米碳的吸附性能角度无法完全解释其促进作物生长和养分吸收的机理。Yuan 等^[29]研究表明,多壁碳纳米管等纳米碳材料能够被植物吸收,通过能谱分析、透射电镜等手段,可以进一步探索碳纳米材料在土壤中的行为和迁移以及被植物吸收后对作物生长发育、基因的遗传表达等影响。另外,纳米碳材料被作物吸收、转移、累积,其安全性有待于进一步研究。

目前报道的研究及应用主要集中在纳米碳的理化性质、结构特性及改良土壤、促进作物吸水吸肥、增产增效等方面^[30],但其对植物的生理作用、分子机制及在植物组织培养中的应用研究较少,需进一步深入探究。

4 结论

尿素配施纳米碳可改善土壤理化性状,有效吸附土壤中的氮素,提高植株氮素利用率和土壤氮素残留率,减少氮素损失率,促进草莓植株生长,各处理中以 T2 处理(2.2 g 尿素配施 4 mL 纳米碳)效果最好。

参考文献:

- [1] 彭福田,姜远茂,顾曼如,等. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003,9(2):208-213.
- [2] 彭福田,张青,姜远茂,等. 不同施氮处理草莓氮素吸收分配及产量差异的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006,12(3):400-405.
- [3] 宋曼曼,夏俭利. 不同氮素水平对草莓生长的影响[J]. 安徽农学通报,2013,19(11):55-58.
- [4] 张中太,林元华,唐子龙,等. 纳米材料及其技术的应用前景[J]. 材料工程,2000(3):42-48.
- [5] 张夫道,赵秉强,张骏,等. 纳米肥料研究进展与前景[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2):254-255.
- [6] Monreal C M, De Rosa M, Mallubhotla S C, et al. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients [J]. Biology & Fertility of Soils, 2016, 52(3): 423-437.
- [7] Alia D S, Castillo-Michel H, Hernandez-Viezcas J A, et al. Synchrotron micro-XRF and micro-XANES confirmation of the uptake and translocation of TiO₂ nanoparticles in cucumber (*cucumis sativus*) plants [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(14): 7637-7643.
- [8] Giraldo J P, Landry M P, Faltermeier S M, et al. Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing [J]. Nature Materials, 2014, 13(4): 400-408.
- [9] Hong F S, Zhou J, Liu C, et al. Effect of nano-TiO₂ on photochemical reaction of chloroplasts of spinach [J]. Biological Trace Element Research, 2005, 105(1/3): 269-279.
- [10] Khodakovskaya M V, Kim B S, Kim J N, et al. Carbon nanotubes as plant growth regulators: Effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community [J]. Small, 2013, 9(1): 115-123.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1983.
- [13] 刘淑英. 不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J]. 水土保持学报,2010,24(1): 219-223.
- [14] 顾曼如. ¹⁵N 在苹果氮素营养研究中的应用[J]. 中国果树,1990(2):46-48.
- [15] 房祥吉,姜远茂,彭福田,等. 不同沙土配比对盆栽平邑甜茶的生长及¹⁵N 吸收、利用和损失的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(4):131-134.
- [16] 杨盛昌,林鹏,中须贺常雄. 5℃夜间低温对红树幼苗光合速率和蒸腾速率的影响[J]. 植物研究,2001,21(4):587-591.
- [17] 胡梓超,周蓓蓓,王全九. 模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(4):1-6,12.
- [18] 李淑敏,韩晓光,张爱媛,等. 不同尿素添加纳米碳增效剂对大豆干物质积累和产量的影响[J]. 东北农业大学学报,2015,46(4):10-16.
- [19] 刘艳丽,周蓓蓓,王全九,等. 纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):21-25.
- [20] 何胜德,林贤青,朱德峰,等. 杂交水稻根际供氧对土壤氧化还原电位和产量的影响[J]. 杂交水稻,2006,21(3):78-80.

- 高光谱测试稳定性影响探讨[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 287-291.
- [21] 王国华, 张虎, 魏岳嵩. 偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J]. 统计与决策, 2017(7): 67-71.
- [22] 汪洪涛. 基于近红外光谱技术预测森林土壤有机碳含量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [23] 杨爱霞, 丁建丽. 新疆艾比湖湿地土壤有机碳含量的光谱测定方法对比[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 162-168.
- [24] 刘翥, 杨玉盛, 朱锦懋, 等. 中亚热带 2 种经济林土壤可溶性有机质数量与光谱学特征比较[J]. 水土保持学报, 2014, 28(05): 170-175.
- [25] 郗晨龙, 卞正富, 杨德军, 等. 鄂尔多斯煤田高强度井工煤矿开采对土壤物理性质的扰动[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1448-1456.
- (上接第 340 页)
- [21] 刘键, 张志明, 马筠. 纳米技术与农业低碳经济 1. 纳米碳增效肥应用研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [22] 梁太波, 尹启生, 张艳玲, 等. 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1429-1435.
- [23] 武美燕, 蒿若超, 田小海, 等. 添加纳米碳缓释肥料对超级杂交稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻, 2010, 25(4): 86-90.
- [24] 肖元松, 彭福田, 房龙, 等. 树盘施肥区域大小对¹⁵N 吸收利用及桃幼树生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 957-964.
- [25] Grierson P F, Adams M A. Plant species affect acid phosphatase, ergo sterol and microbial P in a Jarrah (*Eucalyptus marginata* Donn ex Sm) forest in south-western Australia [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1817-1828.
- [26] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料的特性及对作物氮素利用率与氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 779-785.
- [27] Serag M F, Kaji N, Tokeshi M, et al. The plant cell uses carbon nanotubes to build tracheary elements [J]. Integrative Biology, 2012, 4(2): 127-131.
- [28] 刘安勋, 廖宗文. 纳米材料对水团簇的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15780-15781.
- [29] Yuan Z D, Zhang Z, Wang X, et al. Novel impacts of functionalized multi-walled carbon nanotubes in plants: Promotion of nodulation and nitrogenase activity in the rhizobium-legume system [J]. Nanoscale, 2017, 9(28): 9921-9937.
- [30] 乔俊, 赵建国, 解谦, 等. 纳米炭材料对作物生长影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 162-170.
- (上接第 345 页)
- [12] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97-107.
- [13] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 728-739.
- [14] Köhl L, Lukasiewicz C E, Heijden M G A V D. Establishment and effectiveness of inoculated arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils [J]. Plant Cell and Environment, 2016, 39(1): 136-146.
- [15] 邓胤, 申鸿, 郭涛. 丛枝菌根利用氮素研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5627-5635.
- [16] Monica I F D, Saparrat M C N, Godeas A M, et al. The co-existence between DSE and AMF symbionts affects plant P pools through P mineralization and solubilization processes [J]. Fungal Ecology, 2015, 17: 10-17.
- [17] 贺学礼, 郭辉娟, 王银银. 土壤水分和 AM 真菌对沙打旺根际土壤理化性质的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 508-513, 519.
- [18] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634-642.
- [19] Rillig M C, Ramsey P W, Morris S, et al. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change [J]. Plant and Soil, 2003, 253(2): 293-299.
- [20] Rillig M C, Maestre F T, Lamit L J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1257-1260.