

不同氮素形态对油茶幼苗生长及氮素吸收的影响

陈 铭, 袁 军*, 渠心静, 李 俊

(中南林业科技大学经济林培育与保护省部共建教育部重点实验室, 长沙 410004)

摘 要: 以一年生油茶‘华金’扦插苗为试材, 采用盆栽试验、同位素示踪研究铵态氮、硝态氮及同时供应条件下油茶生长及氮素吸收情况。结果表明: 不同氮素形态对油茶形态指标有显著影响, 铵态氮处理油茶生长量、地下鲜重和根冠比最大, 分别达到 19.4 cm、7.29 g 和 0.94; 铵硝同时处理下油茶总鲜重最高, 达 15.08 g。不同氮素处理下油茶叶片净光合速率(P_n)和荧光参数有显著差异, 铵硝氮同时处理能提高油茶叶片的净光合速率、初始荧光(F_o)和最大荧光(F_m)。3 种施氮方式下的油茶各组织器官的全氮含量较对照组均显著提高, 其中铵硝氮同时处理后的油茶根茎叶中全氮量均为最高, 分别为 26.7、14.1 和 24.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 纯铵处理次之。同位素示踪表明铵硝氮同时处理后油茶叶、茎、根对 ^{15}N 的吸收能力和其含量显著高于其他处理。结果表明同时供应铵态氮和硝态氮最有利油茶幼苗生长。

关键词: 油茶; 铵态氮; 硝态氮; 生长量; 吸收利用

中图分类号: S794.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)04-0660-05

Effects of different nitrogen forms on seedling growth and nitrogen uptake of *Camellia oleifera*

CHEN Ming, YUAN Jun, QU Xinjing, LI Jun

(Key Laboratory of Cultivation and Protection for Non-Wood Forest Trees, Ministry of Education, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: The nitrogen uptake and growth of *Camellia oleifera* under two forms of nitrogen were studied using one-year old cutting seedlings of ‘Huajin’. The results showed that different nitrogen forms had significant influences on the morphological indexes of *C. oleifera*. Plant height, root fresh weight and root to shoot ratio of *C. oleifera* under the treatment of pure ammonium nitrogen were 19.4 cm, 7.29 g and 0.94, respectively; the total fresh weight of *C. oleifera* was the highest under ammonium nitrate treatment (15.08 g). The net photosynthetic rate and fluorescence parameters of *C. oleifera* leaves were different under different nitrogen treatments. The net photosynthetic rate, initial fluorescence and the maximum fluorescence of the leaves of *C. oleifera* were improved by the mixture application of ammonium and nitrate. The total nitrogen contents in the leaves and roots under three kinds of nitrogen application were significantly higher than those in the control group, and the contents of total nitrogen in the roots and leaves of *C. oleifera* were the highest, which were 26.7, 14.1 and 24.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, followed by pure ammonium nitrogen treatment. After application of ammonium and nitrate mixture, the absorption capacity and content of ^{15}N in the tea leaves, stems and roots of *C. oleifera* were the largest. In summary, *C. oleifera* has a preference for ammonium and nitrate mixing compared with single nitrogen application.

Key words: *Camellia oleifera*; ammoniacal nitrogen; nitrate nitrogen; growth amount; absorption and utilization

氮素(nitrogen, N)是植物生长发育所必需的营养元素之一, 在植物生长进程中具有不可替代的作用, 被称为“生命元素”^[1]。硝态氮和铵态氮是植物吸收氮素的主要形态, 植物对生长环境中不同形态的氮素营养所做出的反应存在较大的差异, 不同形态氮素

对植物各形态指标和光合指标均有着较为显著的影响^[2]。对枳橙(*Citrus sinensis*)的研究表明, 全硝氮培养好于全铵氮培养, 枳橙属于喜硝态氮植物^[3]; 而枇杷(*Eriobotrya japonica* Lindl)有明显的喜铵特性, 枇杷根系对铵态氮的吸收大于硝态氮^[4]。此外, 有很多

收稿日期: 2018-11-14

基金项目: 湖南省重点研发项目(2017NK2201)和(2016NK2153)资助。

作者简介: 陈 铭, 硕士研究生。E-mail: 1020026457@qq.com

* 通信作者: 袁 军, 博士, 副教授。E-mail: yuanjunchina@126.com

学者认为铵态氮和硝态氮按一定比例混合施用,比单一氮素施用效果要更好^[5]。宋娜等^[6]就发现铵硝混合处理的水稻生物量最大。在铵、硝态氮混合处理下的水稻叶片净光合速率为最高,纯铵态氮处理最低^[7]。董彩霞等^[8]发现不同形态氮素对小麦叶片叶绿素荧光参数有一定影响,铵、硝混合处理后小麦叶片 PS II 光化学效率(F_v/F_m)最高。高志等^[9]研究指出,不同氮素形态及其配比施肥对玉米苗期氮素养分的吸收和利用有显著影响,铵硝氮按一定比例配比施用后玉米各组织器官吸氮量明显高于其他处理。潘中耀^[10]利用 ^{15}N 同位素示踪技术研究发现铵硝混合处理下橡胶树幼苗叶柄和粗根中的 Ndff (nitrogen derived from ^{15}N fertilizer) 值最高。

油茶是我国重要的木本食用油料树种,因其油酸含量高,被誉为“东方橄榄油”,具有十分广阔的市场发展前景^[11]。油茶主要分布在养分缺乏的红壤地区,其中氮素缺乏是限制油茶生长结实的重要因子之一^[12],因此氮肥施用成为油茶增产的主要措施。然而目前缺乏对油茶氮素形态利用的报道,限制了油茶氮肥施用的科学性。本研究以主栽品种油茶‘华金’为试验材料,采用盆栽试验、同位素示踪研究铵态氮、硝态氮及同时供应条件下的油茶生长及氮素吸收情况,以期丰富油茶氮素利用和合理施肥理论、提高油茶产量和经济效益提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

试验于 2017 年 10—12 月在人工气候室进行,气温为 27°C,湿度 75%,光照强度为 $54 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。供试材料为一年生油茶‘华金’(*Camellia oleifera* Abel. ‘Huajin’)扦插苗,2017 年 10 月 10 日选取生长一致,无病虫害的苗木移至塑料盆(18 cm×12 cm)中,栽培基质为珍珠岩。本试验采用营养液浇灌的方式对苗木进行培养,营养液为 Hoagland 完全营养液。分别设置全铵(以 Amm 表示)、全硝(以 Ni 表示)、铵硝混合(以 AmmNi 表示)和对照(以 CK 表示)共计 4 个处理,铵态氮由 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$ 提供,硝态氮由 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KNO}_3$ 提供,铵硝混合由 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}+0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KNO}_3$ 提供,CK 为蒸馏水处理,不同配比缺少的 K 由 KCl 补足。每个处理 10 株油茶苗,分成 3 份,各 3 个重复。在所有营养液中均加入双氰胺($0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)作为硝化抑制剂。培养期每 4 d 浇 1 次营养液,每次 100 mL。

^{15}N 同位素是从上海化工研究院购入的 10 at-

om%的氯化铵和硝酸钠,分别称 13.077 6 g NH_4Cl 和 20.638 7 g NaNO_3 溶于 6 L 蒸馏水中,将其配制成 $40 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液,按照不同溶液配比设为全铵、全硝、铵硝混合和对照 4 个处理,每个处理重复 3 次。培养期每 7 d 浇 1 次同位素,每次 100 mL。

1.2 测定指标和方法

1.2.1 形态指标测定 于苗木种植当日(2017 年 10 月 10 日)测定油茶苗高,并分别在 2017 年 10 月 24 日、11 月 24 日和 12 月 24 日用直尺测量苗木的苗高,记录并计算出植株生长量;2017 年 12 月 25 日将苗木移出人工气候室,洗净后用剪刀从根茎分界的部分剪开,除去枯死的叶片,将地上部和根分别用电子天平准确称量其鲜重,并计算出总重和根冠比。

1.2.2 光合参数测定 于 2017 年 12 月 23 日采用便携式光合作用系统(LI-6400XT, LI-COR, 美国)测定 P_n 。测量 F_o 、 F_m 及 F_v/F_m 时用锡纸包裹油茶叶片使其暗适应 30 min。所有光合指标测定时均测定每个处理中所有叶片的值,并求平均值。

1.2.3 氮含量的测定 将植物组织样本放入 105°C 烘箱中杀青 30 min,随后以 60°C 烘 24 h 至恒重,粉碎后待用;称取 0.150 0 g 左右(精确到 0.000 1)样品置于消煮管中,加入 5 mL 浓硫酸,放置于恒温消解仪中,消煮炉的温度控制在 290~300°C 左右;每隔 0.5 h 滴加数滴 30% H_2O_2 ,直至溶液澄清,待其冷却后转入 100 mL 容量瓶中定容待测。N 含量用间断化学分析仪(Smart Chem 200)测定。

1.2.4 ^{15}N 吸收量的测定 于 2017 年 11 月 25 日将同位素处理过的油茶幼苗收获,采样后将植株分成根、茎、叶 3 份,样品送至深圳市华科精信检测科技有限公司测定。 ^{15}N 的分配量参照孙世君等(2017)的方法计算^[13]。

$$\text{Ndff}(\%) = (\text{样品 } ^{15}\text{N 丰度} - 0.366 3\%) / (\text{肥料 } ^{15}\text{N 丰度} - 0.366 3\%) \times 100\%$$

Ndff 指植株器官从肥料中吸收分配到的 ^{15}N 量对该器官全氮量的贡献率,反映了植株器官对肥料 ^{15}N 的吸收征调能力。其中 0.366 3%为自然丰度。

$$\text{器官 } ^{15}\text{N 吸收量} (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}, \text{DW}) = \text{全氮含量} (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}, \text{DW}) \times \text{Ndff}(\%)$$

1.3 数据分析

图表采用 Origin 9.0 软件制作;采用 Excel 2007 进行数据统计和处理,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA)以及差异显著性检验(Duncan 法)。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同氮素形态处理对油茶地上部鲜重、地下部鲜重、总重及根冠比的影响

由表 1 可知, 不同氮素形态对油茶生长指标具有显著影响。地上部分的鲜重依次为: AmmNi>

Amm>Ni>CK; CK 和 Ni 组的地上部分鲜重显著低于 AmmNi 和 Amm 处理。Amm 组地下鲜重为最高, 达 7.29 g, 比对照提高了 152%。CK 组总重低于 Ni 组, 显著低于 Amm 组和 AmmNi 组; 与总鲜重相同, Amm 组根冠比最高, 是对照处理的 1.74 倍, Ni 和 AmmNi 处理较对照分别提高了 25.9%和 72.2%。

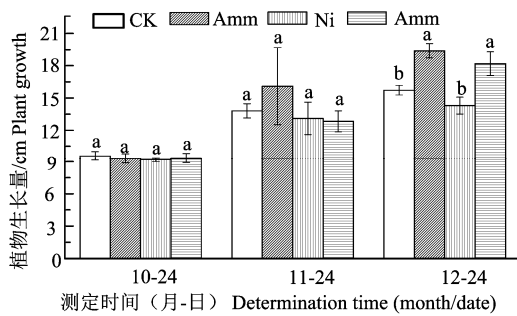
表 1 不同氮素处理下油茶幼苗鲜重及根冠比

Table 1 Fresh weight and root-shoot ratio of *C. oleifera* under treatments with different nitrogen forms

处理 Treatment	地上鲜重/g Aboveground fresh weight	地下鲜重/g Underground fresh weight	总重/g Total weight	根冠比 Root-shoot ratio
CK	5.29±0.30 ^b	2.89±0.33 ^b	8.18±0.61 ^b	0.54±0.40 ^b
Amm	7.74±0.89 ^a	7.29±0.93 ^a	15.03±1.73 ^a	0.94±0.75 ^a
Ni	5.39±0.67 ^b	3.61±0.43 ^b	9.00±0.26 ^b	0.68±0.18 ^b
AmmNi	8.25±0.62 ^a	6.82±0.19 ^a	15.08±0.81 ^a	0.93±0.93 ^a

注: 数据表示为平均值±标准差。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

Notes: The data are expressed as mean±SD. Different letters in the same column line indicate significant difference ($P<0.05$), and the same below.



各柱形上用不同小写字母标识表示差异显著($P<0.05$), 下同

The different small letters indicate significant difference at the 0.05 level. The same below

图 1 不同氮素形态处理对油茶生长量的影响

Figure 1 Effects of different nitrogen forms on the growth of *C. oleifera*

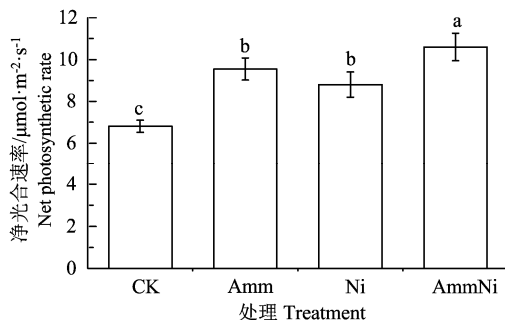


图 2 不同氮素形态处理下油茶幼苗叶片的净光合速率

Figure 2 Net photosynthetic rate of leaves of *C. oleifera* treated with different nitrogen forms

2.2 不同氮素形态处理对油茶幼苗生长的影响

由图 1 可见, 不同氮源的处理对油茶幼苗的生长有显著影响。10 月 24 日各组株高基本无差异;

11 月 24 日, Amm 组长势超过其余各组, 较 CK 组、Ni 组和 AmmNi 组苗高分别增加了 16.7%、22.9%和 25.5%。到试验结束, 即 12 月 24 日, Amm 组较 CK 组、Ni 组和 AmmNi 组苗高分别增加了 23.3%、35.7%和 6.59%。

2.3 不同氮素形态处理对油茶叶片光合参数影响

由图 2 可知, 不同的氮素形态对油茶幼苗叶片的净光合速率有显著的影响。Amm、Ni 和 AmmNi 处理下的油茶叶片 P_n 较对照提高了 40.1%、29.4%和 56.2%,

其中以铵硝同时处理下叶片的 P_n 最高, 显著高于其他 3 个处理。由表 2 可知, CK 组的 F_o 最大, AmmNi 组的 F_m 最大。处理组的 PSII 光化学效率均大于对照组, 其中 AmmNi 组的 F_v/F_m 为最大, 约为 10.6。

2.4 不同氮素形态对油茶氮含量的影响

由图 3 可知, 施用氮的油茶幼苗叶片和根系的氮含量高于茎, 其中 AmmNi 组叶、茎和根中氮含量显著高于其他各组。在油茶叶片中, Amm、Ni 和 AmmNi 组分别高于对照组 39.3%、27.2%和 63.4%。在油茶根系中, 以 AmmNi 组全氮含量最高, 达 24.61 $g \cdot kg^{-1}$, 显著高于 CK 组和 Ni 组, 以 CK 组为最低, 仅为 12.91 $g \cdot kg^{-1}$, Amm、Ni 和 AmmNi 组分别高于对照组 77.7%、20.1%和 90.6%。

由图 4 可知, 同位素处理下, 油茶幼苗根茎叶中氮含量存在显著差异。纯铵处理下油茶叶片中的全氮含量最高, 达 15.6 $g \cdot kg^{-1}$, 相对于 CK、Ni 和 AmmNi 组分别提高了 39.3%、25.8%和 7.6%; 油茶

茎中, Amm 组全氮含量最高, 为 $11.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, CK 组最低, 仅为 $8.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; AmmNi 组油茶根系中的全氮含量显著高于其他各组, 分别是 CK、Amm 和 Ni 组的 1.18、1.12 和 1.78 倍。

表 2 不同氮素形态处理下对油茶幼苗叶片荧光参数的影响
Table 2 Effects of different nitrogen forms on the fluorescence parameters of leaves of *C. oleifera*

处理 Treatment	F_o	F_m	F_v/F_m
CK	258.48 ± 7.44^a	946.68 ± 19.06^c	0.73 ± 0.01^c
Amm	220.76 ± 4.37^b	$1\ 042.03\pm 39.28^b$	0.79 ± 0.01^b
Ni	229.76 ± 9.24^b	$1\ 021.88\pm 44.08^b$	0.78 ± 0.01^b
AmmNi	232.98 ± 4.50^b	$1\ 184.32\pm 18.19^a$	0.81 ± 0.01^a

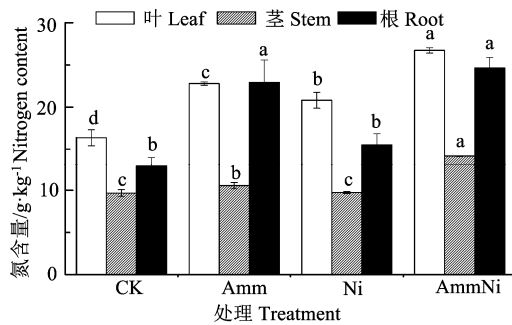


图 3 不同氮素形态处理条件下油茶不同组织器官中的氮含量

Figure 3 Nitrogen contents in different tissues and organs of *C. oleifera* under different nitrogen forms

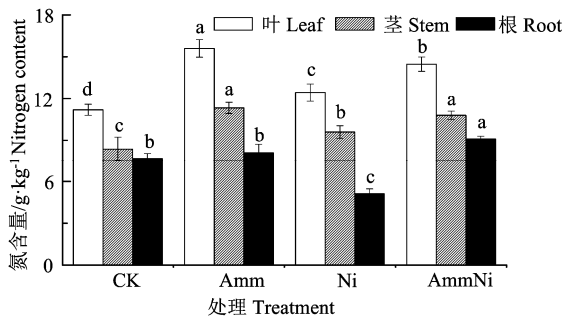


图 4 ¹⁵N 同位素处理条件下油茶不同组织器官中的氮含量

Figure 4 Nitrogen contents in different tissues and organs of *C. oleifera* under ¹⁵N isotope treatment

2.5 油茶幼苗不同组织器官对土壤中铵态氮与硝态氮的吸收与分配

2.5.1 不同氮素形态处理对油茶不同组织器官 Ndff 的影响 图 5 表明, 不同氮素形态处理条件下油茶不同组织器官中的 Ndff 值具有显著差异。在铵硝混合处理下油茶幼苗各器官对 ¹⁵N 的吸收量均为最大, 叶、茎、根中的 Ndff 分别达到了 8.6、7.6 和 7.7, 较对照组分别提高了 145%、179%和 109%。其余各组较对照组差距不显著。说明在不同氮素形

态处理下, 在铵硝混合处理下的油茶幼苗组织器官对 ¹⁵N 的吸收能力大于单一氮源处理。

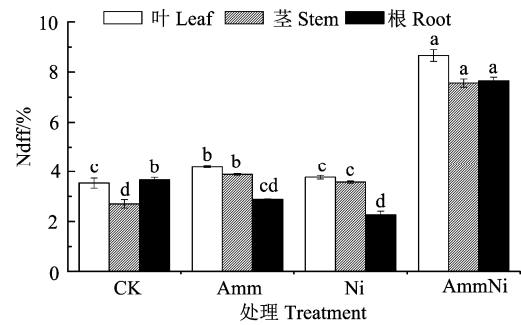


图 5 不同氮素形态处理对油茶根、茎和叶 Ndff 的影响
Figure 5 Effects of different nitrogen forms on Ndff in root, stem and leaf of *C. oleifera*

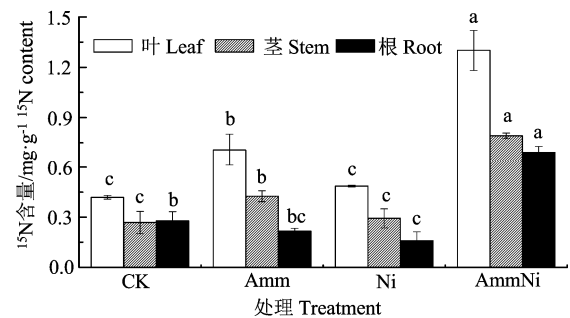


图 6 不同氮素形态处理对油茶根、茎和叶 ¹⁵N 含量的影响
Figure 6 Effects of different nitrogen forms on the contents of ¹⁵N in root, stem and leaf of *C. oleifera*

2.5.2 不同氮素形态处理对油茶不同组织器官 ¹⁵N 含量的影响 由图 6 可知, 不同的氮素处理下油茶不同组织器官中的 ¹⁵N 含量存在显著差异。首先, 叶片中 ¹⁵N 含量最高, 茎次之, 根系中含量最少。在所有处理组叶片中, AmmNi 组的 ¹⁵N 含量最高, 达到 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 较对照组提高了 420%; Amm、Ni 组则分别高于对照组 68.7%和 15.9%, 说明铵硝混合处理促进了油茶幼苗叶片对 ¹⁵N 的吸收。在油茶幼苗茎中, 同样是铵硝混合处理组的 ¹⁵N 含量最高, 全铵组次之, CK 组和全硝组最低。植株根中的 ¹⁵N 含量与叶、茎情况一致, AmmNi 组中的 ¹⁵N 含量显著高于其他各组, 其中 Amm 组和 Ni 组根系中的 ¹⁵N 含量较对照组分别降低了 32.3%和 42.8%。

3 讨论

硝态氮和铵态氮是国内外氮肥制造及农业生产中广泛应用的主要氮肥种类, 有研究发现植物对不同形态氮肥具有选择吸收与利用的营养特性^[14]。本研究表明不同氮素形态对油茶幼苗的形态指标、光合特性及氮素的吸收能力均产生了较大的影响。通

常情况下,与单一的氮素处理相比,适当比例的铵硝混合处理对多数作物生长发育促进作用更强^[6,15]。在本研究中也发现,不同氮源处理下的油茶幼苗生长量、植株鲜重和根冠比均大于对照组,说明施氮对促进了油茶的生长,而其中 Amm 处理明显优于 Ni 处理,说明油茶具有喜铵特性,这是由于油茶主要分布在酸性红壤中,生长于酸性土壤环境的植物通常喜铵^[16]。

净光合速率是植物光合作用能力最直接的体现,净光合速率的大小决定着植物光合能力的强弱^[17]。本研究中 AmmNi 组净光合速率最大,Amm 组次之, Ni 组略低于 Amm 组,表明铵硝混合处理下的油茶幼苗光合作用能力最强,纯铵次之,这与前人对棉花的研究结果相一致^[18]。Fv/Fm 用于表征 PS II 反应中心光能的转化效率,受到环境胁迫和抑制时明显降低^[19-20]。本研究结果表明 AmmNi 处理更有利于油茶光能转化,这与前人对马铃薯的研究结果相一致^[21]。

AmmNi 组油茶幼苗各组织器官中的全氮含量均为最高,纯铵处理次之,说明铵硝混合处理最有利于油茶各组织器官吸收氮素。其中,油茶叶片中的全氮含量高于其他部位,说明其叶片是氮素积累的主要器官,这与前人的研究结论一致^[22-23]。Ndff 指植株器官从标记物中吸收分配到的 ¹⁵N 量对该器官全氮量的贡献率,它反映了植株器官对 ¹⁵N 的吸收分配能力^[24]。本试验通过 ¹⁵N 同位素标记研究发现,AmmNi 组各组织器官对 ¹⁵N 的吸收分配能力均为最大,这说明铵硝混合使用能够更为有效地为油茶幼苗供应氮素。

本次试验中,纯铵处理和铵硝混合处理都能促进油茶幼苗地上部和地下部的生长,且两组无明显差异,下一步有必要细化试验内容,进一步探究不同氮素形态对油茶幼苗生长量的影响。油茶光合指标测定和 ¹⁵N 同位素标记结果表明铵硝同时供应有利于油茶幼苗光合作用和氮素吸收,但是最利于油茶氮素吸收和生长发育的铵硝比例究竟如何,还有待进一步深入研究,若能摸清整个生育时期铵硝的吸收比例,将对不同生育时期不同形态 N 素对产量的贡献及其对田间针对性地施肥管理等方面有重要的理论和实践意义。

参考文献:

- [1] MILLER A J, CRAMER M D. Root nitrogen acquisition and assimilation[J]. Plant Soil, 2005, 274(1/2): 1-36.
- [2] 王玉琪, 张建军, 朱国辉, 等. 不同形态氮素培养下水稻叶片中蛋白质差异表达[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(4): 403-410.
- [3] 孙敏红, 卢晓鹏, 李静, 等. 不同氮素形态对枳橙幼苗生长特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(8): 2014-2018, 2022.
- [4] 马检. 枇杷及其不同野生种质对不同形态氮肥的选择吸收与利用特性[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [5] 张智猛, 万书波, 孙奎香, 等. 氮素供应水平对小粒型花生氮素代谢及相关酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(2): 170-175.
- [6] 宋娜, 郭世伟, 沈其荣. 不同氮素形态及水分胁迫对水稻苗期水分吸收、光合作用及生长的影响[J]. 植物学通报, 2007, 24(4): 477-483.
- [7] 王娜, 陈国祥, 邵志广, 等. 不同形态氮素配比对水稻光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2002, 18(1): 18-22.
- [8] 董彩霞, 赵世杰, 田纪春, 等. 不同浓度的硝酸盐对高蛋白小麦幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 59-64.
- [9] 高志, 徐阳春, 沈其荣, 等. 不同氮素形态配比的复混肥对玉米苗期生长及氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2005, 20(6): 68-72.
- [10] 潘中耀. 橡胶树幼苗对不同形态 ¹⁵N 标记氮肥的吸收、分配和利用特性研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [11] 袁军, 王慧, 董文统, 等. 不同砧木对海南油茶嫁接成活率和苗木生长的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(7): 1193-1197.
- [12] 张祥宇, 丁晓纲, 张应中, 等. 缺素对高州油茶幼苗根系的影响[J]. 经济林研究, 2014, 32(4): 170-174.
- [13] 孙世君, 付崇毅, 宋阳, 等. 根区低温对嫁接的黄瓜幼苗根系生长和 ¹⁵N 吸收分配的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(8): 1545-1552.
- [14] 王梦柳, 樊卫国. 刺梨实生苗对硝态氮、铵态氮的吸收与利用差异分析[J]. 果树学报, 2017, 34(6): 682-691.
- [15] 李霞, 阎秀峰, 刘剑锋. 氮素形态对黄檗幼苗生长及氮代谢相关酶类的影响[J]. 植物学通报, 2006, 23(3): 255-261.
- [16] 唐辉, 李婷婷, 沈朝华, 等. 氮素形态对香榧苗期光合作用、主要元素吸收及氮代谢的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(10): 158-163.
- [17] 孙磊, 章铁, 李宏开, 等. 柿树光合速率日变化及其影响因子的研究[J]. 北方果树, 2006(2): 4-6.
- [18] 李存东, 董海荣, 李金才. 不同形态氮比例对棉花苗期光合作用及碳水化合物代谢的影响[J]. 棉花学报, 2003, 15(2): 87-90.
- [19] 肖艳辉, 何金明, 王羽梅. 光照强度对茴香植株生长以及精油的含量和成分的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(3): 551-555.
- [20] 陈兰兰, 郭圣茂, 李桂凤, 等. 干旱胁迫对桔梗光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(5): 867-873.
- [21] 乔建磊, 于海业, 宋述尧, 等. 氮素形态对马铃薯叶片光合色素及其荧光特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3): 39-44.
- [22] 刘庆倩, 石婕, 安海龙, 等. 应用 ¹⁵N 示踪研究欧美杨对 PM_{2.5} 无机成分 NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 的吸收与分配[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6541-6548.
- [23] 张芳芳, 韩明玉, 张立新, 等. 红富士苹果对初夏土施 ¹⁵N-尿素的吸收、分配和利用特性[J]. 果树学报, 2009, 26(2): 135-139.
- [24] WANG S J, LUO S S, YUE S C, et al. Fate of ¹⁵N fertilizer under different nitrogen split applications to plastic mulched maize in semiarid farmland[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2016, 105(2): 129-140.