

局部涂抹纳米碳与尿素溶液对桃树梢叶生长及氮素吸收、分配的影响

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7年生的鲁星油桃为试材, 采用 ^{15}N 同位素示踪技术进行田间涂抹试验, 研究不同浓度纳米碳与相同浓度尿素溶液(0 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 50 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 100 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 200 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 分别以CK、NC50、NC100、NC200表示)涂抹部分叶片对桃树局部梢叶生长、氮素吸收及分配的影响, 以期为桃树栽培过程中施用碳纳米提供新的思路和有益的参考。结果表明: 与对照相比, 施用纳米碳后桃树涂抹叶片单叶面积明显增加, 叶绿素含量显著提高, NC200处理下叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度比对照提高了15.8%, 30.0%, 12.4%; 纳米碳的施用提高了桃树新梢的干物质积累量, NC100、NC200处理比对照增加了10.5%和12.9%, 提高了新梢各部位的全氮含量; 高浓度的纳米碳(NC200处理)提高了新生器官对氮素的吸收征调能力(Ndff值); 随纳米碳浓度的增大氮素的利用效率显著提高, NC50、NC100、NC200处理的氮素利用率比对照提高了13.6%, 29.5%, 40.0%; 此外, 新生嫩叶部分以NC200处理的氮素分配率最高, 达19.55%, NC50、NC100、NC200处理氮素分配率比对照提高了4.5%, 16.2%, 17.1%, 差异显著。以上结果表明, 纳米碳能够促进新梢叶片对氮素的吸收利用, 有效提高叶绿素含量、光合作用效率及新梢局部氮素利用率, 影响氮素在梢叶各部位间的分配, 促进氮素向生长中心(新生嫩叶)的转移。

关键词: 桃; 纳米碳; 涂抹; ^{15}N ; 氮素利用率; 氮素分配率

中图分类号: S662.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0294-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.046

Effects of Topical Application of Nano-carbon and Urea Solution on Growth, Nitrogen Absorption and Distribution in Peach Shoots and Leaves

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: Taking seven-year-old Luxing nectarine as test material, and the field smearing test was carried out and the ^{15}N isotope tracing technique was applied to explore the effects of different concentrations of nano-carbon and the same concentration of urea solution (0 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 50 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 100 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, 200 $\mu\text{g/mL}+0.2\%$, expressed as CK, NC50, NC100 and NC200, respectively) on the growth, nitrogen absorption and distribution in the spring main shoots and leaves of peach, in order to provide new ideas and useful references for the application of carbon nanometers in the cultivation of peach trees. The solution was coated with some leaves. The results showed that compared with the control, the leaf area and the chlorophyll content were significantly increased after application of nano-carbon. The net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of the leaves in NC200 treatment increased by 15.8%, 30.0% and 12.4% compared with the control, respectively. The application of nano-carbon promoted the dry matter accumulation of the new peach shoots. The treatments of NC100 and NC200 increased the dry matter accumulation by 10.5% and 12.9%, respectively, compared with the control, and increased the total nitrogen content of the new shoots. High concentration of nano-carbon (NC200 treatment) increased the

收稿日期: 2018-08-16

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)

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

nitrogen uptake ability of new organs (Ndff value). With the increasing of nano-carbon concentration, the nitrogen utilization efficiency increased significantly. The nitrogen utilization rate of NC50, NC100, NC200 treatments increased by 13.6%, 29.5% and 40.0%, respectively, compared with the control. In addition, the nitrogen distribution rate in new leaves of NC200 treatment was the highest, reaching 19.55%, and the nitrogen distribution rate of NC50, NC100 and NC200 treatments were 4.5%, 16.2% and 17.1% higher than that of the control, respectively, and the differences were significantly. The above results indicated that nano-carbon could promote the absorption and utilization of nitrogen in new shoot leaves, effectively improve chlorophyll content, photosynthetic efficiency and local nitrogen utilization rate of new shoots, affect the distribution of nitrogen in different parts of shoots, and promote the transfer of nitrogen to the growth centers (new tender leaves).

Keywords: peach; nano-carbon; topical application; ¹⁵N; nitrogen utilization rate; nitrogen distribution rate

春季果树新梢生长以氮的吸收、运转、合成蛋白质进行器官建造为主, 树体对氮的需求量大, 是果树需氮临界期之一^[1]。相关研究^[2-3]和生产实践表明对果树进行春季叶面施氮, 氮素可以直接通过叶片进入作物体内, 参与有机物质的合成加速新陈代谢, 有效改善叶片的营养状况, 特别是对春季果树新生器官间的养分竞争有明显的缓解作用, 是果树重要的辅助施肥方式。尿素是非极性的中性分子, 分子小, 扩散性强, 吸收速度快, 被认为是叶面施肥中毒性最小、效果最好的氮肥^[4]。在木本果树中, 桃等核果类果树存在的叶片吸收效率较低的问题不如苹果、柑桔等果树的氮素利用效率高。

纳米技术的发现开辟了生物技术和农业生产的新领域, 纳米碳颗粒因具有独特的物理化学性质, 即巨大的表面积、较高的反应性、可调控的孔径及颗粒形态, 近年来, 众多研究人员^[5-9]探究其对土壤结构、水分养分的迁移转化及生化反应的调控等方面发挥的作用, 研究其对农作物生长发育、产量和品质等方面产生的影响。相关研究^[10]表明, 纳米材料能够调控植物体内基因的表达, 刺激光合过程, 促进根系发育。同时, Yuan 等^[11]发现功能化的多壁纳米碳管能够促进豆科作物百脉根(*Lotus corniculatus* L.)的结瘤数量并提高固氮酶活性; Khodakovskaya 等^[12-13]研究发现, 碳纳米管作为植物生长调节剂能被番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)吸收转运并影响生殖器官的形成, 提高产量, 也能诱导烟草植株的水分运输基因、细胞形成基因的表达上调, 从而促进植株生长。此外, 由纳米材料制成的纳米增效肥料在减少肥料流失、提高肥料利用率等方面展现出较好的效果^[14]。

当前, 关于局部涂抹纳米碳与尿素溶液是否能调控桃树梢叶生长、影响桃树对氮素的吸收分配等相关研究未见报道。为此, 本试验通过向多年生大田桃树局部叶片涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液, 运用同位素示踪技术探究纳米碳对桃树新梢氮素吸收分配及叶片生长发育状况的影响, 探究其中的作用机理,

挖掘纳米碳在农业生产中的应用潜力, 以期桃树栽培过程中施用碳纳米提供新的思路和有益的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

本试验于 2017 年 5 月 20 日在山东农业大学园艺试验站桃树栽培示范园内进行。所用纳米碳从北京奈艾斯新材料有限公司购买, 纯度 > 95 wt%, 灰分 < 2.0 wt%, 粒径在 10~40 nm 范围内, pH 6.8, 比表面积 > 200 m²/g, 试验前用将其与分散剂溶于超纯水连续超声 30 min 后离心制得, 可在室温下长期稳定分散, 透射电镜扫描照片及粒径分布情况见图 1。

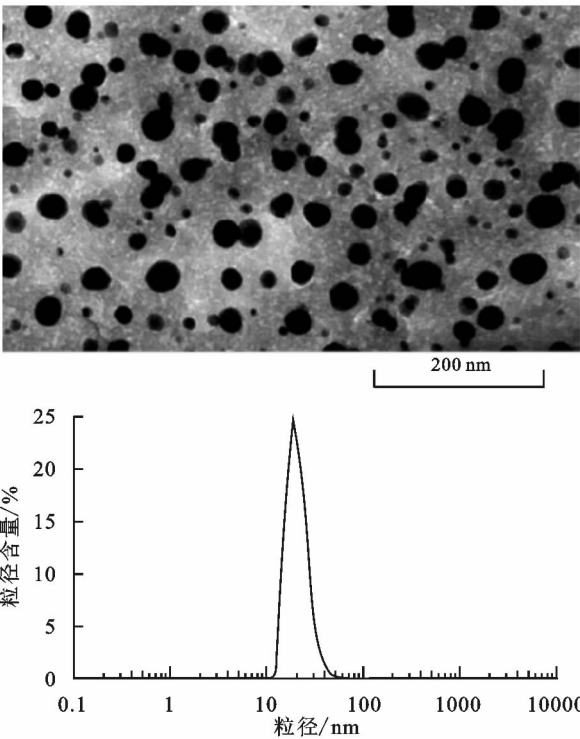
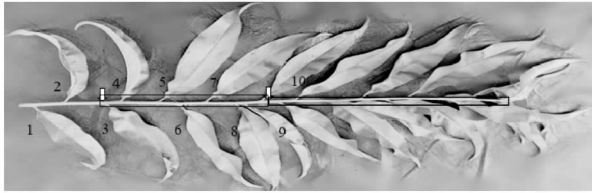


图 1 纳米碳透射电镜扫描照片及粒径分布

试验选用的桃树为大田栽培条件下 7 年生的鲁星油桃(*Prunus persica* var. *nectarina* cv. *Luxing*), 砧木为山毛桃(*Prunus davidiana* (carr) Franch), 起垄栽植, 树势中庸, 株行距为 2.0 m×5.0 m, 各项管理措施均一致。试验选取树冠外围中部、高度在 1.5 m 左右、生长势一

致、见光充分、新梢长度及粗度、叶片数量、叶面积一致、无病虫害桃树新梢,试验前将每条新梢基部的 2 片弱小叶摘除,于 5 月 20 日(晴天)傍晚 16:00 用毛笔涂抹每一新梢从梢顶数第 6 片叶向下的 8 片发育一致的功能叶片的正反两面,涂抹叶片数占整个新梢的 1/2,在从新梢基部数第 1 片与第 8 片涂抹叶片着生梢段处进行标记(图 2),每 4 条新梢为 1 次重复,每组处理有 9 次重复,完全随机区组设计,具体处理为:CK(涂抹 0.2%¹⁵N-尿素溶液),NC50(涂抹 0.2%¹⁵N-尿素+50 μg/mL 纳米碳溶液),NC100(涂抹 0.2%¹⁵N-尿素+100 μg/mL 纳米碳溶液),NC200(涂抹 0.2%¹⁵N-尿素+200 μg/mL 纳米碳溶液),供试¹⁵N-尿素为唯一氮源,由上海化工研究院生产,丰度 10.16%;每涂抹 32 片(1 次重复)桃叶片用 6 mL ¹⁵N-尿素溶液,在叶片涂抹过程中,无液体滴到非处理叶片、新梢和枝干上。



注:图中第 1~2 片叶为主梢基部弱小叶,涂抹前摘除,第 3~10 片叶为涂抹纳米碳与尿素溶液的标记叶片,其余叶片为新生嫩叶;两箭头所示位置为涂抹叶片着生梢段的两端,进行标记,第 3~10 片叶着生的梢段为标记梢段,新生嫩叶着生的梢段为新生嫩梢。

图 2 桃树新梢涂抹处理示意

1.2 测定指标与方法

1.2.1 桃叶片叶面积、叶绿素含量、光合水平测定 试验于处理当天、处理后 3、6 天测定涂抹叶片的单叶面积,于处理后 3、6 天用 95%乙醇提取一分光光度计测定叶片的叶绿素含量^[15];于处理后 6 天(晴天上午 8:30—11:00)使用便携式光合作用测定系统,测定从新梢基部起数第 2、6 片见光一致的涂抹叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s),测定时光强约为 1 400 μmol/(m·s),气温为 30℃,空气中 CO_2 浓度为(360±10) μmol/mol。每个处理 3 次重复,结果取其平均值。

1.2.2 植株样品测定 试验于处理后 14 天进行破坏性取样,将桃树主梢局部解析为涂抹叶片、标记梢段、新生嫩叶及新生嫩梢 4 部分(图 2)。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,在 105℃下杀青 30 min,随后在 80℃下烘干至恒重,用电子天平称量各部分干物质重,然后用不锈钢粉碎机分别粉碎,过 100 目筛后放入封口塑料袋中保存于干燥处备用。样品全氮含量采用凯氏定氮法测定^[15]。¹⁵N 丰度由山东农业大学资源与环境学院用 MAT-251 质谱计测定。每个处理 3 次重复,结

果取其平均值。

1.3 计算公式

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

$$\text{全 N 量(g)} = \text{干物质积累量(g)} \times \text{全氮含量}(\%)$$

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

$$\text{氮肥分配率}(\%) = \text{各器官从氮肥中吸收的}^{15}\text{N 量(g)} / \text{总吸收}^{15}\text{N 量(g)} \times 100\%$$

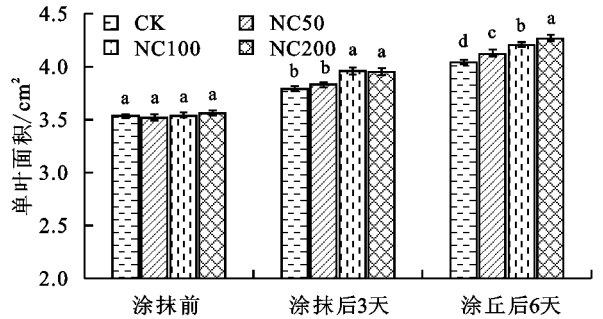
1.4 数据处理与统计分析

试验数据运用 Excel 2010 软件进行数据处理和图表绘制,应用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析及最小显著差异性检验(Duncan's 新复极差法, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 涂抹纳米碳与尿素溶液对桃树叶片生长发育的影响

2.1.1 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树叶片单叶面积的影响 叶片是植物进行光合作用生产干物质的主要器官^[16],桃树涂抹叶片的单叶面积在一定程度上可以反映出叶片涂抹的效果。由图 3 可知,对桃树新梢叶片涂抹纳米碳与尿素混合溶液后的第 3 天,桃单叶面积与涂抹前相比均有明显的增加,NC100、NC200 处理下效果更好;涂抹后第 6 天,NC50、NC100、NC200 处理的桃单叶面积均较对照差异显著且随纳米碳施用浓度的提高而增加,以 NC200 处理效果最好,说明纳米碳的施用促进了桃树叶片对尿素的吸收,有利于叶片的生长,效果显著($P < 0.05$)。



注:图中不同小写字母表示同一时期各处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。

图 3 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树叶片单叶面积的影响

2.1.2 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树涂抹叶片叶绿素含量的影响 氮是叶绿素的基本组成成分,叶绿素含量能够反映出桃树叶片的营养水平,与光合作用关系密切。从表 1 可以看出,涂抹纳米碳与尿素溶液后 3 天,与对照相比,各施用纳米碳处理的桃树叶片的叶绿素 a 和总叶绿素含量均有

显著的提高,且与对照差异显著,除 NC50 处理的叶绿素b 与类胡萝卜素含量与对照相比显著不差异外,其他处理均与对照差异显著;涂抹后 6 天,叶绿素含量增高,各施纳米碳处理均比对照显著提高($P<$

0.05),叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、总叶绿素均以 NC200 处理的含量最高,说明纳米碳的施用能够影响桃叶片对氮素的吸收,显著提高桃树涂抹叶片的叶绿素含量。

表 1 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树叶片叶绿素含量的影响 单位:mg/g

取样时间	处理	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素	叶绿素 a+b
处理后 3 天	CK	2.80±0.10c	1.00±0.04c	0.501±0.012c	3.75±0.09c
	NC50	3.00±0.07b	1.06±0.04bc	0.524±0.012bc	4.05±0.14b
	NC100	3.17±0.07a	1.11±0.03ab	0.547±0.016ab	4.26±0.10a
	NC200	3.20±0.06a	1.17±0.04a	0.563±0.012a	4.37±0.06a
处理后 6 天	CK	3.19±0.07d	1.06±0.03c	0.569±0.015c	4.24±0.12d
	NC50	3.36±0.06c	1.17±0.03b	0.614±0.010b	4.53±0.05c
	NC100	3.54±0.05b	1.25±0.02a	0.638±0.008ab	4.78±0.06b
	NC200	3.72±0.06a	1.27±0.03a	0.660±0.016a	5.00±0.08a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示同一时期各处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

2.1.3 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树涂抹叶片光合水平的影响 树体 90%以上的干物质产生于叶片的光合作用产物,氮素作为植物体最重要的结构物质,能够影响光合作用的多个环节。由表 2 可知,施用纳米碳后提高了桃树新梢涂抹叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s),其中以 NC200 处理效果最好,分别达 $16.9\ \mu\text{mol}(\text{CO}_2)/$

($\text{m}^2\cdot\text{s}$)、 $4.03\ \text{mmol}(\text{H}_2\text{O})/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $154\ \text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,比对照提高了 15.8%,30.0%,12.4%,差异显著($P<0.05$);叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)显著下降,NC50、NC100、NC200 处理下 C_i 分别比对照降低了 12.4%,33.7%,53%,说明纳米碳的施用影响了桃树叶片的氮素吸收,显著提高了新梢涂抹叶片的光合作用水平。

表 2 不同浓度纳米碳对涂抹叶片光合水平的影响

处 理	净光合速率/ ($\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
CK	14.6±0.3c	3.10±0.20c	137±4c	254±11a
NC50	15.3±0.1b	3.61±0.17b	140±4bc	226±7b
NC100	16.4±0.6a	3.92±0.17ab	149±6ab	190±13c
NC200	16.9±0.2a	4.03±0.16a	154±4a	166±11d

2.2 涂抹纳米碳与尿素溶液对桃树局部梢叶氮素吸收分配的影响

2.2.1 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树新梢干物质质量、氮素含量及 Ndff 的影响 由表 3 可知,涂抹不同浓度纳米碳与尿素溶液对桃树新梢各部位的干物质积累量产生了不同的影响,其中,涂抹叶片、新生梢段及新生叶片的干物质质量随纳米碳涂抹浓度的增大而增加,均以 NC200 处理的最多,分别比对照提高了 19.46%,15.74%,16.12%;NC100、NC200 处理下新梢局部新梢的干物质质量比对照增加了 10.5%和 12.9%;而标记梢段对照的干物质质量最多,随纳米碳浓度的增大而减少,NC200 处理比对照降低了 18.68%。说明纳米碳的施用不同程度地影响了桃树梢叶的生长,促进了新梢局部的干物质积累量,尤其对涂抹叶片生长的促进效果最显著($P<0.05$)。由表 3 可知,桃树新梢局部各部分全氮含量总趋势为:新生嫩叶>涂抹叶片>新生嫩梢>标记梢段,叶片的含氮量高于梢段,新生器官高于成熟器官。对桃树新梢部分叶片涂抹不同浓度纳米碳与尿素溶液

后对新梢各部分的含氮量产生了不同的影响,其中涂抹叶片和新生嫩叶的全氮含量以 NC200 处理最高,分别较对照提高了 9.1%,5.6%,新生嫩梢部分各处理间全氮含量相差较小,但与对照相比差异显著($P<0.05$),标记梢段部分以 NC50 处理含氮量最高,说明低浓度的纳米碳(NC50 处理)提高了桃树成熟梢段的全氮含量,高浓度的纳米碳(NC200 处理)显著提高了功能叶片、新生器官(嫩梢及嫩叶)的全氮含量。器官的 Ndff 值是指植株器官从 ^{15}N 肥料中吸收分配到的 ^{15}N 量对该器官全氮量的贡献率,它反映了植株器官对肥料 ^{15}N 的吸收征调能力^[17]。涂抹不同浓度纳米碳对桃树主梢各部分的 Ndff 值产生了不同的影响,其中,涂抹叶片、新生梢段、新生嫩叶部分的 Ndff 值随纳米碳涂抹浓度的增大而增加,均以 NC200 处理最高,分别比对照提高了 6.8%,26.3%,18.4%,差异显著($P<0.05$);而标记梢段部分以对照为最高,随纳米碳浓度的增大先减少后增大,说明纳米碳的施用影响了氮素在桃树新梢及叶片中的移动,高浓度的纳米碳提高了新生器官对氮素的吸收征调能力。

表 3 涂抹不同浓度纳米碳与尿素溶液对桃树主梢氮素吸收利用的影响

涂抹部位	处理	干物质量/g	全氮含量/%	Ndff/%	氮素利用率/%
涂抹叶片	CK	7.04±0.11d	3.20±0.023d	0.443±0.010b	18.27±0.53d
	NC50	7.50±0.15c	3.28±0.046c	0.461±0.007ab	21.07±0.70c
	NC100	8.41±0.19b	3.42±0.008b	0.471±0.020a	24.36±0.90b
	NC200	8.81±0.31a	3.49±0.021a	0.473±0.011a	25.84±0.63a
标记梢段	CK	5.04±0.21a	1.33±0.003b	0.115±0.004a	1.28±0.09a
	NC50	4.86±0.08ab	1.39±0.022a	0.108±0.001ab	1.32±0.05a
	NC100	4.62±0.16bc	1.22±0.012c	0.102±0.011b	1.04±0.09b
	NC200	4.55±0.11c	1.21±0.007c	0.110±0.001ab	1.21±0.02a
新生嫩梢	CK	2.16±0.08b	2.25±0.003c	0.076±0.003c	0.69±0.07b
	NC50	2.26±0.04b	2.26±0.004b	0.088±0.003ab	0.81±0.10bc
	NC100	2.46±0.05a	2.26±0.003b	0.091±0.003a	0.91±0.05ab
	NC200	2.50±0.06a	2.27±0.003a	0.096±0.004a	0.99±0.06a
新生嫩叶	CK	6.14±0.27b	3.93±0.002d	0.098±0.003c	4.28±0.13c
	NC50	6.19±0.25b	3.95±0.003c	0.105±0.002b	4.65±0.11c
	NC100	7.03±0.13a	4.01±0.017b	0.106±0.003b	5.41±0.11b
	NC200	7.13±0.28a	4.15±0.007a	0.116±0.003a	6.25±0.39a
新梢	CK	20.38±0.23b			24.51±0.64d
	NC50	20.82±0.45b			27.85±0.98c
	NC100	22.51±0.45a			31.73±0.74b
	NC200	23.00±0.07a			34.29±0.44a

2.2.2 涂抹不同浓度的纳米碳与尿素溶液对桃树新梢氮素利用率的影响 由表 3 可知,对桃树部分叶片涂抹纳米碳与尿素溶液后,随纳米碳浓度的增大显著提高了桃树新梢局部的氮素利用率,以 NC200 处理为最高,达 34.29%,NC200 处理次之,为 31.73%,对照最低,为 24.51%。NC50、NC100、NC200 处理比对照的氮素利用率提高了 13.6%,29.5%,40.0%,各处理间差异显著($P<0.05$)。说明纳米碳的施用促进了桃树梢叶对涂抹氮素的吸收利用,施用效果显著。

2.2.3 涂抹不同浓度纳米碳与尿素溶液对桃树新梢各部分的¹⁵N 分配率的影响 各器官中¹⁵N 占全株¹⁵N 总量的百分率反映了肥料氮在树体内的分布及在各器官迁移的规律^[18]。由表 4 可知,对桃树叶片涂抹纳米碳与尿素溶液后,新梢各部分间氮素分配的趋势为:涂抹叶片>新生嫩叶>标记梢段>新生嫩梢。叶面施氮后短期内以涂抹叶片中的氮素分配率最高,以对照所占比例最大,达 76.76%;氮素通过涂抹叶片的着生梢段(即标记梢段),逐渐转运到新的生长中心(新生嫩叶),供应其生长发育。标记梢段部分以 NC200 处理的氮素分配率最低,对照最高,差异显著;新生嫩梢部分各处理间差异不显著;新生嫩叶部分则以 NC200 处理的氮素分配率最高,达 19.55%,NC50、NC100、NC200 处理下氮素分配率比对照提高了 4.5%,16.2%,17.1%,差异显著。试验结果表明,对桃树叶片涂抹纳米碳后影响了桃树梢叶对氮素的吸收、迁移,影响了氮素在新梢局部各部分间的分配,高浓度(NC200 处理)的纳米碳促进了氮素向生长中心的运转。

表 4 涂抹不同浓度纳米碳与尿素溶液对桃树新梢各部分的¹⁵N 分配率的影响 单位:%

处理	涂抹叶片	标记梢段	新生嫩梢	新生嫩叶
CK	75.65±0.04a	4.84±0.16a	2.82±0.23a	16.70±0.12c
NC50	74.91±0.26b	4.71±0.03a	2.92±0.24a	17.45±0.10b
NC100	74.12±0.43c	3.59±0.03b	2.88±0.21a	19.40±0.32a
NC200	74.16±0.11c	3.40±0.06c	2.89±0.17a	19.55±0.10a

3 讨论

氮素是果树必需矿质元素中的核心元素,植物叶片中 75% 的氮素用于叶绿素的构建^[19]。相关研究^[20-21]表明,根外施氮可以显著提高植株的叶绿素含量,进而提高光合速率,起到“以氮增碳”的效果。本试验结果表明,对桃树新梢部分叶片涂抹尿素溶液后,涂抹叶片的单叶面积显著增加,而纳米碳的施用进一步促进了涂抹叶片单叶面积的增加及叶绿素含量的提高,且随着纳米碳浓度的增大作用效果显著;此外,纳米碳的施用还提高了桃树新梢涂抹叶片的净光合速率、蒸腾速率及气孔导度,这是因为对桃树叶片涂抹纳米碳与尿素溶液后纳米碳促进了叶片对氮素的吸收,促进了叶片的生长发育,进而提高了光合水平,各处理中以涂抹 200 μg/mL 的纳米碳效果最佳。这与李延菊^[22]对设施油桃叶面喷布含有表面活性剂的尿素溶液,可以明显改善叶片光合水平的结论相符。

尿素溶液的叶面涂抹效果依赖于桃树叶片对养分的吸收与运输,氮素主要通过植物叶片表面的气孔、角质层的亲水小孔及叶片细胞的胞间连丝等途径以扩散、渗透的方式进入叶肉细胞发挥作用,而桃树叶片表皮细胞外壁上覆盖着角质层和蜡质层,这是阻

碍叶面施肥时养分吸收的一个关键因素^[3-4]。在本研究中,对桃树叶片涂抹尿素溶液(对照),新梢局部的氮素利用率较低,仅24.51%。Dietz等^[23]研究表明,直径小于20 nm的纳米碳能够穿过未受损细胞的细胞壁,8~20 nm范围内的纳米碳能够通过气孔进入叶肉细胞。本试验所用的纳米碳粒径为10~40 nm,尿素分子的直径约为0.44 nm,而桃树叶面的气孔尺寸约为29.5 μm ×20.2 μm ,亲水性小孔的直径约为0.45 μm ^[19]。纳米碳是具有巨大表面积的小尺寸物质,有很强的吸附能力,因此推断其能够携带尿素通过亲水性小孔进入叶片的表皮细胞并发挥作用。本研究中,纳米碳的施用提高了桃树新梢的氮素含量及叶片叶绿素含量,改善了叶片的光合水平,新梢局部的氮素利用率提高至34.29%,说明纳米碳能够促进桃树梢叶对氮素的吸收利用,调控新梢叶片的生长发育,可能对桃树氮素代谢相关基因的表达产生积极影响;另外,纳米碳能否被桃树叶片吸收并对植株的生长发育产生影响还需要深入研究。

氮素的肥料利用率及被叶面吸收后的再分配问题是根外应用氮肥最为重要的内容之一。叶片吸收的氮素沿着胞间连丝在叶内组织中转移,进入叶维管束参与整个植株的代谢活动。通常氮素会优先转运到新的生长点,以满足新生器官生长发育的需要,氮素及时而有效地向新生嫩叶转运并参与器官的建造,有利于提高叶片的氮素营养水平进而提高其光合能力,加速桃树从“异养”到“自养”的转化^[1,24]。沈其荣等^[25]用叶面氮肥处理黄瓜下位第2叶时,¹⁵N首先远移至正在生长的新叶,尽管它距离基部第1片叶最近,但¹⁵N含量却最少。在本试验中,通过对桃树新梢部分叶片涂抹纳米碳与尿素溶液,研究氮素在新梢局部内的吸收分配情况,结果表明纳米碳的施用能够显著提高桃树新梢局部的含氮量和氮素利用率,新生梢叶对氮素的征调能力增强;涂抹后短期内新生嫩叶中的氮素分配率以随纳米碳浓度的增大而显著提高,以NC200处理最高,对照最低,涂抹叶片部分的氮素分配率规律与此相反,涂抹效果显著。一方面,进行试验处理时虽然是傍晚,但天气干燥,气温较高,涂抹于叶面的液体因蒸发干燥损失较多,桃树新梢局部氮素吸收分配情况是在涂抹后的14天进行测定的,氮素转移分配尚不充分,因此桃树新梢局部的氮素利用率整体偏低,且主要集中在涂抹叶片部分,运往生长中心的比例较小;另一方面,纳米碳具有量子尺寸效应和表面界面效应,有较强的吸附吸附水分和养分能力,使尿素保持溶液的状态被叶片吸收,在一定程度上减少了损失,提高了氮素利用率;此外,纳米碳具有小尺寸效应,被桃树叶片吸收的纳米碳可能会吸附尿

素在新梢各部位间转移,影响了氮素的分配^[8]。结果表明纳米碳的施用有效促进了叶片对于涂抹尿素的吸收,提高了养分的叶面吸收效率。纳米碳可能具有类似于表面活性剂的两亲性的特性,在溶液表面产生定向吸附,在低浓度下即可显著影响溶液的表面活性,改变固体表面润湿性,提高叶片的附着性,延长喷施溶液的滞留时间,进而促进养分的叶面吸收^[26]。本试验主要通过同位素对桃树涂抹叶片其所着生的新梢进行局部研究,纳米碳对叶片涂抹的氮素通过树体转运至其他部位的比例及转运规律需要进一步研究;另外,借助透射电镜、拉曼光谱等仪器设备进一步探究植物对纳米碳的吸收规律及纳米碳对作物生长发育的影响是今后研究的重点。

4 结论

(1)对桃树新梢局部叶片涂抹纳米碳和尿素溶液,纳米碳促进了桃树涂抹叶片对氮素的吸收,单叶面积明显增加,涂抹后第6天,各施纳米碳处理叶片中的叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素及总叶绿素含量均较对照显著提高,进而提高了叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,以涂抹200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的纳米碳效果最佳。

(2)对桃树新梢局部叶片涂抹纳米碳和尿素溶液,纳米碳促进了桃树新梢的干物质积累量;低浓度的纳米碳提高了桃树成熟梢段的全氮含量,高浓度的纳米碳提高了功能叶片、新生器官(嫩梢及嫩叶)的全氮含量;纳米碳的施用提高了桃树新梢局部的氮素利用率,以NC200处理为最高;纳米碳的施用还影响了氮素在桃树梢叶间的移动、分配,新生嫩叶部分以NC200处理的氮素分配率最高,新生器官对氮素的吸收征调能力增强。

参考文献:

- [1] 赵林,姜远茂,彭福田,等.嘎拉苹果对春施¹⁵N-尿素的吸收、利用与分配特性[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1439-1443.
- [2] 李延菊,李宪利,高东升,等.设施栽培油桃对叶面施¹⁵N的吸收、分配特性研究[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):678-683.
- [3] 李燕婷,李秀英,肖艳,等.叶面肥的营养机理及应用研究进展[J].中国农业科学,2009,42(1):162-172.
- [4] Powlson D S, Poulton P R, Moller N E, et al. Uptake of foliar-applied urea by winter wheat (*Triticum aestivum*): The influence of application time and the use of a new ¹⁵N technique [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 48(4): 429-440.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 汪玉洁,陈日远,刘厚诚,等. 纳米材料在农业上的应用及其对植物生长和发育的影响[J]. 植物生理学报,2017,53(6):933-942.
- [9] 李小龙,孙占伟,过伟民,等. 纳米碳增效肥料对烟草农艺性状和经济指标的影响[J]. 土壤,2016,48(4):831-834.
- [10] 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 TiO_2 nanoparticles in cucumber (*Cucumis sativus*) plants [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46 (14): 7637-7643.
- [11] Yuan Z D, Zhang Z M, Wang X P, et al. Novel impacts of functionalized multi-walled carbon nanotubes in plants: Promotion of nodulation and nitrogenase activity in rhizobium-legume system [J]. Nanoscale, 2017, 9(28):9921-9937.
- [12] 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.
- [13] Khodakovskaya M V, Silva K D, Biris A S, et al. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cell [J]. Acs Nano, 2012, 6(3): 2128-2135.
- [14] 王小燕,马国辉,狄浩,等. 纳米增效尿素对水稻产量及氮肥农学利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1479-1485.
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2015.
- [16] 彭玲,刘晶晶,王芬,等. 硝酸盐供应水平对平邑甜茶幼苗生长、光合特性与 ^{15}N 吸收、利用的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(2):522-530.
- [17] 房祥吉,姜远茂,彭福田,等. 不同沙土对比对盆栽平邑甜茶的生长及 ^{15}N 吸收、利用和损失的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(4):131-134.
- [18] 周恩达,周乐,李红娜,等. 不同淹水处理对盆栽平邑甜茶生长及 ^{15}N -尿素分配、利用、损失的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):136-139.
- [19] 李绍华. 桃树学[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- [20] 王磊,董树亭,刘鹏,等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(3):301-308.
- [21] 陈倩,丁宁,彭玲,等. 供氮水平对矮化苹果 ^{15}N -尿素吸收、利用、损失及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(7):2247-2253.
- [22] 李延菊. 设施栽培‘早红珠’油桃对叶面施 ^{15}N -尿素吸收、分配和利用研究[D]. 山东 泰安:山东农业大学,2006.
- [23] Dietz K J, Herth S. Plant nanotoxicology [J]. Trends in Plant Science, 2011, 16(11): 582-589.
- [24] 张绪成,上官周平. 施氮量对小麦叶片硝酸还原酶活性、一氧化氮含量和气体交换的影响[J]. 应用生态学报,2007(7):1447-1452.
- [25] 沈其荣,徐国华,潘文辉,等. 不同叶面营养组分对黄瓜叶片氮素营养的影响[J]. 南京农业大学学报,1998,21(1):66-71.
- [26] 李永旗. 叶施尿素对棉花氮素吸收利用分配及生理生化特性的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2014.

(上接第 293 页)

- [16] 赵炯平,邓小华,江智敏,等. 不同绿肥翻压还土后植烟土壤主要养分动态变化[J]. 作物研究,2015,29(2):161-165.
- [17] 李娟,刘国顺,宋晓华. 重庆烟区土壤养分状况分析及综合评价[J]. 江西农业学报,2009,21(7):94-96.
- [18] 岳伦勇,何华波,朱列书. 烟草的磷素营养研究[J]. 现代农业科技,2014(23):238-240.
- [19] 邓小华,周清明,周冀衡,等. 烟叶质量评价指标间的典型相关分析[J]. 中国烟草学报,2011,17(3):17-22.
- [20] Mandal U K, Singh G, Victor U S, et al. Green manuring: Its effect on soil properties and crop growth under rice-wheat cropping system [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 225-237.
- [21] 王林虹,刘宝宜,姜亚历,等. 保水剂在烟草生产上的应用[J]. 作物研究,2017,31(1):99-102.
- [22] 江智敏,田峰,邓小华,等. 多年定位翻压绿肥对烤烟大田生长及经济性状的影响[J]. 中国烟草科学,2015,36(3):35-39.
- [23] 高云才,徐昭梅,刘玲,等. 玉溪市不同品种烤烟烟叶化学指标差异及品质分析[J]. 烟草科技,2015,48(6):34-39.
- [24] Karaivazoglou N A, Tsitsolis N C, Tsadilas C D. Influence of liming and form of nitrogen fertilizer on nutrient uptake, growth, yield and quality of Virginia (flue-cured) tobacco [J]. Field Crop Research, 2007, 100(1): 52-60.
- [25] 唐莉娜,张秋芳,陈顺辉. 不同有机肥与化肥配施对植烟土壤微生物群落 PLFAs 和烤烟品质的影响[J]. 中国烟草学报,2016,16(1):36-40.
- [26] 符建国,贾志红,沈宏. 免揭地膜不同氮用量对烤烟光合及产质的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(7):217-222.