西北林学院学报 2019,34(6):49-54
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.06.08

水培条件下毛竹幼苗的氮响应研究

侯利涵[1],黄孝凤[1],陈慧晶[1],邹　娜[1,2*],杨清培[2]

(1.江西农业大学 园林与艺术学院,江西 南昌 330045;2.江西农业大学 江西省竹子种质资源与利用重点实验室,江西 南昌 330045)

摘　要:为进一步了解毛竹幼苗的不同氮响应特征,采用室内可控水培方式,研究毛竹幼苗对不同氮浓度(0.1、8 mmol·L^{-1})和形态(铵态氮 NH_4^+、硝态氮 NO_3^-)的响应。结果表明,铵态氮处理下的毛竹生物量和体内氮含量等优于等浓度的硝态氮处理,并且不同氮处理下毛竹幼苗各部分干重和氮含量由大到小趋势均为叶>根>茎和叶>茎>根。生物量和根冠比随着N处理浓度的增加而减少,但各部位N含量却随着N浓度的增加而显著增加。毛竹体内N含量与根系构型各指标的相关性分析结果表明,根长、根表面积和根体积是决定毛竹植株根系养分吸收能力的重要因素。但随着 NH_4^+ 处理浓度的增加,根长、根表面积和根系体积均受到一定程度的抑制,并且低于 NO_3^- 处理幼苗根系构型各指标。因此,这些结果表明毛竹生长和N积累表现出铵氮偏好,但浓度过高时对植物生长又表现出抑制效应。

关键词:毛竹;幼苗;水培;铵态氮;硝态氮

中图分类号:S795　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1001-7461(2019)06-0049-06

Growth Response of *Phyllostachys edulis* Seedlings to Different Nitrogen Concentrations under Hydroponic Conditions

HOU Li-han[1], HUANG Xiao-feng[1], CHEN Hui-jing[1], ZOU Na[1,2*], YANG Qing-pei[2]

(1. *College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *Jiangxi, China*;
2. *Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *Jiangxi, China*)

Abstract: To further understand the nitrogen response characteristics of bamboo (*Phyllostachys edulis*) seedlings, indoor nutrient solution hydroponic method was used to study the responses of the seedlings to different nitrogen concentrations (0.1 mmol·L^{-1}, 8 mmol·L^{-1}) and forms (NH_4^+-N, NO_3^--N). The results showed that under different nitrogen form treatments, the dry weight and nitrogen content of different parts of bamboo seedlings showed a tendency from large to small as leaf>root>stem&leaf>stem>root. Biomass and nitrogen content of ammonium-N treated seedlings were higher than those of nitrate-N treated seedlings with the same nitrogen concentrations. Biomass and root-shoot ratio decreased with the increase of N concentration, but N content of each part increased significantly with the increase of N concentration. With the increase of NH_4^+ concentration, the growths of root length, root surface area and root volume were inhibited, and the root architecture of NO_3^--N treated seedlings was better than that of NH_4^+-N treated ones. Correlation analysis between nitrogen content in roots and root architecture showed that root length, root surface area and root volume were important factors in determining the nutrient uptake capacity of roots in bamboo. These results indicated that bamboo growth and N accumulation showed

收稿日期:2018-12-24　**修回日期:**2019-04-17

基金项目:江西省研究生创新专项资金项目(YC2018-189);国家自然科学基金青年科学基金项目(31300521);江西省自然科学青年基金重点项目(20171ACB21027)。

作者简介:侯利涵,男,硕士在读,研究方向:植物氮营养。E-mail:hlh0075@163.com

* **通信作者:**邹　娜,女,博士,副教授,研究方向:园林植物栽培与氮营养生理。E-mail:nzouyy@126.com

ammonium nitrogen preference. However, when the concentration was too high, it showed an inhibitory effect on plant growth. The research results could provide a theoretical reference for the rational application of N fertilizer in bamboo seedlings.

Key words: *Phyllostachys edulis*; seedling; hydroponics; ammonium nitrogen; nitrate

毛竹(*Phyllostachys edulis*)为禾本科竹亚科刚竹属常绿乔木状竹类植物,是我国竹类植物中分布最广、蓄积量最多、用途最广泛的竹种,有着重要的经济价值和生态价值[1]。竹子由于其自身的生物学特性,长期以来人们一直沿用埋鞭等无性繁殖的方式发展竹林。通过无性繁殖可以将选出的优良无性系进行扩大繁殖,获得最大的遗传增益,但挖苗、种植都费工费力,而且消耗竹材,成本高、效率低,严重地制约了毛竹林面积的快速增加和产业发展[2]。而毛竹种子育苗具有投资少、成本低,起运栽植方便及造林成活率高等优点,且造林成本远低于母竹造林,为开花竹林的更新及引种提供了新的途径和技术[3-4]。

氮(N)是植物需求量最大的矿质营养元素之一,因其营养和生理重要性,也是植物生长发育过程中最常见的限制因子[5]。其中,NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是植物可直接吸收利用的主要无机氮形态,但由于外界环境条件、植物种类和 N 源本身营养特点等差异较大,植物在氮吸收能力、生理反应、生长速度等方面表现出明显的喜硝性(或喜铵性)[6-7]。但目前毛竹幼苗生长的氮形态偏好还存在争议:本课题组前期盆栽试验研究结果表明毛竹的氮形态偏好受氮浓度的影响,随着供氮浓度提高,毛竹幼苗生长表现出明显的铵氮偏好[8],而李国栋等[9]的研究结果表明毛竹为弱喜硝植物,当氮源全部为 NH_4^+-N 时,毛竹实生苗最终死亡。

由于土壤养分空间异质性及随季节的变化,土壤溶液中不同形态氮浓度变化范围很大(从<100 μmol·L^{-1}到>10 mmol·L^{-1}),为了应对土壤溶液中氮浓度的变化,植物体内进化了不同的氮吸收系统:即饱和高亲和系统(HATS)和构成型低亲和系统(LATS),并分别于根际溶液 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度较低时(<0.5 mmol·L^{-1})和浓度大约$>0.5\sim1$ mmol·L^{-1}时起作用[10-12]。水培是无土栽培的主要形式之一,作为一种重要的研究手段,因它可以人为控制营养液中的养分、酸碱度和温度等环境条件,在蔬菜和花卉栽培中得到了广泛的应用[13-15],并且作为一种培养手段,可以观察根系的生长情况,进行根系矿质元素的吸收转移、缺素或重金属胁迫等的技术平台。

因此本研究在前期研究的基础上,采用室内水培的方式,在基本营养液、pH、温度、光照周期等外界条件一致的情况下研究溶液中供应高低浓度的 NH_4^+ 和 NO_3^- 对毛竹幼苗生长、N 吸收和根系构型的影响,以期进一步明确毛竹幼苗生长的 N 形态偏好并为毛竹种子育苗合理施用 N 肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为毛竹种子,采自广西桂林灌阳县洞井乡,采种后放置 4℃冰箱保存。毛竹种子千粒重约 30 g。

1.2 试验设计

用 10%次氯酸钠溶液将毛竹种子表面消毒后播入蛭石进行萌发,待长出 3 片真叶时,挑选地上部和根系生长一致的幼苗,移栽到塑料水培容器(规格为长 30 cm,宽 18 cm,高 14 cm)。在水培条件下,供以基本营养液和不同含量及形态的无机氮源进行培养。设置 2 个不同的 N 营养浓度:一个对应于低 N 浓度 0.1 mmol·L^{-1},一个对应于高 N 浓度 8 mmol·L^{-1};2 种不同 N 形态:NH_4^+-N 以 $(NH_4)_2SO_4$ 形式提供,NO_3^--N 以 $NaNO_3$ 形式提供。所有营养液中均添加硝化抑制剂双氰胺($C_2H_4N_4$,7 μmol·L^{-1})抑制硝化作用,用 pH 计(METTLER TOLEDO FE20)和 0.1 mol·L^{-1} NaOH 或 0.1 mol·L^{-1}HCL 调节所有处理的营养液 pH 值保持在 4.0 左右。每 2 d 更换 1 次营养液,用于配置不同 N 处理的营养液组成见顾红梅等[8]。人工气候箱的培养条件为:温度 25±1℃,光周期 12 h/d,光照强度 4 000 lx。试验设 3 次重复,每重复 6 盆。

1.3 测定项目与方法

将幼苗从水培箱完整取出,在超纯水中洗净,根系用 EPSON ® COLORIMAGE SCANNER-LA1600+扫描仪扫描,再用根系图象分析软件 WinRHIZO 2005 对各处理根系体积、表面积、总长、根尖数和平均直径进行定量测定。

幼苗分根、茎和叶洗净后,用吸水纸吸干表面水分,放入烘箱,经杀青(105℃,30 min)后 70℃烘至恒重并称重,分别称重,样品生物量即各部分干重之和,干样密封保存待测。干样粉碎后经 H_2SO_4-H_2O_2 消煮预处理,采用全自动凯氏定氮仪测定植株氮含量。

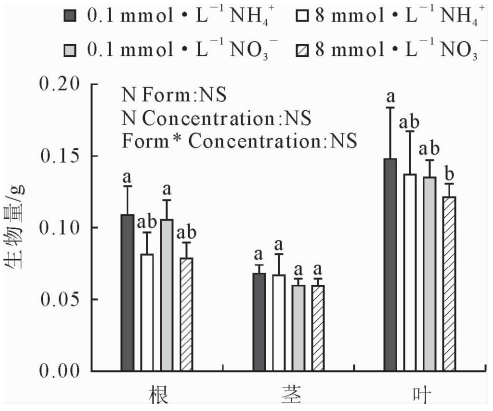
1.4 数据处理

所有数据处理采用 Excel2010 和 SPSS13.0 进行统计分析,图表使用 Sigmaplot10.0 生成并由 Photoshop 排版。

2 结果与分析

2.1 不同 N 浓度及形态对毛竹生物量和根冠比的影响

由图 1 可以看出,不同氮处理下,毛竹幼苗各部分干重由大到小趋势均为叶>根>茎。以低铵(0.1 mmol·L^{-1} NH_4^+)处理时根、茎和叶干重都达最大,分别为 0.10、0.06 g 和 0.14 g,而高硝(8 mmol·L^{-1} NO_3^-)处理时根、茎和叶干重都为最小,分别为 0.07、0.05 g 和 0.12 g。



注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1　不同 N 浓度及形态对毛竹根、茎、叶干重的影响

Fig. 1　Effects of different N concentrations and forms on the dry weight of roots, stems and leaves of *P. edulis*

相同氮浓度时,铵态氮(NH_4^+)处理下毛竹幼苗各部分干重大于硝态氮(NO_3^-)处理,并且在低浓度(0.1 mmol·L^{-1})和高浓度(8 mmol·L^{-1})时根、茎和叶分别提高 3.12%、13.90%、9.38% 和 3.17%、12.60%、13.19%;相同形态下,低浓度处理下毛竹幼苗各部分干重大于高浓度处理,0.1 mmol·L^{-1} NH_4^+ 处理的根、茎和叶各部分干重分别比 8 mmol·L^{-1} NH_4^+ 处理的提高了 34.07%、1.49% 和 7.79%,0.1 mmol·L^{-1} NO_3^- 处理的根、茎和叶各部分干重分别比 8 mmol·L^{-1} NO_3^- 处理的提高 34.14%、0.33% 和 11.54%。双因素方差分析结果表明,不同氮浓度(0.1 和 8 mmol·L^{-1})对各部位间生物量影响差异不显著,氮形态(NH_4^+ 和 NO_3^-)对各部位间生物量差异也未达到显著水平,氮浓度和氮形态的交互作用对各部位间生物量影响差异不大。

根冠比是指植物地下与地上部干重的比值,它能反映植物的生长状况及根系与地上部分生长对环境条件的不同响应[16]。本试验中,毛竹幼苗根冠比随着氮浓度和氮形态的变化而改变:在相同氮形态下,低浓度处理时根冠比大于高浓度,在铵态氮和硝态氮处理下分别提高 27.68% 和 23.95%;相同氮浓度下,硝态氮处理时的根冠比大于铵态氮,在低浓度(0.1 mmol·L^{-1})和高浓度(8 mmol·L^{-1})时分别提高 6.64% 和 9.86%。

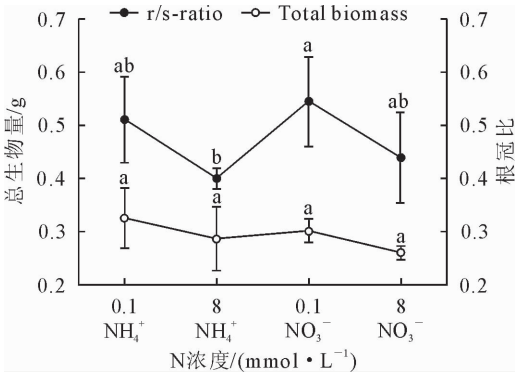


图 2　不同 N 浓度及形态对毛竹总生物量及根冠比的影响

Fig. 2　Effect of different N concentrations and forms on total biomass and root-shoot ratio of *P. edulis*

2.2 不同 N 浓度及形态对毛竹根系构型的影响

毛竹实生苗地下根系为须根,根系发达。表 1 表明,不同氮浓度和形态对毛竹根系各参数影响不同,其中根长、根表面积、根体积和根平均直径在低硝(0.1 mmol·L^{-1} NO_3^-)处理时最大,在高铵(8 mmol·L^{-1} NH_4^+)处理时最小。就 NO_3^- 而言,低硝和高硝相比,根长、根表面积、根体积和根平均直径等生长指标在高硝处理时受到了一定的抑制,高浓度相对低浓度降低了 14.04%、16.91%、20.69% 和 3.17%,但两浓度处理间差异不显著。就 NH_4^+ 而言,随着 NH_4^+ 处理浓度的增加,根长、根表面积、根系体积和根平均直径在高铵处理时也均受到一定程度的抑制,高浓度相对低浓度降低了 28.46%、25.17%、20.00% 和 3.63%,其中根长差异显著($P<0.05$)。相同浓度条件下,NO_3^- 处理幼苗根长、根表面积、根系体积、根平均直径和根尖数等根系构型各指标优于 NH_4^+ 处理幼苗,在低浓度(0.1 mmol·L^{-1})时分别提高了 3.01%、19.30%、45.00%、14.54% 和 3.82%,在高浓度(8 mmol·L^{-1})时分别提高了 20.52%、32.47%、43.75%、15.09% 和 1.75%,其中根系体积和平均直径显著大于 NH_4^+ 处理。

双因素方差分析结果表明,氮形态对毛竹根系体积和直径的影响达到极显著水平($P<0.01$),对根表面积的影响达到显著水平;氮浓度对根长和根平均直径的影响达到显著水平,对根表面积的影响达到极显著水平。氮形态和氮浓度间的交互作用对毛竹根系构型各指标均没有显著性影响。

2.3 不同 N 浓度及形态对毛竹幼苗体内 N 含量的影响

毛竹幼苗根、茎和叶各部分氮含量整体以叶中最大，其次是茎，而根中最小(表 2)，并且各部位 N 含量均随着 N 浓度的增加而显著增加，在 8 mmol·L^{-1} NH_4^+ 处理下达最大，根、茎和叶 N 含量分别为 2.05、2.11 g·kg^{-1} 和 3.27 g·kg^{-1}，0.1 mmol·L^{-1} NO_3^- 处理下各部位 N 含量最小，根、茎和叶 N 含量分别为 1.24、1.42 g·kg^{-1} 和 2.61 g·kg^{-1}。此外，相同浓度下，铵态氮处理的毛竹根、茎和叶各部分 N 含量大于硝态氮，在低浓度时提高 121.77%、104.23% 和 111.11%，高浓度时提高 123.50%、119.21% 和 106.17%，除了低浓度(0.1 mmol·L^{-1})处理条件下的茎及高浓度(8 mmol·L^{-1})处理条件下的叶之外，铵氮处理条件下的毛竹体内 N 含量均显著高于硝处理。双因素方差分析结果表明，N 形态对毛竹各部位 N 含量差异极显著($P<0.01$)；N 浓度对毛竹根部 N 含量有极显著差异，对茎和叶有显著性差异。N 形态和 N 浓度间的交互作用对毛竹幼苗各部位 N 含量影响无明显差异。

表 1 不同 N 浓度及形态对毛竹根系构型的影响

Table 1 Effects of N concentration and forms on root configuration of *P. edulis*

N 浓度/(mmol·L^{-1})	N 形态	根长/cm	根表面积/cm^2	根体积/cm^3	根平均直径/cm	根尖数
0.1	NH_4^+	89.62±8.40a	15.02±1.51ab	0.20±0.02bc	0.55±0.01b	199.27±18.92a
	NO_3^-	89.89±5.87a	17.92±1.40a	0.29±0.03a	0.63±0.02a	206.88±14.31a
8	NH_4^+	64.11±4.88b	11.24±0.91b	0.16±0.01c	0.53±0.01b	231.61±21.99a
	NO_3^-	77.27±6.138ab	14.89±1.18ab	0.23±0.02ab	0.61±0.01a	235.66±23.43a
P-values	Form	NS	*	* *	* *	NS
	Concentration	*	* *	NS	*	NS
	Form * Concentration	NS	NS	NS	NS	NS

注：表中的值为平均值±SE，* 表示 $P<0.05$；* * 表示 $P<0.01$；ns 表示无显著性。下同。

表 2 不同 N 浓度及形态对毛竹各部分 N 含量的影响

Table 2 Effects of different N concentrations and forms on nitrogen content in different parts of *P. edulis*

不同 N 水平	N 含量/(g·kg^{-1})	部位			
		根	茎	叶	整株
0.1 mmol·L^{-1}	NH_4^+	1.51±0.06b	1.48±0.04c	2.90±0.04b	5.89±0.08bc
	NO_3^-	1.24±0.08c	1.42±0.09c	2.61±0.03c	5.27±0.11c
8 mmol·L^{-1}	NH_4^+	2.05±0.05a	2.11±0.07a	3.27±0.07a	7.43±0.15a
	NO_3^-	1.66±0.09b	1.77±0.06b	3.08±0.12ab	6.52±0.26b
P-values	Form	* *	* *	* *	* *
	Concentration	* *	*	*	* *
	Form * Concentration	NS	NS	NS	NS

2.4 毛竹体内 N 含量与根系构型的相关性

毛竹体内整株 N 含量与根系构型各参数之间的相关系数见表 3。结果表明，毛竹体内 N 含量与根长、根表面积、根体积之间的相关性极显著，相关系数分别为 0.716、0.761 和 0.698，而与根平均直径和根尖数之间无相关关系。因此，结果表明根长、根表面积和根体积是决定毛竹植株根系养分吸收能力的重要因素。

表 3 毛竹体内 N 含量与根系构型的相关性

Table 3 Correlation between nitrogen content and root architecture of *P. edulis*

	N 含量/(g·kg^{-1})	根长/cm	根平均直径/cm	根表面积/cm^2	根体积/cm^3	根尖数
N 含量/(g·kg^{-1})	1	—	—	—	—	—
根长/cm	0.716* *	1	—	—	—	—
根平均直径/cm	0.283	0.016	1	—	—	—
根表面积/cm^2	0.761* *	0.892* *	0.426	1	—	—
根体积/cm^3	0.698* *	0.691* *	0.693	0.942* *	1	—
根尖数	0.298	0.246	0.138	0.271	0.245	1

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 不同 N 浓度及形态对毛竹地上部生长和 N 含量的影响 在本研究中，相同 N 浓度下，毛竹根茎叶各部分生物量在铵态 N 条件下优于硝态 N(图 1)，表明毛竹幼苗生长偏喜铵态 N，这与我们前期研究结果即毛竹为喜铵植物相一致[8]。铵态 N 对毛竹幼苗生长的促进可能与毛竹偏向吸收铵态 N，以及因 N 形态而异的植物体内 N 含量积累差异有关

(表 2)[17]。毛竹主要分布在我国南方亚热带地区,土壤中无机氮的主要形式始终是 NH_4^+-N[18],这与毛竹在氮素形态上偏喜铵向吻合,同时也与大多数在酸性土壤上生长的针叶树种通常喜铵相一致[6]。此外,在亚热带人工林中种植的 9 种主要树种也被研究证实偏向吸收铵态氮[19]。因此,植物在生长和 N 吸收中表现出的形态偏好(即明显的喜铵性),可能是其在长期的进化过程中,形成的对原生氮营养生境的生态适应。

通常,N 缺乏条件下植物有更高的根冠比,过量 N 条件下植物根冠比变小[20],本研究支持这一观点:随着供 N 浓度提高,毛竹根冠比呈下降趋势,可能主要与高氮条件下的根系生物量积累受抑制有关(图 1)。研究表明,施 N 不足或过多均不利于植物生物量的积累,然而,N 缺乏、充足和毒害在不同无机氮形态中都可能发生,但不同植物生物量积累对不同 N 形态响应的最佳浓度点可能不同[7]。在低浓度(0.1 mmol·L^{-1})时,N 形态对毛竹幼苗生长差异影响很小,如根茎叶各部分干重及根冠比等在不同氮形态间的差异均未达到显著水平(图 1),推测 0.1 mmol·L^{-1}N 对毛竹生长来说不足,植物已经耗尽了所供应的 N,但仍未达到最佳生长状态所需要的养分。随着供 N 浓度的提高,毛竹体内 N 含量显著增加可以部分的支持该观点。在高浓度(8 mmol·L^{-1})时,铵态氮处理下毛竹幼苗根茎叶各部位氮含量高于硝态氮(表 2),表明毛竹幼苗对 NH_4^+ 吸收量大于 NO_3^-。因此,推测 0.1 mmol·L^{-1} 和 8 mmol·L^{-1} N 对毛竹来说,可能处于 N 缺乏和毒害的浓度范围。顾红梅等[8]研究结果也表明,0.4 mmol·L^{-1}N 素形态差异对盆栽毛竹造成的生长差异很小甚至是不存在的,但随着 N 素浓度的提高,氮素形态差异造成的生长差异逐渐增大,并在 8 mmol·L^{-1} NH_4^+ 处理条件下生长最好。与顾红梅等[8]研究中的 8 mmol·L^{-1} NH_4^+ 显著促进毛竹各指标生长不同,本研究中 8 mmol·L^{-1} NH_4^+ 和 NO_3^- 对毛竹幼苗生长与低浓度相比起抑制作用,表明在不同的培养体系中毛竹的 N 响应浓度不同,其可能的原因是水培中营养液对植物的影响效应比固体基质栽培中的更强烈。虽然不同栽培方式下毛竹幼苗生长的 N 响应浓度不同,但本研究结果表明毛竹还是偏向吸收 NH_4^+,这也与宋庆妮等[18]野外试验的研究结果相一致,即毛竹对 NH_4^+-N 有一定的偏向吸收性。而与李国栋等[9]的研究结果即毛竹为弱喜硝氮植物,高铵使幼苗致死相矛盾,推测可能所使用的培养体系及植物生长环境不同,尚待进一步研究分析。

3.1.2　不同 N 浓度及形态对毛竹根系构型的影响

根系是植物吸收 N 的主要器官,根系的大小和构型是确保植物获取充足 N 的重要因素,而同时又受 N 供应的影响最为明显[21-22]。本研究结果表明,毛竹体内氮含量与根长、根表面积、根体积之间的相关性极显著(表 3),这说明根长、根表面积和根体积是毛竹根系吸收养分的关键因子。本试验研究中,低浓度氮处理下毛竹根长显著高于高浓度(表 1)。其原因可能是缺 N 会促进主根的生长或侧根的生长和发育[23],而浓度过高(分别>5 mmol·L^{-1} 和>10 mmol·L^{-1})则起抑制作用[24-25]。本试验结果还表明,在高浓度(8 mmol·L^{-1})处理下硝态 N 相比于铵态氮对毛竹根系构型各指标(根长、根表面积、根体积、根平均直径和根尖数)生长有较好的效果,因此推测在 8 mmol·L^{-1} 铵态 N 处理下毛竹根系生长可能受到一定的铵毒害作用,并且铵态氮处理下的氮含量大于硝态 N,表明铵对植物生长的毒害(抑制根系生长)可能与铵态 N 处理条件下毛竹体内过高的铵 N 积累有关。根系对高浓度 NH_4^+ 的摄取,表现为无饱和动力学特征且无下调机制,浓度越高,吸收得越多,此时极易产生 NH_4^+ 的过度吸收,造成 NH_4^+ 在植物体内组织及根细胞内的大量积累[26]。此外,NH_4^+ 被吸收后主要在根系中同化为氨基酸,以氨基酸、酰胺形式向上运输[27],当植物吸收的 NH_4^+ 超过同化的量时,也会造成 NH_4^+ 的大量累积[28-29],从而危害植物。

3.2　结论

铵态 N 处理下毛竹根茎叶各部分生物量和体内 N 含量等优于硝态 N 处理,这些结果表明毛竹偏喜铵态 N。增加 N 浓度能促进毛竹体内氮含量的积累,但是过高的 N 浓度会抑制生物量积累和根系构型各指标生长,即对毛竹产生毒害作用。因此,水培体系中最适宜毛竹生长的铵态 N 浓度还有待于进一步研究。此外,毛竹体内 N 含量与根系构型各指标的相关性分析结果表明,根长、根表面积和根体积是决定毛竹植株根系养分吸收能力的重要因素。

参考文献:

[1]　江泽慧. 世界竹藤[M]. 北京:中国林业出版社,2008:1-5.

[2]　陈光才,马乃训. 竹子遗传育种研究进展[J]. 林业科学研究,2005,18(6):749-754.
CHEN G C, MA N X. Advances in studies on genetics and breeding of bamboos[J]. Forest Research, 2005, 18(6): 749-754. (in Chinese)

[3]　蔡春菊,彭镇华,高健,等. 毛竹种子萌发特性研究[J]. 中国农学通报,2008,24(12):163-167.
CAI C J, PENG Z H, GAO J, *et al*. Seed germination characteristics of *Phyllostachys edulis*[J]. Chinese Agricultural Science

Bulletin,2008,24(12):163-167. (in Chinese)

[4] 郭龙梅,姜仟坤,曹帮华,等. 浸种温度与时间对毛竹种子发芽的影响研究[J]. 世界竹藤通讯,2016,14(2):19-22.
GUO L M,JIANG Q K,CAO B H,*et al*. Effects of soaking time and temperature on germination of moso bamboo seeds[J]. World Bamboo and Rattan,2016,14(2):19-22. (in Chinese)

[5] 李贵才,韩兴国,黄建辉,等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报,2001,21(7):1187-1195.

[6] 崔晓阳,宋金凤. 原始森林土壤 NH_4^+/NO_3^- 生境特征与某些针叶树种的适应性[J]. 生态学报,2005,25(11):290-300.
CUI X Y,SONG J F. Soil NH_4^+/NO_3^- nitrogen characteristics in primary forests and the adaptability of some coniferous species[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(11):290-300. (in Chinese)

[7] BRITTO D T,KRONZUCKER H J. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants[J]. Annals of Botany,2013,112(6):957-963.

[8] 顾红梅,邓光华,黄玲,等. 毛竹幼苗对不同氮含量及形态的营养响应[J]. 竹子学报,2016,35(3):44-49,54.
GU H M,DENG G H,HUANG L,*et al*. Growth response of bamboo seedlings to nitrogen nutrition in *Phyllostachys heterocycla* cv. pubescens[J]. Journal of Bamboo Research,2016,35(3):44-49,54. (in Chinese)

[9] 李国栋,胡骁伟,牟梦晓,等. 不同氮素形态及配比对毛竹实生苗生长及养分吸收的影响[J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2014,43(2):151-155.
LI G D,HU X W,MOU M X,*et al*. Effects of different nitrogen forms and ratios on the growth and nutrients absorption of bamboo seedlings[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University:Natural Science Edition,2014,43(2):151-155. (in Chinese)

[10] XU G,FAN X,Miller A J. Plant Nitrogen assimilation and use efficiency[J]. Annual Review of Plant Biology,2012,63(1):153-182.

[11] CRAWFORDA N,GLASS A D. Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants[J]. Trends in Plant Science,1998,3(10):389-395.

[12] LUDEWIG U,NEUHAUSER B,DYNOWSKI M. Molecular mechanisms of ammonium transport and accumulation in plants[J]. Febs Letters,2007,581(12):2301-2308.

[13] 闫冬,丁库克,何映雪,等. 3 种植物在水培方式下对锶的富集和迁移实验研究[J]. 癌变·畸变·突变,2019,31(1):64-68.
YAN D,DING K K,HE Y X,*et al*. Accumulation and migration of strontium in three plants under hydroponic culture[J]. Carcinogenesis,Teratogenesis & Mutagenesis,2019,31(1):64-68. (in Chinese)

[14] 张阿芳,张庆,代惠萍,等. 镉胁迫对银灰杨根和叶片渗透调节物质的影响[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):83-87.
ZHANG A F,ZHANG Q,DAI H P,*et al*. Effects of cadmium stress on the osmotic adjustment substance of *Populus canescens* in leaves and roots[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):83-87. (in Chinese)

[15] 李文明,张岳,辛建攀,等. 酸碱处理对棱枝山矾生长和生理的影响[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):68-73.
LI W M,ZHANG Y,XIN J P,*et al*. Effects of acid and alkali treatment on the growth and physiology of *Symplocos tetragona*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(1):68-73. (in Chinese)

[16] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):282-289.
WANG Y Z,LIU X W,SUN H Y,*et al*. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2013,21(3):282-289. (in Chinese)

[17] NORISADA M,KOJIMA K. Nitrogen form preference of six dipterocarp species[J]. Forest Ecology & Management,2005,216(1):175-186.

[18] 宋庆妮,杨清培,刘骏,等. 毛竹扩张对常绿阔叶林土壤氮素矿化及有效性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(2):338-344.
SONG Q N,YANG Q P,LIU J,*et al*. Effects of phyllostachys edulis expansion on soil nitrogen mineralization and its availability in evergreen broadleaf forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(2):338-344. (in Chinese)

[19] LI C C,LI Q R,QIAO N. Inorganic and organic nitrogen uptake by nine dominant subtropical tree species[J]. iForest,2015(9):253-258.

[20] KIBA T,KRAPP A. Plant Nitrogen Acquisition Under Low Availability:Regulation of uptake and root architecture[J]. Plant & Cell Physiology,2016,57(4):707-714.

[21] LÓPEZBUCIO J,CRUZRAMÍREZ A,HERRERAESTRELLA L. The role of nutrient availability in regulating root architecture. [J]. Current Opinion in Plant Biology,2003,6(3):280-287.

[22] UEDA Y,KONISHI M,YANAGISAWA S. Molecular basis of the nitrogen response in plants[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2017,63(4):1-13.

[23] NACRY P,BOUGUYON E,GOJON A. Nitrogen acquisition by roots:physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource[J]. Plant & Soil,2013,370(1-2):1-29.

[24] JOSÉ A,O'BRIEN,VEGA A,*et al*. Nitrate transport,sensing and responses in plants[J]. Molecular Plant,2016,9(6):837-856.

[25] HODGE,ANGELA. The plastic plant:root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. New Phytologist,2010,162(1):9-24.

[26] BRITTO D T,KRONZUCKER H J. Plant nitrogen transport and its regulation in changing soil environments[J]. Journal of Crop Improvement,2006,15(2):1-23.

[27] GIVAN C V. Metabolic detoxification of ammonia in tissues of higher plants[J]. Phytochemistry,1979,18:375-382.

[28] MOROT-GAUDRY J F,CHAILLOU S,LAMAZE T. Nitrogen Assimilation by Plants:Physiological,Biochemical,and Molecular Aspects [M]. New Hampshire:Science Publishers Inc.,2001:80-85.

[29] REDDY K S,MENARY R C. Nitrate reductase and nitrate accumulation in relation to nitrate toxicity in *Boronia megastigma*[J]. Physiologia Plantarum,1990,78(3):430-434.