

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22414

不同氮素形态对茅苍术光合特性和光合氮素利用效率的影响

马国珠^{1, 2}, 张莉^{2*}, 付国占¹, 王婧^{3*}, 张艳玲², 信龙飞², 孙万慧², 程怡新²

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2. 信阳农林学院农学院, 河南 信阳 464002;
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 研究不同氮素形态对茅苍术光合特性和氮素吸收的影响, 为其栽培氮肥高效利用提供理论依据。以一年生茅苍术为材料, 研究不施氮肥、施用硝态氮、铵态氮和酰胺态氮对茅苍术叶片光响应曲线和光合氮素利用效率的影响。结果表明, 施用氮肥可不同程度改善叶片光合特性, 其中硝态氮处理的叶绿素含量、表观光量子效率、最大净光合速率, 光饱和点、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均最高, 但其光补偿点和胞间二氧化碳浓度显著低于铵态氮和酰胺态氮处理。同时, 硝态氮处理能显著增大叶面积、降低比叶重, 促进植株生长, 使得其整株生物量比铵态氮和酰胺态氮处理提高 6.89% 和 17.05%。此外, 硝态氮处理还增加叶片氮素含量, 提高光合氮素利用效率, 分别比铵态氮和酰胺态氮处理提高 2.43% 和 6.76%。可见, 茅苍术光合特性对硝态氮更敏感, 施用硝态氮肥能改善光能特性, 促进氮素高效利用。

关键词: 茅苍术; 氮素形态; 光合特性; 光合氮素利用效率

氮素是植物生长需要的大量营养元素之一, 其供给状况直接影响植物产量和品质。然而, 不同药用植物对氮素形态表现出不同的吸收偏好。如桔梗^[1]、天门冬^[2]、三叶青^[3]属于喜硝植物, 施用硝态氮对提高净光合速率、促进氮素吸收和植株干物质积累效果优于其他形态的氮肥。而对于喜铵植物, 如槟榔^[4]和丹参^[5], 施用铵态氮肥, 植株各器官吸氮量和氮肥利用率显著高于硝态氮肥。因此, 探明不同氮素形态对药用植物光合生理特性影响的差异, 对提高药用植物氮肥利用和产量形成具有重要意义。

茅苍术干燥根茎具有燥湿健脾、祛风散寒、化湿解表的功效, 属于苍术的优质商品, 是治疗新型冠状病毒肺炎方剂中的常用药物^[6]。近年来, 野生资源已不能满足市场需求, 人工栽培成为主要途径。然而茅苍术主要分布在我国南方酸性土壤中, 土壤氮素淋溶损失严重、供给能力较差, 研究指

出, 施用氮肥可增强茅苍术叶片抗氧化酶活性, 提高叶绿素含量和净光合速率^[7]。但关于不同氮素形态如何影响南苍术光合特性和氮素吸收利用的研究鲜有报道。鉴于此, 以不施氮肥对照, 研究了铵态氮、硝态氮和酰胺态氮 3 种氮素形态对一年生南苍术光合特征、幼苗生长及光合氮素利用效率的影响, 以探明南苍术的氮素吸收偏好, 为茅苍术合理施氮提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 12 月至 2020 年 11 月在河南省信阳农林学院药用植物园 (114°7'2"E, 32°9'46"N) 进行。试验地位于河南省南部, 处于我国亚热带和暖温带过渡带上, 季风气候明显, 年均无霜期 220 ~ 230 d, 年均日照 1900 ~ 2100 h, 年均温度 15.3 ~ 15.8℃, 年均降水量 993 ~ 1294 mm, 适宜种植我国大部分植物。试验地为黄棕壤, 0 ~ 20 cm 土壤 pH 值 6.36、有机质含量 11.5 g/kg、碱解氮含量 41.3 mg/kg、有效磷含量 5.75 mg/kg、速效钾含量 35.07 mg/kg。供苍术材料为光山县淮河源林药种植专业合作社提供的“大别山一号”。

1.2 试验设计

试验设置不施氮肥、酰胺态氮、铵态氮和硝态氮共 4 个处理。氮肥分别为尿素 (N 46%)、碳酸

收稿日期: 2022-07-07; 录用日期: 2022-08-26

基金项目: 河南省高等学校重点科研资助项目 (24A210023); 河南省科技攻关资助项目 (212102110287, 212102110285, 222102110338); 信阳农林学院青年教师科研基金资助项目 (2019LG004)。

作者简介: 马国珠 (1986-), 在读硕士, 主要从事药用植物规范化种植研究工作。E-mail: 438776282@qq.com。

通讯作者: 张莉, dazhang0376@163.com; 王婧, E-mail: wangjing02@caas.cn。

氢铵 (N 17.72%) 和硝酸钙 (N 11.86%), 参照赵少丹^[8] 研究结果和基肥肥力水平, 氮肥、磷肥和钾肥的施用量分别为 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm², 其中氮肥和钾肥 (硫酸钾, K₂O 50%) 于播种前施入 50%, 现蕾前沟施 50%, 磷肥 (过磷酸钙, P₂O₅ 12%) 于全部播种前施入。采用大田试验, 各小区垄长 8 m, 垄宽 2 m, 垄高 20 cm, 面积为 16 m², 每处理 3 次重复, 随机区组排列。为防止小区间水肥影响, 小区间埋入长 8 m、宽 60 cm、厚 12 丝塑料膜。2019 年 12 月 23 日选择鲜重为 25 ~ 30 g、3 个饱满芽的根茎作为种苗, 按行距 30 cm、株距 20 cm 栽种, 生育期间无灌溉, 人工除草。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 叶片叶绿素及光合响应曲线的测定

于 2020 年 10 月 5 日上午 9:00—11:00, 取茅苍术主茎倒数第 3 片完全展开叶的中部作为测定部位, 用 SPAD 502 便携式叶绿素仪测定叶绿素含量, 用 SPAD 值表示, 每个处理 5 片叶子, 随后用 TARGAS-1 便携式光合仪的开路系统, 测定光响应曲线。测定时用 LED 红蓝光源控制光强, 依次设定光合有效辐射 (PAR) 2000、1800、1500、1200、1000、800、600、400、200、100、50、0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 各处理 3 次重复, 以 PAR 为横轴, 净光合速率 (P_n) 为纵轴, 采用 Photosyn assistant 软件进行拟合, 计算表观量子效率 (AQY)、最大净光合速率 ($P_{n\text{max}}$)、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP) 和暗呼吸速率 (R_d)。同时, 从光响应曲线中获得光强 1200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下的净光合速率 (P_n)、胞间二氧化碳浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r), 参照剧成欣等^[9] 计算光合作用效率 (PE)。PE= P_n/PAR 。

1.3.2 生物量测定

于 2020 年 11 月 5 日, 每小区选取代表性的 3 株南苍术, 将叶、茎、根茎和须根分开, 用比叶重法测定绿色叶面积, 之后于 105℃ 杀青 15 min, 75℃ 烘干至恒重后测定各器官生物量, 并计算比叶重。比叶重 = 叶片干重 / 叶面积。

1.3.3 叶片氮含量的测定

将烘干的样品粉碎过筛, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 用奈氏比色法测定叶片氮含量。

1.3.4 光合氮素利用效率的计算

光合氮素利用效率 = $P_n / (\text{叶片氮含量} / \text{叶面积})$ ^[9]。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 整理数据和作图, 用 SAS 9.0 进行统计分析, 采用最小显著极差法检验处理间差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氮素形态对茅苍术叶片 SPAD 值的影响

由图 1 所示, 施用氮肥可以显著增加叶片叶绿素含量。硝态氮处理茅苍术叶片 SPAD 值为 40.4, 显著高于其他氮素形态处理, 分别比酰胺态氮和铵态氮处理提高 21.60% 和 10.74%。

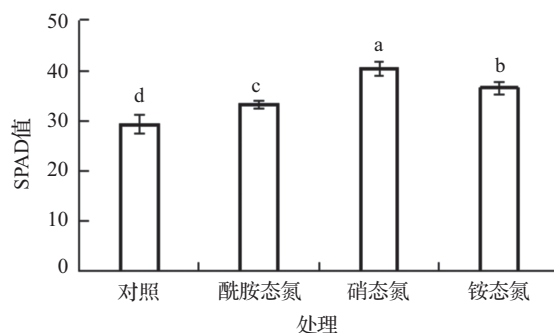


图 1 不同氮素形态对茅苍术叶片 SPAD 值的影响

注: 图中误差线表示平均值的标准差, 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 氮素形态对茅苍术光合特性的影响

2.2.1 氮素形态对茅苍术光响应曲线的影响

由图 2 可知, 不同氮素形态处理下茅苍术光响应曲线变化规律相似, 当 $\text{PAR} \leq 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, P_n 随 PAR 的增加而迅速增大, 当 $\text{PAR} > 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, P_n 增加缓慢, 直至饱和。不同处理 P_n 达到饱和的顺序不同, 具体表现为对照最早、酰胺态氮处理次之, 硝态氮处理最晚。

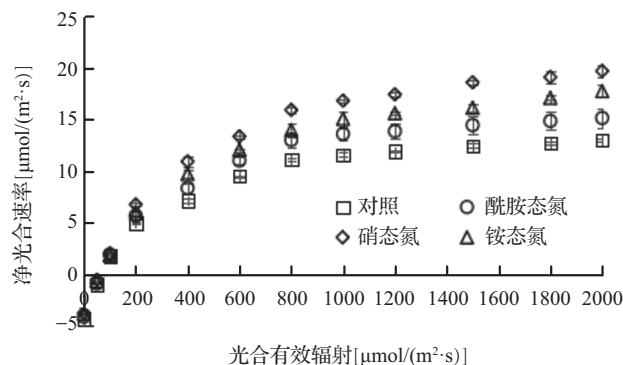


图 2 不同氮形态对茅苍术光响应曲线的影响

2.2.2 氮素形态对茅苍术光响应曲线参数的影响

拟合光合-光响应曲线发现(表1),施氮肥处理可显著提高 P_{nmax} 、LSP和LCP,但对 R_d 无显著影响。3种氮肥处理间的变化趋势因光合-光响应曲线参数的不同而不同。硝态氮处理AQY、 P_{nmax} 最高,比酰胺态氮处理分别提高14.06%和

14.78%,比铵态氮处理分别提高10.06%和8.14%。铵态氮和硝态氮处理LSP较高,分别比酰胺态氮处理显著提高3.17%和11.02%,而两处理间无显著差异;与其他参数不同,硝态氮和铵态氮处理的LCP较对照显著降低17.03%和6.38%,而酰胺态氮肥处理与对照无显著差异。

表1 不同氮素形态对茅苍术光合-光响应曲线参数的影响

处理	表观量子效率 (mol/mol)	最大净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	暗呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光饱和点 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光补偿点 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
对照	0.060 ± 0.003b	24.76 ± 0.20d	-3.75 ± 0.37a	1313 ± 41c	62.67 ± 2.31ab
酰胺态氮	0.064 ± 0.001b	27.20 ± 1.08c	-4.02 ± 0.11a	1388 ± 57b	64.00 ± 0.00a
硝态氮	0.073 ± 0.007a	31.22 ± 0.07a	-3.73 ± 0.09a	1541 ± 61a	52.00 ± 4.00c
铵态氮	0.066 ± 0.001b	28.87 ± 0.42b	-3.85 ± 0.09a	1432 ± 38a	58.67 ± 2.30c

注:数据均以平均值 ± 标准偏差表示。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

2.2.3 氮素形态对茅苍术光合指标的影响

由表2可知,施用氮肥可改善茅苍术叶片光合作用参数,与对照相比, P_n 、 G_s 、 T_r 和PE分别提高10.06%~29.24%、1.24%~4.48%、1.90%~2.84%和10.13%~29.11%。在氮肥处理中,硝态氮处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 、PE最高,比酰胺态氮分别提高

17.42%、2.89%、0.93%、17.24%,比铵态氮处理分别提高8.06%、3.20%、0.46%、7.94%,差异均达到显著水平。但在 C_i 方面,酰胺态氮处理最高,分别比硝态氮处理提高47.58%,比铵态氮处理提高10.92%,且差异达到显著水平。

表2 不同氮素形态对茅苍术叶片气体交换参数的影响

处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间二氧化碳浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光合作用效率 (%)
对照	18.98 ± 0.03d	216.00 ± 1.73b	132.67 ± 1.53a	2.11 ± 0.15c	1.58 ± 0.01d
酰胺态氮	20.89 ± 0.72c	219.33 ± 1.15b	121.27 ± 1.10b	2.15 ± 0.05b	1.74 ± 0.06c
硝态氮	24.53 ± 0.27a	225.67 ± 0.58a	82.17 ± 14.87d	2.17 ± 0.31a	2.04 ± 0.02a
铵态氮	22.70 ± 0.18b	218.67 ± 6.35b	109.33 ± 1.53c	2.16 ± 0.20b	1.89 ± 0.01b

2.2.4 氮素形态对茅苍术叶片指标的影响

由表3可知,3种形态氮处理的茅苍术叶面积、生物量和氮含量均高于对照,其中硝态氮处理最高,其叶面积、生物量和氮含量分别比铵态氮处理显著

提高19.81%、7.13%和8.44%,比酰胺态氮处理显著提高18.19%、12.68%和16.80%;但铵态氮处理比叶重最高,分别比对照、酰胺态氮处理、硝态氮处理显著提高8.06%、5.48%、10.61%。

表3 不同氮素形态对茅苍术叶片指标的影响

处理	叶面积($\text{cm}^2/\text{株}$)	生物量($\text{g}/\text{株}$)	氮含量(mg/g)	比叶重(mg/cm^2)
对照	135.16 ± 4.40c	3.92 ± 0.07c	18.97 ± 0.02c	29.03 ± 1.21b
酰胺态氮	188.38 ± 3.97b	5.60 ± 0.03b	21.01 ± 0.98b	29.74 ± 0.67b
硝态氮	222.65 ± 3.76a	6.31 ± 0.15a	24.54 ± 0.39a	28.36 ± 0.46b
铵态氮	185.84 ± 3.43b	5.89 ± 0.07b	22.63 ± 0.16b	31.37 ± 0.50a



2.3 氮素形态对茅苍术干物质积累的影响

由图 3 可知,施用氮肥可以显著增加茅苍术的整株生物量,与对照相比,硝态氮、铵态氮和酰胺态氮处理分别显著提高 60.53%、50.18% 和 37.15%。不同氮素形态之间以硝态氮的整株生物量最高,比酰胺态氮和铵态氮分别增加 17.05% 和 6.89%,差异达显著水平。

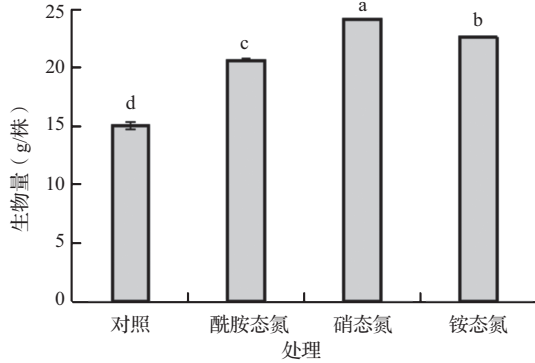


图 3 不同氮素形态对茅苍术整株生物量影响

2.4 氮素形态对茅苍术光合氮素利用效率的影响

由图 4 可知,与对照相比,酰胺态氮处理光合利

用效率降低 3.30%,硝态氮处理和铵态氮处理分别提高 3.23% 和 0.79%,但差异均未达到显著水平。3 种氮形态处理中,硝态氮处理光合利用效率比酰胺态氮处理显著提高 6.76%,但与铵态氮处理无显著差异。

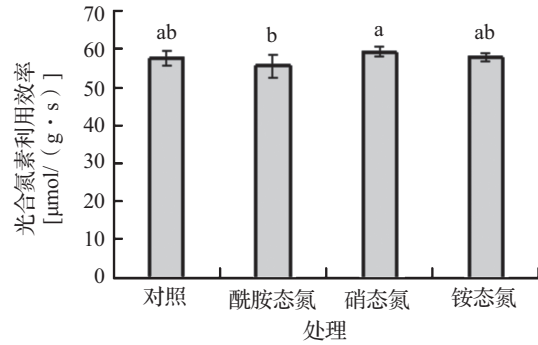


图 4 不同氮素形态对茅苍术叶片光合氮素利用效率的影响

2.5 茅苍术光合特性与养分利用效率间的相关性

由表 4 可知,整株生物量、叶面积、叶绿素含量和叶片氮含量与叶片 P_n 、 LSP 、 G_s 、 T_r 呈极显著或显著的正相关关系,与 LCP 、 C_i 呈极显著负相关关系,与 R_d 无显著相关性。

表 4 茅苍术叶片光合特性与其他因子的相关系数

指标	整株生物量	叶面积	比叶重	叶绿素含量	叶片氮素含量	光合氮素利用效率
净光合速率	0.942**	0.922**	-0.019	0.961**	0.861**	0.499
光饱和点	0.828**	0.883**	-0.163	0.834**	0.867**	0.274
光补偿点	-0.651*	-0.647**	0.214	-0.808**	-0.790*	-0.417
暗呼吸速率	-0.039	-0.051	-0.160	0.235	0.146	0.189
气孔导度	0.639*	0.750**	-0.356	0.712**	0.790**	0.253
胞间二氧化碳浓度	-0.825**	-0.864**	0.240	-0.936**	-0.926**	-0.426
蒸腾速率	0.953**	0.922**	0.118	0.874**	0.812**	0.132

注:**表示相关性极显著 ($P<0.01$),*表示相关性显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同氮素形态对茅苍术叶绿素含量的影响

氮是叶绿素的组成成分,土壤氮供给情况与叶绿素含量密切相关。本试验中,施用氮肥可增加叶片 SPAD 值,这与前人研究结果一致,供给氮素可提高谷氨酸或 α -酮戊二酸的含量,促进叶绿素合成^[10]。同时,本研究还发现,叶绿素含量增幅受外源氮形态的影响,硝态氮处理叶绿素含量明显高于酰胺态氮和铵态氮处理,这应与植物根系主要吸收硝态氮和铵态氮有关^[11],但单一供应铵态

氮会造成叶片中积累较多铵离子,对植株产生毒害,不利于植株叶绿素合成^[12],使得铵态氮处理 SPAD 值低于硝态氮处理。

3.2 不同氮素形态对茅苍术光合特性的影响

光合作用是作物生产的基础,其作用强度也受栽培环境中氮素形态的影响。段云晶等^[13]研究认为,桔梗幼苗在硝态氮处理下叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 明显高于铵态氮处理,但 C_i 处理间无显著差异。本研究结果表明,3 种氮肥处理下茅苍术叶片光合参数均得到改善,其中硝态氮处理茅苍术叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 最高,但 C_i 最低。这与唐晓清等^[14]在菘蓝



中的研究结果一致, P_n 与 G_s 、 T_r 成正相关, 与 C_i 成负相关, 说明施用硝态氮不仅能增加茅苍术气孔的开放程度, 促进外界 CO_2 进入叶肉细胞, 还能增强利用 CO_2 的能力。推测这可能是由于铵态氮和酰胺态氮作为氮源时, 形成的 NH_4^+ 容易穿过生物膜, 导致发生膜去离子化, 进而影响质子驱动势的形成, 抑制 CO_2 的固定与同化, 降低了净光合速率; 而硝态氮作为氮源时, 其 NO_3^- 超过植物需求量时会贮存在液泡中, 不影响其他代谢活动^[15]。同时, 硝态氮处理比叶重较小, 叶片较薄, 更利于 CO_2 在叶肉细胞传输和净光合速率的提升。

植物光合作用受光强和 CO_2 浓度的影响, 通过光响应曲线中光响应参数的变化能反映植物的光合潜能和光能利用情况。其中 LCP 和 LSP 分别反映植株对弱光和强光的利用能力, 通常 LCP 值低、LSP 值高的植株光适应性较强^[16]。本研究中, 硝态氮和铵态氮处理的 LCP 值较低、LSP 值较高, 而酰胺态氮处理 LCP 值较高、LSP 值较低, 表明施用无机态氮能增大茅苍术叶片光能利用区间, 增强光能利用范围, 这与易晓芸等^[17]在黑麦草的研究一致。 P_{nmax} 反映植物最大光合能力, 其值越大说明叶片光合潜能越高。本研究发现, 施用氮肥显著提高 P_{nmax} , 说明施氮可提升茅苍术叶片光合潜能, 这与刘新亮等^[16]研究结果一致, 同时, 硝态氮处理的 P_{nmax} 显著高于铵态氮和酰胺态氮处理, 这应与叶绿素含量有关。叶绿素是光能吸收、传递和转化的重要色素, 硝态氮处理通过增加叶绿素含量, 在一定程度上增强了植株捕获光能能力^[18]。此外, P_{nmax} 也与 G_s 、 T_r 呈极显著正相关。这也说明施用硝态氮还能促进气孔张开, 为光合作用提供较多的 CO_2 , 促进 CO_2 转化为稳定碳水化合物, 进而提高 P_{nmax} 。

3.3 不同氮素形态对茅苍术整株生物量的影响

外源氮形态在影响植株光合作用的同时, 也影响碳水化物的积累。本研究中, 硝态氮处理茅苍术整株生物量最高, 说明硝态氮更利于茅苍术的生长。这与段云晶等^[13]在桔梗中的研究结果一致, 但与前人在丹参^[5]、藿香^[19]中研究结果不一致。其试验认为, 铵态氮更利于植物干物质的积累。这应与植物氮素营养特性不同有关。茅苍术常分布在排水良好的坡地, 土壤通气性好, 自养硝化速率高, 硝态氮是无机氮的主体, 在长期进化过程中形成了喜硝特性^[20], 供给硝态氮满足了茅苍术的氮素喜好, 更利于提高光合速率, 增加整株生物量。

3.4 不同氮素形态对光合氮素利用效率的影响

光合氮素利用效率是叶片单位氮的 CO_2 的同化率, 是植物叶片氮素利用和生理特征的重要指标^[21]。彭金凤等^[22]研究发现, 施用氮肥可显著提高水稻剑叶单位面积氮含量和光合氮素利用效率, 且铵态氮更利于提升光合氮素利用效率和氮素农学利用效率^[23]。本研究结果也显示, 3 种氮肥处理均显著提高光合氮素利用效率, 但硝态氮处理增幅更高, 这应与植物种类不同有关。

4 结论

施用氮肥能改善叶片光合作用, 促进茅苍术干物质积累。其中硝态氮处理茅苍术能具有最高的叶绿素含量、最大的绿色叶面积、最强的光合能力, 从而促进光合氮素利用率的提高。因此, 生产中施用硝态氮肥更利于整株生物量的提升和氮肥高效利用, 但为制定科学施氮措施, 不同氮素形态对茅苍术根茎品质的影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵姣姣, 杨其长, 刘文科. 氮水平和形态对水培桔梗生长及氮磷吸收的影响 [J]. 华北农学报, 2013, 28 (6): 220-225.
- [2] 梁娟, 叶漪, 杨伟. 不同氮素形态及配比对天门冬生长和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (1): 28-31.
- [3] 张强, 龙民慧, 宋运贤, 等. 不同氮形态对濒危药用植物三叶青叶片光合、能量分配和抗氧化酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (3): 877-883.
- [4] 王成, 李昌珍, 廖钰, 等. 氮肥形态对槟榔幼苗全氮含量、土壤有效氮和酶活性的影响 [J]. 分子植物育种, 2021, 19 (19): 6564-6573.
- [5] 周文利. 不同形态氮素对丹参苗期生长及养分吸收的影响 [J]. 中药材, 2019, 42 (2): 260-263.
- [6] 杨璐平, 盖聪, 周梦琪, 等. 麻黄-苍术治疗新型冠状病毒肺炎机制的网络药理学探讨 [J]. 中药材, 2020, 43 (7): 1779-1785.
- [7] 陆奇杰, 巢建国, 谷巍, 等. 不同氮素水平对茅苍术光合特性及生理指标的影响 [J]. 植物生理学报, 2017, 53 (9): 1673-1679.
- [8] 赵少丹. 不同氮钾施肥水平对两年生茅苍术产量及品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [9] 剧成欣, 陶进, 钱希阳, 等. 不同年代中粳水稻品种的叶片光合性状 [J]. 作物学报, 2016, 42 (3): 415-426.
- [10] 潘瑞炽, 董恩得. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 53-55.
- [11] 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.



- [12] 张强, 徐飞, 王荣富, 等. 控制性分根交替灌溉下氮形态对番茄生长、果实产量及品质的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (12): 3547-3555.
- [13] 段云晶, 王康才, 牛灵慧, 等. 不同氮素形态与配比对桔梗生长及桔梗皂苷 D 含量的影响 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40 (19): 3754-3759.
- [14] 唐晓清, 肖云华, 赵雪玲, 等. 不同氮素形态及其比例对松蓝生物学特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (1): 129-138.
- [15] 张福锁. 土壤与植物营养研究新动态 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1993: 42, 75.
- [16] 刘新亮, 唐星林, 黄文超, 等. 施氮对镉胁迫下龙葵生长和光合特性的影响 [J]. 西部林业科学, 2021, 50 (6): 24-30.
- [17] 易晓芸, 徐华勤, 杨知建. 施氮量对一年生黑麦草光合特性的影响 [J]. 分子植物育种, 2020, 18 (5): 1717-1724.
- [18] 孟军, 陈温福, 徐正进, 等. 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报 [J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32 (4): 247-249.
- [19] 苏芸芸, 王康才, 薛启. 氮素形态对藿香光合作用、氮代谢及品质的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2016, 39 (4): 543-549.
- [20] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用 [J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 507-515.
- [21] 曲晓莲, 李耕, 仲锦维, 等. 尿素类型与施肥深度对冬小麦花后旗叶光合特性与产量的影响 [J]. 山东农业科学, 2021, 53 (12): 88-95.
- [22] 彭金凤, 刘婷婷, 许桂玲, 等. 超级杂交稻叶片光合特性、光合氮素利用效率和产量对不同施氮量的响应 [J]. 中国稻米, 2021, 27 (3): 30-36.
- [23] 徐国伟, 江孟孟, 陆大克, 等. 干湿交替灌溉与氮肥形态耦合对水稻光合特性及氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (7): 1239-1250.

Effects of different nitrogen forms on leaf photosynthetic characteristics and photosynthetic nitrogen use efficiency of *Atractylodes lancea*

MA Guo-zhu^{1, 2}, ZHANG Li^{2*}, FU Guo-zhan¹, WANG Jing^{3*}, ZHANG Yan-ling², XIN Long-fei², SUN Wan-hui², CHENG Yi-xin² (1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023; 2. School of Agriculture, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang Henan 464002; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for nitrogen utilization efficiency in the cultivation of *Atractylodes lancea* (Thunb.), a field experiment with annual rhizome of *A. lancea* was carried out to study the effects of different nitrogen forms on the photosynthetic characteristics and nitrogen absorption. Four different nitrogen forms were without nitrogen (CK), amide nitrogen fertilizer (ANF), nitrate nitrogen fertilizer (NNF) and ammonium nitrogen fertilizer (NHF), and the photosynthetic parameters, biomass and photosynthetic nitrogen use efficiency (PNUE) were analyzed. The result showed that application of nitrogen fertilizer improved leaf photosynthetic characteristics. The increments of SPAD value, apparent quantum efficiency, maximum net photosynthetic rate, light saturation point, net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate under NNF treatment were the highest, but light compensation point and intercellular carbon dioxide concentration under NNF treatment were significantly lower than those of the other treatments. Meanwhile, NNF treatment promoted nitrogen uptake and plant growth by increasing leaf area and reducing specific leaf weight, which increased the biomass by 6.89% and 17.05%, respectively, compared with NNF and NHF treatments. In addition, PNUE under NNF treatment was increased by 2.43% and 6.76%, respectively, compared with NHF and ANF treatments, and achieved the highest value. These results indicated that *A. lancea* was more sensitive genotype to nitrate nitrogen, application of nitrate nitrogen fertilizer was most suitable for promoting leaf photosynthetic capacity and nitrogen utilization.

Key words: *Atractylodes lancea*; nitrogen forms; photosynthetic characteristics; photosynthetic nitrogen use efficiency