

氮素营养对苗期菘蓝叶中硝酸还原酶活性 与矿质元素吸收的影响

唐晓清, 肖云华, 王康才, 吕婷婷

(南京农业大学 园艺学院, 南京 210095)

摘要: 采用正交试验设计, 研究铵态氮、硝态氮和酰胺态氮 3 种氮素形态及其不同浓度配比对苗期菘蓝的单株干重、叶内的硝酸还原酶活性及矿质元素吸收的影响。结果显示: (1) 影响苗期菘蓝单株干重的氮素形态依次为酰胺态氮 > 铵态氮 > 硝态氮。 (2) 不同氮素形态对叶片硝酸还原酶活性影响有差异, 铵态氮影响最大, 其次是硝态氮和酰胺态氮。 (3) 不同形态氮素配合施用后均能促进 P、K、Ca、Mg、Cd、Mn、Cr、Sr 8 种元素的吸收, 但不利于 Ni 和 Fe 的吸收; 元素吸收受铵态氮影响最大的矿质元素有 K、Ba、Se、Ni、B、Si、Fe 7 种元素, 受硝态氮影响最大的元素有 P、Cd、Ti、Al、Cu 5 种元素, 受酰胺态氮影响最大的元素有 Na、Ca、Mg、Zn、Mo、Mn、Cr、Sr 8 种元素。研究表明, 不同形态氮素对苗期菘蓝吸收矿质元素的影响存在很大的差异, 应注重酰胺态氮与无机的铵态氮、硝态氮的配合施用; 适宜氮素形态及其配比能提高叶中硝酸还原酶的活性并促进矿质元素的吸收, 从而有效地促进菘蓝的生长。

关键词: 菘蓝; 氮素营养; 硝酸还原酶; 矿质元素; 正交设计

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effect of Nitrogen Nutrition on Nitrate Reductase Activity and Mineral Elements Absorption of *Isatis indigotica* Fort. at Seeding Stage

TANG Xiaoqing, XIAO Yunhua, WANG Kangcai, LÜ Tingting

(Horticulture College, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: We studied the dry weight of individual plant, nitrate reductase activity and mineral elements absorption of leaves under three nitrogen forms and different concentration ratios by the use of orthogonal design, which were ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and the amide nitrogen. The results showed that: (1) There were different dry weights by different nitrogen forms, which amide nitrogen was the most important nitrogen form, followed by ammonium and nitrate nitrogen; (2) There were different nitrate reductase activities in leaves by different nitrogen forms, which ammonium nitrogen was the most important nitrogen form, followed by nitrate and amide nitrogen; (3) The combined application of different nitrogen forms can promote absorption of phosphorus P, potassium K, calcium Ca, Mg, Cd, manganese Mn, chromium Cr, strontium Sr elements, but it is not beneficial to the absorption of nickel Ni, and iron Fe. Seven mineral elements, which were affected the most significantly by ammonium nitrogen, were K, Ba, Se, Ni, B, Si and Fe. Five elements, namely P, Cd, Ti, Al and Cu were affected the most significantly by nitrate nitrogen, and Na, Ca, Mg, Zn, Mo, Mn, Cr and Sr elements were affected by amide nitrogen. There were obviously differences among the effect of mineral elements absorption by different nitrogen forms. We should focus on the construction of the morphogenesis in the seeding stages of *Isatis indigotica*, and pay more attention to the combined application between the amide nitrogen and inorganic ammonium nitrogen, nitrate nitrogen. The appropriate nitrogen forms and ratios can increase nitrate reductase activity and promote minerals elements

收稿日期: 2013-04-26; 修改稿收到日期: 2013-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(31171486)

作者简介: 唐晓清(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为药用植物栽培与中药质量控制。E-mail: xqtang@njau.edu.cn

absorption, thereby promote the growth of *I. indigotica*.

Key words: *Isatis indigotica* Fort.; nitrogen nutrition; nitrate reductase; mineral element; orthogonal design

氮素作为植物生长最重要的营养元素,既是植物最重要的结构物质,又是生理代谢中最活跃、无处不在的重要物质——酶的主要成分,所以氮素对植物生理代谢和生长有重要作用。而且,氮素形态不同,对植物生理代谢过程影响不同,从而对植物生长产生不同的效应,也能影响植物对矿质元素的吸收^[1]。而矿质元素不仅对人体健康有重要调节作用,它们的缺失和不足会造成循环系统紊乱甚至生长停滞。硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)是植物氮素同化的限速酶,可直接调节硝酸盐还原,从而调节氮代谢,并影响到光合碳代谢。Narumol 等^[2]对 *Cyperus laevigatus* 研究表明,单独供给 NH_4^+ 的植株叶内硝酸还原酶活性显著低于供给 NO_3^- 或 NH_4NO_3 植株。目前对于铵态氮-硝态氮-酰胺态氮 3 种不同氮素形态的研究也日益增加^[3-4]。张梦等^[5]研究发现,在烤烟水培漂浮育苗系统中,氮的表现利用率由高到低依次为硝态氮源>酰胺态氮源>硝酸铵>铵态氮源;尿素添加少量的硝态氮是烤烟漂浮育苗培养壮苗最佳的氮源选择。李先信等^[6]报道,不同形态氮素(硝态氮和铵态氮)对脐橙根系生长、发枝与枝梢生长以及叶片矿质元素含量都具有十分显著的影响,适当浓度的硝态氮和铵态氮对比对地上地下部生长具有显著的促进作用,比单独使用硝态氮效果更好,且两者的浓度比以 2:1 为最佳;在氮素浓度不变的情况下,随营养液中 NH_4^+ 的增多与 NO_3^- 的减少,叶片中的 N、P、Fe 含量显著增加,而叶片中 Ca、Mg、B 的含量则显著减少,叶片中元素 Mn、Cu 和 Zn 的含量呈上升趋势,而 K 的含量则呈现出先升后降的趋势。

菰蓝(*Isatis indigotica* Fort.)作为常用中药板蓝根与大青叶的原植物^[7],在其栽培生产中需要提高其产量与质量,合理有效地利用氮素对于提高药材板蓝根与大青叶的质量具有重要意义。晏枫霞等研究表明, NH_4^+-N 比例较高时促进菰蓝对氮和磷的积累, NO_3^--N 比例较高时促进其对钾、镁的积累^[8]。但对于 3 种不同形态氮素对菰蓝体内硝酸还原酶活性及矿质元素的吸收尚未进行系统的研究。本试验以菰蓝为研究对象,考察铵态氮-硝态氮-酰胺态氮的不同浓度及比例对苗期菰蓝叶片内硝酸还原酶活性及矿质元素吸收的影响,为菰蓝氮肥的合理施用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器试剂

菰蓝种子来自安徽亳州,经王康才教授鉴定为十字花科植物菰蓝(*Isatis indigotica* Fort.)。实验地点设在南京农业大学实验基地的日光温室内,采用盆栽(外口径 44 cm,底直径 30 cm,高 35 cm)方法,栽培基质由蛭石和珍珠岩按 2:1 的比列混合而成,2012 年 4 月 26 日播种,适时间苗,选择长势一致、真叶 4~5 片的菰蓝幼苗,保证每盆 8 株,于 7 月 30 日采样,分析不同处理叶片的鲜重、硝酸还原酶活性及多种矿质元素的含量。

基本营养液配方中大量元素和微量元素都采用霍格兰营养液配方,基本营养液 pH 6.0。处理营养液是在基本营养液的基础上去除含有氮元素的组成配制而成,pH 6.0。处理中铵态氮(NH_4^+-N)由硫酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 提供,硝态氮(NO_3^--N)由硝酸钾 KNO_3 提供,酰胺态氮由纯脲 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 提供,所有处理液中加入双氰胺(DCD),用量是处理液中纯氮含量的 0.4%。所用试剂为分析纯(AR)。

试验仪器主要包括:Optimal 2100 DV 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 PekinElmer 公司)、MARS X Press 密闭微波消解仪(美国 CEM 公司)、Milli-Q 超纯水系统装置(美国 Millipore 公司)和 BS142S 型分析天平(感量 0.000 1 g)(瑞士 Mettler Toledo 上海有限公司)。试剂主要包括浓硝酸($\phi=65\%$,优级纯),30% H_2O_2 (分析纯),超纯水经 Milli-Q 超纯水处理系统(18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$)得到,标准工作溶液由国家标准物质研究中心购置的各种 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准储备溶液稀释而成,空白为 1.0%硝酸溶液。

1.2 实验设计

采用铵态氮、硝态氮、酰胺态氮三因素的五水平正交实验设计 $\text{L}_{25}(5^3)$,各处理重复 3 次,随机区组排列。待播种的材料出苗后,每隔 10 d 浇灌 1 次基本营养液,每次 500 mL。播种 40 d 后开始氮素处理,每 10 d 浇灌 1 次处理液,每 10 d 浇灌 1 次处理营养液,处理液和处理营养液相隔 5 d 交错进行。各处理水平见表 1,正交设计水平见表 2。

7 月 30 日采样后用蒸馏水清洗干净,再用吸水纸吸干植株上的水分,从基部将叶与根系剪断,分别

测定其鲜重后,准确称取由内至外第 3 张功能叶片 0.500 g,锡箔纸包装于液氮内保存,用于测定硝酸还原酶活性;然后另取 10 株叶片,称其鲜重,于 105 ℃杀青 15 min,再在 60 ℃条件下烘至恒重,再称其干重,之后将干样粉碎并过 60 目筛,备用。

1.3 实验方法

1.3.1 硝酸还原酶活性测定 参照王学奎的方法,采用离体法测定叶片中硝酸还原酶的活性^[9]。

1.3.2 样品消解 采用微波消解法对样品进行消解。所有器皿均在 30%硝酸洗液中浸泡 24 h 后用去离子水冲洗干净,烘干、备用。精确称取叶片样品 0.500 g 置于容样杯中,加入 8 mL HNO₃、1 mL H₂O₂,轻轻摇动使混合均匀,盖好溶样杯盖,放入微波消解罐中消解 40 min,消解完毕,冷却后开罐,用超纯水将消解液定容至 25 mL 容量瓶中,摇匀备用。同时配制空白溶液。

1.3.3 矿质元素含量测定 各种元素的标准储备液均采用光谱纯金属或氧化物单独配制而成,其浓

度为 1.0 mg · mL⁻¹。使用时以 1.0%硝酸逐级稀释配制成混合标准溶液系列。先采用 ICP-MS 法测定 1.0、5.0、10.0、25.0、50.0、100.0 μg · mL⁻¹标准溶液中各元素含量,将结果绘制成标准工作曲线,然后测定菘蓝叶片样品中各元素含量。Optimal 2100DV 电感耦合等离子体发射光谱仪的工作参数为:射频功率 1.150 kW,辅助气流量 0.5 L · min⁻¹,雾化气压器压力 2.908 6 kPa,蠕动泵转速

表 1 3 种氮素形态和浓度的处理水平

Table 1 Three nitrogen forms and concentration levels of treatment/(mmol · L⁻¹)

因素水平 Factor level	铵态氮浓度 Concentration of NH ₄ ⁺ -N	硝态氮浓度 Concentration of NO ₃ ⁻ -N	酰胺态氮浓度 Concentration of CO(NH ₂) ₂
1	0	0	0
2	2.5	2.5	2.5
3	5.0	5.0	5.0
4	7.5	7.5	7.5
5	10.0	10.0	10.0

表 2 3 种氮素形态和浓度的正交设计处理水平

Table 2 Treatment level of three nitrogen forms and concentration by orthogonal design

处理编号 Treatment number	因素与水平 Factor and level						总氮浓度 Concentration of total nitrogen /(mmol · L ⁻¹)
	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	留空 Blank	酰胺态氮 Amide nitrogen	留空 Blank	留空 Blank	
1(CK)	1	1	1	1	1	1	0
2	1	2	2	2	2	2	5.0
3	1	3	3	3	3	3	10.0
4	1	4	4	4	4	4	15.0
5	1	5	5	5	5	5	20.0
6	2	1	2	3	4	5	7.5
7	2	2	3	4	5	1	12.5
8	2	3	4	5	1	2	17.5
9	2	4	5	1	2	3	10.0
10	2	5	1	2	3	4	15.0
11	3	1	3	5	2	4	15.0
12	3	2	4	1	3	5	7.5
13	3	3	5	2	4	1	12.5
14	3	4	1	3	5	2	17.5
15	3	5	2	4	1	3	22.5
16	4	1	4	2	5	3	10.0
17	4	2	5	3	1	4	15.0
18	4	3	1	4	2	5	20.0
19	4	4	2	5	3	1	25.0
20	4	5	3	1	4	2	17.5
21	5	1	5	4	3	2	17.5
22	5	2	1	5	4	3	22.5
23	5	3	2	1	5	4	15.0
24	5	4	3	2	1	5	20.0
25	5	5	4	3	2	1	25.0

135 r · min⁻¹, 积分时间 90 s。

1.4 数据处理

采用正交设计软件做直观分析和 DPS 软件对实验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 各形态氮素营养组合对菘蓝单株干物质积累的影响

不同形态氮素和浓度配合施用后明显地影响了菘蓝的单株干重(图 1),单株干重低于对照的有 3、8、19、23、25 共 5 个组合,其余组合均高于对照;其中单株干物质重位列前五位的组合分别是 9(1.73 g)、7(1.57 g)、10(1.56 g)、21(1.47 g)和 24(1.46 g),这 5 个组合间单株干物质重差异不显著,但均显著高于对照,说明氮素配合施用后能有效促进苗期菘蓝的生长。另外,直观分析结果(表 3)表明,影响苗期菘蓝单株干重的氮素形态依次为酰胺态氮>铵态氮>硝态氮,即在菘蓝生长的前期为促进其干物质的积累,需要注重酰胺态氮的利用。结合菘蓝单株干物质重及氮素形态与用量分析,最佳组合为 7 号(即 NH₄⁺-N 为 2.5 mmol · L⁻¹、NO₃⁻-N 为

2.5 mmol · L⁻¹、CO(NH₂)₂ 为 7.5 mmol · L⁻¹)。

2.2 各形态氮素营养组合对菘蓝叶片内硝酸还原酶活性的影响

菘蓝叶片中硝酸还原酶(NR)活性并不随总氮量的提高而增大(图 2),也不随硝态氮含量的提高而增加,其与总氮量或硝态氮含量没有明显的相关性。24 个处理组合中,NR 活性大于对照组的有 2、3、4、6、8、17、18 共 7 个组合,其中 4、6、8 组合与对照间的 NR 活性差异显著。直观分析结果(表 3)表明,3 种氮素形态对菘蓝叶中 NR 活性的影响大小依次为:铵态氮>硝态氮>酰胺态氮。正交统计推测氮素影响 NR 活性的最佳组合为(NH₄)₂SO₄ 浓度 2.5 mmol · L⁻¹、KNO₃ 浓度 5 mmol · L⁻¹、CO(NH₂)₂ 浓度 5 mmol · L⁻¹,总氮 12.5 mmol · L⁻¹。但在 24 个氮素处理组合中 NR 活性最大的是 8 号组合(13.39 μg · g⁻¹ · h⁻¹),其组成为 NH₄⁺-N 2.5 mmol · L⁻¹、NO₃⁻-N 5 mmol · L⁻¹、CO(NH₂)₂ 10 mmol · L⁻¹。而酰胺态氮为 0 的 9、12、20、23 组合的 NR 活性分别为 12.57、8.00、12.67 和 11.03 μg · g⁻¹ · h⁻¹,这与晏枫霞等的研究结果相似。

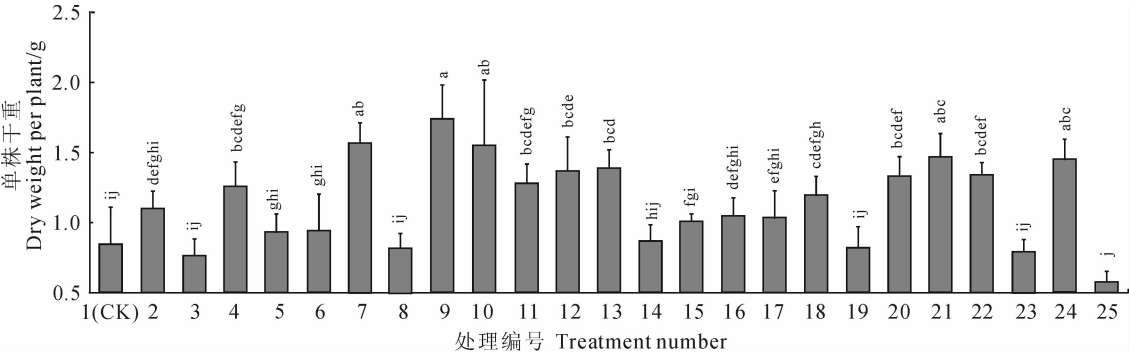


图 1 氮素处理后菘蓝单株干重
不同小写字母表示处理间在 0.05 水平有显著差异;图 2 同

Fig. 1 Dry weight of per plant under nitrogen treatment of *I. indigotica*

The different normal letters within rows mean significant differences among treatments at 0.05 level;

表 3 氮素处理后菘蓝单株干重与叶内硝酸还原酶活性的直观分析

Table 3 Visual analysis of dry weight and nitrate reductase activity with nitrogen treatments in leaves of *I. indigotica*

氮素形态 Nitrogen form	单株干重 Dry weight per plant/g			硝酸还原酶活性 Nitrate reductase activity/(μg · g ⁻¹ · h ⁻¹)		
	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₂ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₂ -N
均值 1 k1	0.986	1.12	1.212	15.27	11.89	11.89
均值 2 k2	1.328	1.278	1.312	16.26	11.41	12.61
均值 3 k3	1.184	0.996	0.842	10.40	15.69	14.93
均值 4 k4	1.088	1.234	1.308	12.45	12.71	12.52
均值 5 k5	1.128	1.096	1.04	9.79	12.38	12.13
极值 R	0.342	0.282	0.47	6.56	4.28	3.04

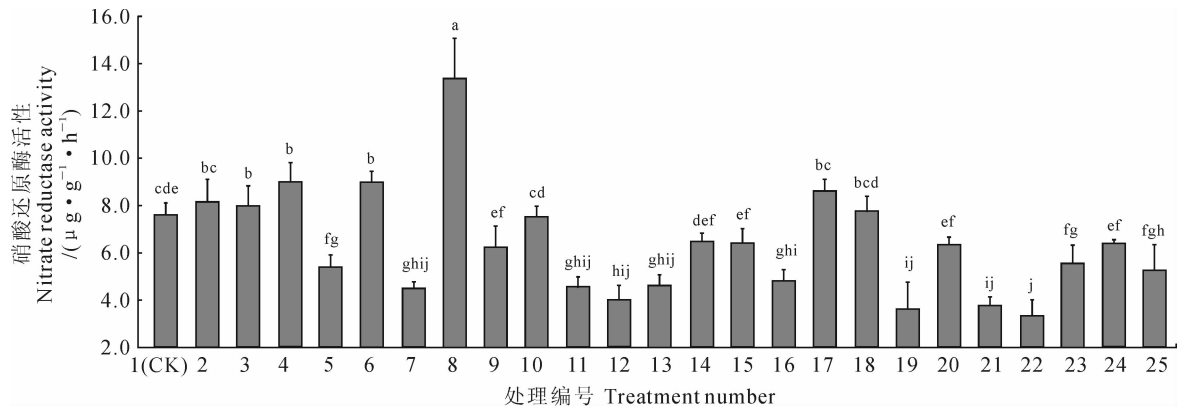


图2 氮素处理后苘蓝叶内硝酸还原酶活性

Fig. 2 Nitrate reductase activity with nitrogen treatments in leaves of *I. indigotica*

2.3 各氮素形态组合对苘蓝生长必需矿质元素吸收的影响

不同形态与不同浓度氮素组合施用后明显影响了苘蓝对矿质元素的吸收(表4)。就其生长必需矿质元素(P、K、Ca、Mg、Si、Mn、Fe、Zn、Mo、Na、B、Cu、Ni)而言,多数元素的含量均高于对照。其中,24个氮素形态组合的P、K、Ca、Mg4种大量元素含量均高于对照(CK);Si含量除9、21号组合低于对照之外,其余22个组合也高于对照,说明铵态氮、硝态氮与酰胺态氮的组合施用均能促进苘蓝对大量矿质元素的吸收。就微量元素含量而言,24个氮素处理组合均高于对照的是Mn;而Zn含量除9号组合与硼元素B含量除21号组合低于对照外,二者其余23个组合均高于对照;Na、Cu2种元素含量低于对照的组合仅有9、21号,而10号组合的Cu含量与对照相等,其他组合的Na、Cu含量均高于对照;Mo含量低于对照的仅有5、8、17、22号4个组合。施用氮素后多数组合含量均低于对照的有Ni和Fe2种元素,其中24个组合Ni的含量均低于对照,Fe仅4号组合高于对照。

同时,不同形态氮素组合处理苘蓝后其叶内的其他元素含量呈现不同的变化,其中的Cd、Cr与Sr3种元素含量24个处理组合均高于对照;Al与Ti含量除10号组合低于对照外,其余23个组合均高于对照;Se则除11、13、14、23、24号5个组合高于对照外,其余的均低于对照;Ba含量除11、13、23号3个组合略低于对照外,其余均高于对照。

直观分析结果显示(表5),苘蓝叶片中含量受铵态氮影响最大的矿质元素有:K、Ba、Se、Ni、B、Si、Fe7种,影响大小的顺序仅Se元素为铵态氮>硝态氮>酰胺态氮,其余6种元素的次序均为铵态氮>酰胺态氮>硝态氮;受硝态氮最大影响的元素有:

P、Cd、Ti、Al、Cu5种,影响大小的顺序为硝态氮>酰胺态氮>铵态氮的有P、Cd、Cu,为硝态氮>铵态氮>酰胺态氮的有Ti、Al;受酰胺态氮影响最大的元素有:Na、Ca、Mg、Zn、Mo、Mn、Cr、Sr8种,其中影响大小的顺序酰胺态氮>铵态氮>硝态氮的有:Na、Ca、Mg、Mo、Mn、Sr,为酰胺态氮>硝态氮>铵态氮的仅Zn、Cr2种元素。结果说明不同形态氮素对苘蓝吸收矿质元素的影响存在很大的差异。

3 讨论

3.1 氮素形态及其配比与苘蓝幼苗硝酸还原酶活性的关系

硝酸还原酶(NR)是植物氮素同化过程中的关键酶之一^[10-11],其活性高低与植物体内氮同化能力密切相关,直接影响植物对氮素的有效利用。王小纯等^[12]研究表明不同专用型小麦氮素同化关键酶硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合酶对氮素形态的反应不同,籽粒蛋白质含量与旗叶NR活性相关性不显著。槐叶萍尽管在相对较高的铵态氮水平下硝态氮吸收能力下降,但也只能在这种高铵态氮水平下才能维持较高硝酸还原酶活性^[13]。本研究结果表明,不同形态氮素配合施用后能显著影响苗期苘蓝叶片内硝酸还原酶活性,且以铵态氮影响最为显著,而影响苘蓝单株干物质最大的是酰胺态氮,24个处理组合中干物质与NR活性最大的组合并不一致,分析二者相关性发现NR活性与单株干重呈现很弱的负相关性,相关系数 $r=-0.3026$,说明施用不同组合的氮素后苘蓝叶片内的硝酸还原酶活性大小不能直接反映苘蓝干物质的积累。但硝酸还原酶活性与铵态氮浓度间是否存在相关性,以及与苘蓝干物质积累间是否有相关性,即硝酸还原酶活性与苘蓝体内的氮代谢关系还有待进一步研究。

表 4 氮素处理后对菰蓝叶片矿质元素含量的影响
Table 4 Effect on mineral elements in leaves of *I. indigotica* with different nitrogen treatments

编号 Code	P /(mg· g ⁻¹)	K /(mg· g ⁻¹)	Ca /(mg· g ⁻¹)	Mg /(mg· g ⁻¹)	Si /(mg· g ⁻¹)	Mn /(μg· g ⁻¹)	Fe /(mg· g ⁻¹)	Zn /(μg· g ⁻¹)	Mo /(μg· g ⁻¹)	Na /(mg· g ⁻¹)	B /(mg· g ⁻¹)	Cu /(μg· g ⁻¹)	Ni /(μg· g ⁻¹)	Cd /(μg· g ⁻¹)	Cr /(μg· g ⁻¹)	Ti /(μg· g ⁻¹)	Al /(μg· g ⁻¹)	Ba /(μg· g ⁻¹)	Sr /(μg· g ⁻¹)	Se /(μg· g ⁻¹)
1(CK)	2.58	14.86	13.82	1.49	0.299	26.93	0.849	14.15	2.43	0.45	38.98	15.88	10.10	3.20	1.18	5.225	0.282	24.58	41.73	25.48
2	3.46	20.00	18.62	4.41	0.323	49.78	0.370	14.92	5.42	1.00	58.40	21.23	3.73	3.47	1.80	8.367	0.297	28.42	56.00	23.83
3	4.72	28.68	29.71	7.30	0.503	97.58	0.793	21.90	3.23	1.35	105.95	30.73	5.13	3.45	2.48	6.125	0.301	52.65	83.20	14.85
4	5.60	30.68	32.00	6.84	0.534	123.35	0.956	45.55	4.23	1.11	106.13	35.63	6.23	4.20	2.55	10.1	0.351	54.5	95.58	16.43
5	4.56	29.21	27.25	5.20	0.482	132.10	0.507	21.55	2.15	1.17	87.30	21.20	5.45	4.75	2.95	12.325	0.329	39.9	69.45	17.58
6	5.16	27.08	23.14	6.14	0.431	118.95	0.459	36.43	4.00	1.22	106.23	22.00	2.95	4.13	2.65	13.075	0.364	31.08	76.25	20.65
7	4.71	29.20	24.75	5.26	0.484	119.55	0.628	24.28	5.08	0.61	84.68	26.30	3.70	3.35	2.60	12.35	0.333	32.35	76.00	23.93
8	5.45	32.36	20.37	4.36	0.406	146.73	0.374	22.35	1.97	0.74	78.68	17.47	2.43	4.28	1.53	7.033	0.309	27.97	62.53	16.75
9	3.81	24.78	19.79	4.87	0.299	100.40	0.325	13.63	3.00	0.37	58.57	14.08	1.42	4.03	1.98	5.7	0.291	33.5	60.65	21.32
10	4.51	30.30	26.18	5.34	0.338	133.68	0.350	16.98	3.75	0.61	75.55	15.88	1.55	3.48	1.93	4.65	0.275	28.98	63.55	18.25
11	5.09	29.83	23.15	5.35	0.334	177.53	0.381	19.83	3.68	0.54	89.33	20.20	2.60	4.25	2.55	9.05	0.321	24.33	70.50	27
12	4.57	31.69	23.26	5.90	0.440	129.10	0.506	27.43	6.90	0.74	87.13	19.90	1.75	3.43	3.13	23.775	0.402	31.35	69.05	19
13	4.97	29.41	25.29	5.76	0.345	109.88	0.377	31.98	5.68	0.71	86.30	21.83	3.48	4.10	2.25	6.8	0.307	24.05	70.53	28.13
14	5.01	27.38	29.84	5.99	0.303	152.25	0.362	16.78	3.50	0.94	76.70	19.23	2.33	4.25	2.83	13.175	0.322	40.18	97.65	48.75
15	5.02	30.00	27.39	4.88	0.373	95.40	0.327	19	4.58	0.66	70.68	30.58	5.88	4.93	2.38	6.45	0.291	29.7	78.13	23.575
16	5.09	36.42	25.67	6.02	0.651	96.73	0.470	29.75	5.40	1.11	91.23	22.50	3.90	4.20	2.65	16.3	0.349	31.65	71.68	20.88
17	6.05	35.70	29.49	5.96	0.536	156.50	0.671	32.75	1.63	1.27	98.28	28.78	5.63	4.05	3.23	44.48	0.488	39.68	87.83	13.08
18	5.40	27.91	28.52	6.28	0.480	177.63	0.440	23.7	3.33	1.23	108.25	24.05	3.38	4.20	2.55	9.45	0.311	31.05	80.73	17.4
19	6.57	34.03	27.04	6.53	0.582	198.65	0.551	36.88	2.55	1.14	100.93	21.98	3.20	3.58	2.88	21.43	0.379	34.9	79.68	16.23
20	4.43	24.97	20.32	4.04	0.375	86.95	0.379	15.88	3.88	0.62	52.58	19.98	3.18	4.13	1.88	9.925	0.306	19.58	56.75	18.23
21	4.69	25.45	17.07	2.19	0.221	58.63	0.391	22.13	4.50	0.44	23.70	4.03	3.60	4.20	1.23	9.7	0.305	17.43	51.20	25.4
22	5.48	31.03	19.36	4.72	0.567	147.48	0.636	34.93	1.90	0.66	76.95	39.85	6.08	3.63	2.25	13.8	0.336	25.75	55.90	14.28
23	5.04	27.00	19.77	3.86	0.344	101.45	0.337	27.35	4.95	0.64	57.25	18.53	4.03	3.48	2.20	9.25	0.333	24.25	57.25	28.13
24	4.60	26.03	20.03	4.69	0.345	100.73	0.444	32.70	4.23	0.59	52.48	21.93	3.53	3.60	2.73	12.85	0.343	25.55	58.60	30.33
25	5.07	31.13	21.77	4.55	0.371	173.50	0.512	31.73	2.65	0.72	67.80	26.80	6.28	3.55	3.10	16.375	0.351	29.3	66.38	24.23

表 5 氮素处理后菘蓝叶片内矿质元素含量的直观分析表
Table 5 Visual analysis of mineral element contents in leaves of *I. indigotica* with nitrogen treatments

氮素形态 Nitrogen form	P	K	Ca	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Mo	Na	B	Cu	Ni	Cd	Cr	Ti	Al	Ba	Sr	Se	
NH ₄ ⁺ -N	k1	4.18	24.69	24.28	5.05	0.418	85.947	0.695	23.614	3.452	1.015	79.350	24.93	6.127	3.813	2.190	8.43	0.312	40.008	69.19	19.632
	k2	4.72	28.74	22.85	5.19	0.392	123.86	0.427	22.734	3.558	0.708	80.740	19.15	2.410	3.853	2.138	8.56	0.314	30.773	67.80	20.178
	k3	4.93	29.66	25.79	5.58	0.359	132.83	0.391	23.004	4.865	0.718	82.025	22.35	3.205	4.190	2.625	11.85	0.329	29.920	77.17	29.29
	k4	5.51	31.81	26.21	5.77	0.525	143.29	0.502	27.792	3.355	1.076	90.250	23.46	3.855	4.030	2.635	20.32	0.367	31.379	75.33	17.16
	k5	4.98	28.13	19.60	4.00	0.370	116.36	0.464	29.768	3.645	0.612	55.635	22.23	4.700	3.690	2.300	12.40	0.334	24.455	57.87	24.41
极值 <i>R</i>	1.32	7.12	6.61	1.76	0.166	57.34	0.304	7.034	1.51	0.464	34.615	5.79	3.717	0.500	0.497	11.89	0.055	15.553	19.31	12.13	
NO ₃ ⁻ -N	k1	4.522	26.73	20.57	4.24	0.387	95.75	0.510	24.458	3.964	0.752	69.890	16.92	4.630	3.995	2.05	10.67	0.324	25.810	62.27	23.88
	k2	4.854	29.52	23.10	5.25	0.470	120.48	0.562	26.862	4.183	0.855	81.085	27.21	4.177	3.583	2.60	20.55	0.371	31.508	68.96	18.822
	k3	5.116	29.07	24.73	5.51	0.415	126.65	0.464	25.456	3.828	0.936	87.287	22.52	3.687	3.902	2.20	7.73	0.312	31.993	70.85	21.05
	k4	5.118	28.58	25.74	5.78	0.413	135.08	0.528	29.108	3.500	0.830	78.958	22.57	3.338	3.932	2.59	12.65	0.337	37.725	78.43	26.548
	k5	4.718	29.12	24.58	4.80	0.378	124.33	0.415	21.028	3.400	0.755	70.780	22.89	4.465	4.165	2.45	9.95	0.311	29.490	66.85	20.37
极值 <i>R</i>	2.700	2.80	5.17	1.55	0.092	39.33	0.147	8.08	0.783	0.184	17.397	10.29	1.292	0.582	0.55	12.82	0.060	11.915	16.16	7.726	
CONH ₂) ₂ ⁻ N	k1	4.09	24.66	19.39	4.03	0.351	88.97	0.479	19.688	4.194	0.564	58.898	17.67	4.093	3.652	2.07	10.78	0.323	26.650	57.09	22.428
	k2	4.53	28.43	23.16	5.24	0.401	98.16	0.402	25.266	4.893	0.807	72.790	21.27	3.237	3.768	2.27	9.79	0.314	27.728	64.07	24.222
	k3	5.20	30.00	26.79	5.99	0.429	139.76	0.559	27.918	3.000	1.100	90.990	18.50	4.460	3.885	2.86	13.14	0.365	38.575	82.26	24.310
	k4	5.08	28.65	25.95	5.09	0.418	114.91	0.548	26.932	4.340	0.809	78.685	27.86	4.555	4.175	2.26	10.74	0.318	33.005	76.33	21.345
	k5	5.43	31.29	23.43	5.23	0.464	160.50	0.490	27.108	2.448	0.847	86.637	21.55	3.952	4.097	2.43	12.68	0.335	30.568	67.61	18.365
极值 <i>R</i>	1.34	6.63	7.40	1.96	0.113	71.53	0.157	8.23	2.445	0.536	32.092	9.355	1.318	0.523	0.783	5.42	0.051	11.925	25.18	5.945	

3.2 氮素形态及其配比与菘蓝矿质元素吸收的关系分析

张国正等^[14]研究表明,施氮使菜用大豆籽粒中 Mg、Mn 和 Fe 的含量和积累量先上升再下降,而籽粒中 Ca 则在低氮时大幅度下降,此后逐渐回升。陈磊等^[15]发现,在营养液中较高比例的铵态氮(75%)处理下,菜用大豆籽粒中总 N、P 等元素的含量显著增加,K、Ca、Mg 等矿质营养含量却显著减少;而在适宜的硝铵比(75:25 和 50:50)处理下则相反,菜用大豆籽粒 K、Ca、Mg 等矿质营养含量均维持在较高水平,营养液中过多的铵态氮显著抑制了菜用大豆籽粒对 K、Ca、Mg 等矿质营养的吸收。由此说明氮素对植物吸收矿质元素有着明显的影响。蛭石是化学成分复杂的含水铝硅酸盐矿物,是一种含镁的水铝硅酸盐次生变质矿物,本实验采用蛭石与珍珠岩作为栽培基质,含 MgO 14%~18%、Fe₂O₃ 5%~17%、FeO 1%~3%、SiO₂ 37%~42%、Al₂O₃ 10%~13%、H₂O 8%~18% 和 K₂O 6.5%,还有 Li、Ti、Cr、Ni 等矿质元素。实验结果表明氮素营养能明显地影响菘蓝对基质中矿质元素的吸收,其中氮素不同处理明显地促进了菘蓝对大量

元素 P、K、Ca、Mg 的吸收,从而有效地促进了菘蓝的生长,且不同形态的氮素对不同矿质元素吸收影响不同,其中以硝态氮对 P 元素的吸收影响最大,铵态氮对 K 元素吸收影响最大,酰胺态氮则对 Ca、Mg 的吸收影响最大。

3.3 氮素形态及其配比与菘蓝生长的关系

氮素作为植物生长的必需营养元素,参与植物的多种生理代谢活动,促进植物的生长发育。范巧佳等^[16]的田间试验结果表明,硝态氮、铵态氮、酰胺态及硝态氮与铵态氮配施均可在一定程度上促进川芎的生长,延长其根长,茎蘖数增加,干物质积累增加。Arunothai 等^[13]研究发现,槐叶萍对氮素的吸收利用以铵态氮为主,单用硝态氮时其生长比率更低、根变短、叶变小。本研究结果也表明,不同氮素形态配合施用能促进苗期菘蓝地上部分的生长,提高其干物质量;不同形态氮素配合施用通过提高硝酸还原酶的活性和促进大量元素及部分微量元素吸收,从而有效地促进菘蓝的生长,能达到在菘蓝生长前期增加干物质积累的目的。但是对氮素形态对菘蓝后期生长及其活性成分积累的影响还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHAO P(赵平),SUN G SH(孙谷寿),PENG SH L(彭少林). Ecophysiological research on nitrogen nutrition of plant[J]. *Ecological Science*(生态科学),1998,17(2):36-42(in Chinese).
- [2] NARUMOL P,XU ZH ,HANS B. Nitrogen nutrition of *Cyperus laevigatus* and *Phormium tenax*: Effects of ammonium versus nitrate on growth,nitrate reductase activity and N uptake kinetics[J]. *Aquatic Botany*,2013,106:42-51.
- [3] LI C W(李灿雯),WANG K C(王康才),et al. Effects of nitrogen form on the growth and accumulation of total alkaloid and free total organic acids of *Pinellia ternata*[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报),2012,18(1):256-260(in Chinese).
- [4] YAN F X(晏枫霞),WANG K C(王康才),et al. Effects of NH₄⁺-N/NO₃⁻-N ratio in applied supplementary fertilizer on nitrogen metabolism, photosynthesis and growth of *Isatis indigotica*[J]. *China J. Chinese Materia Medica*(中国中药杂志),2009,34(6):2 039-2 042(in Chinese).
- [5] ZHANG M(张梦),LIANG Y J(梁永江),et al. Effects of nitrogen sources on nitrogen utilization and growth of flue-cured tobacco in the floating-seeding system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报),2012,18(1):139-145(in Chinese).
- [6] LI X X(李先信),HUANG G L(黄国林),et al. Effects of different forms of N and its ratios on growth and mineral element content of navel orange seedlings[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*(Nat. Sci. Ed.) (湖南农业大学学报·自然科学版),2007,33(5):622-625(in Chinese).
- [7] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 北京:中国医药科技出版社,2010:191-192.
- [8] YAN F X(晏枫霞),WANG K C(王康才),TANG X Q(唐晓清),et al. Effects of NH₄⁺-N/NO₃⁻-N ratio on the active component and mineral elements contents of *Isatis indigotica* Fort. [J]. *Jiangsu J. Agr. Sci.* (江苏农业学报),2010,26(4):735-739(in Chinese).
- [9] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(2版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006:124-126.
- [10] LAM H M,COSCHIGANO K T,OLIVEIRA I C. The molecular genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants[J]. *Annu. Rev. Plant Physiol Plant Mol. Bio.*,1996,47:569-593.
- [11] CAMPBELL W H. Nitrate reductase structure,function and regulation:bridging the gap between biochemistry and physiology[J]. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*,1999,50:277-303.
- [12] WANG X CH(王小纯),XIONG SH P(熊淑萍),et al. Effects of different nitrogen forms on key enzyme activity involved in nitrogen metabolism and grain protein content in speciality wheat cultivars[J]. *Acta Ecological Sinica*(生态学报),2005,25(4):802-807(in Chinese).
- [13] ARUNOTHAI J,HNAS B. Nitrogen nutrition of *Salvinia natans*: Effects of inorganic nitrogen form on growth,morphology,nitrate reductase activity and uptake kinetics of ammonium and nitrate[J]. *Aquatic Botany*,2009,90:67-73.
- [14] ZHANG G ZH(张国正),ZHOU Q(周琴),HE X H(何小红),et al. Effects of N,P and K fertilizer on grain yield and mineral element content in grain of Vegetable Soybean[J]. *Soybean Science*(大豆科学),2009,28(6):1 034-1 039(in Chinese).
- [15] CHEN L(陈磊),ZHU Y L(朱月林),YANG L F(杨立飞),et al. Effects of nitrogen forms and ratios on carbon-nitrogen assimilation in developing seeds of Vegetable Soybean[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报),2010,19(10):189-193(in Chinese).
- [16] FAN Q J(范巧佳),ZHANG Y(张毅),et al. Effect of nitrogen forms on the growth,yield,content of ferulic acid and total alkaloids of *Ligusticum chuanxiong*[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报),2010,16(3):720-724(in Chinese).