植物营养与肥料学报 2014,20(1):129-138
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0114

不同氮素形态及其比例对菘蓝生物学特性的影响

唐晓清,肖云华,赵雪玲,周海凤,李臻颖,林志超,杨 月
(南京农业大学园艺学院,南京 210095)

摘要: 采用砂培法栽培菘蓝,以菘蓝叶与根的干重、主根长度与直径、叶绿素含量和光合参数为指标,研究三种氮素形态,即硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)和酰胺态氮[$CO(NH_2)_2$-N]四种不同浓度对菘蓝生物学性质的影响,为菘蓝栽培生产中高效利用氮肥提供理论依据。结果表明,氮素处理能增加菘蓝叶与根的干重,铵态氮对菘蓝主根长度及侧根数的影响最显著,而酰胺态氮与硝态氮对主根直径的影响相近,硝态氮对菘蓝的叶干重、根干重与根冠比的影响最为显著;不同形态氮素处理能显著提高叶绿素含量与净光合速率,硝态氮对叶绿素和净光合速率有显著影响,酰胺态氮对气孔导度与蒸腾速率的影响最显著,铵态氮对叶片的胞间二氧化碳浓度有显著影响。不同形态氮素通过对菘蓝叶片的叶绿素含量和光合参数的影响实现对其生长状况的影响,其中硝态氮对菘蓝生长的影响最为显著。

关键词: 菘蓝;氮素形态;生物学特性
中图分类号: S567.2.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0129-10

Effect of different nitrogen forms and their proportion on biological characteristics of *Isatis indigotica* Fort

TANG Xiao-qing, XIAO Yun-hua, ZHAO Xue-ling, ZHOU Hai-feng, LI Zhen-ying, LIN Zhi-chao, YANG Yue
(*College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: To provide a theoretical basis of efficient utilization of nitrogen fertilizer for cultivation and production of *Isatis indigotica*, effects of different nitrogen forms and their proportion on biological characteristics of *I. indigotica* were studied by using sand culture. There were four different concentrations of three nitrogen forms, NH_4^+-N, NO_3^--N and $CO(NH_2)_2$-N. The dry weights of leaves and roots, lengths and diameter of taproots, chlorophyll content and photosynthetic parameters were used as indicators. The results show that the nitrogen treatments could increase the dry weights of leaves and roots, the effect of NH_4^+-N on taproot length and number of lateral root is the most significant, the effect of amide nitrogen and nitrate nitrogen on taproot diameters is similar, and the effect of NO_3^--N on dry weights of leaves and roots and root/shoot ratio is the most significant. The nitrogen treatments could significantly improve the chlorophyll content and net photosynthetic rate which affect chlorophyll and net photosynthetic rate of nitrate nitrogen, stomatal conductance and transpiration rate of amide nitrogen, and the concentration of carbon dioxide in the intercellular of ammonium nitrogen, respectively. Different nitrogen forms affect the growth through the effects of chlorophyll content and photosynthetic parameters, and in which nitrate nitrogen is the most significant nitrogen form.

Key words: *Isatis indigotica* Fort.; nitrogen forms; biological characteristics

氮素作为一种植物生长必需的营养物质,既是植物体最重要的结构物质,又是其生理代谢中最活跃、无处不在的重要物质—酶的主要成分[1],所以氮素对植物生理代谢和生长有重要作用。在所有必

收稿日期: 2013-05-28 **接收日期:** 2013-10-08
基金项目: 国家自然科学基金(31171486);国家大学生创新创业训练计划(201310307026);南京农业大学校级大学生创业训练项目(12cy04)资助。
作者简介: 唐晓清(1970—),女,四川威远人,博士,副教授,主要从事药用植物栽培与中药质量研究。E-mail: xqtang@njau.edu.cn

需营养元素中,氮是限制植物生长和产量形成的首要因素,氮素对植物最终产量的贡献率为40%～50%[2]。目前有许多研究涉及到不同氮素形态及不同浓度的配比对作物的生长发育、有效成分含量及作物产量的影响。以纯水为水培水源,NO_3^--N:NH_4^+-N为1:1或单独供应NH_4^+-N对作物生长均有一定程度的抑制作用,而以后者的生长量最低[3]。曹翠玲等[4]的研究表明,氮素形态几乎影响了光合作用的各个环节,包括影响叶片叶绿素含量、光合速率、暗反应主要酶活性以及光呼吸等,直接或间接影响着光合作用。氮素形态也影响叶绿素含量,盆栽试验条件下,硝态氮、尿素混施,小麦叶绿素含量较高[5]。汪建飞等[6]研究表明,适当增施铵态氮有利于降低菠菜硝酸盐、亚硝酸盐及草酸的含量,且增铵可以提高菠菜Vc含量,铵硝比为50:50的处理菠菜Vc含量最高;随着铵硝比的下降,菠菜茎叶中可溶性糖的含量逐渐降低,而粗蛋白的含量则以铵硝比为25:75的处理最高。菘蓝 *Isatis indigotica* Fort.为十字花科菘蓝属植物,以干燥根和叶入药,分别是常用中药材板蓝根和大青叶,板蓝根性苦、寒,归心、胃经,具有清热解毒、凉血利咽的功效[7],广泛应用于流感、腮腺炎、乙脑、肝炎等多种疾病的临床治疗;大青叶,性苦、寒,归心、肺、胃经,具有凉血消斑、清肝泻火、定惊的功效[8]。目前关于菘蓝的研究主要集中在化学成分、药理活性、制剂工艺、临床应用及组织培养等方面。在栽培生理研究方面晏枫霞[9]等人开展了铵态氮与硝态氮对菘蓝生长及靛玉红含量的影响,铵态氮促进氮、磷的积累,硝态氮促进钾、镁的积累,提高铵态氮的比例有利于菘蓝叶片靛玉红的积累,全硝营养时靛蓝含量最高。而关于三种不同氮素形态及不同的浓度配比对菘蓝生物学特性的影响尚未见报道。为此本文采用砂培法,以铵态氮、硝态氮和酰胺态氮三种形态及其不同的浓度配比,设计正交试验,以其叶和根的生物量、叶片叶绿素含量及光合参数为指标,开展不同氮素形态及其比例对菘蓝生物学特性影响的研究,探究适合菘蓝生长的最佳氮素形态,以期为合理高效地利用氮素和提高菘蓝经济产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为十字花科菘蓝 *Isatis indigotica* Fort.的种子,采用盆栽(外口径44 cm,底直径30 cm,高35 cm)试验,栽培基质为蛭石和珍珠岩,以2:1比例混合而成。砂培基本营养液配方中大量元素和微量元素均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所含氮元素的组成配制而成,pH 6.0。处理液是三种氮素形态四个浓度按照正交试验设计表配制而成,其中铵态氮(NH_4^+-N)由硫酸铵$(NH_4)_2SO_4$提供,硝态氮(NO_3^--N)以硝酸钾KNO_3提供,酰胺态氮用纯脲$CO(NH_2)_2$,pH6.0。所有处理液中加入双氰胺(DCD),用量为处理液中纯氮含量的0.4%。所用试剂均为分析纯(AR)。

1.2 试验设计

采用$L_{25}(5^6)$试验设计,铵态氮、硝态氮、酰胺态氮各设5个水平(不考虑各因素之间的互作),各处理重复3次,随机排列。2012年4月26日播种,待出苗后开始每隔10 d浇灌一次基本营养液,每次500 mL,共3次。待菘蓝幼苗长至4～5片真叶时间苗,保证每盆留有长势基本一致的菘蓝幼苗10株。播种40 d后开始处理,第1 d开始浇灌处理液,每隔10 d浇灌1次处理液;第6 d浇灌处理营养液,每隔10 d浇灌1次处理营养液,处理液与处理营养液相隔5 d交错进行,到9月中旬;结合菘蓝生产中采收大青叶的时间,并为防止其营养过剩,将处理间隔时间增加至20 d,至采样前;总共处理15次,各处理见表1[10]。

表1 氮形态和浓度处理

Table 1 Treatments of nitrogen forms and concentration

氮水平 N level	氮形态和浓度(mmol/L) N forms and concentration		
	铵态氮 NH_4^+-N	硝态氮 NO_3^--N	酰胺态氮 $CO(NH_2)_2$-N
1	0	0	0
2	2.5	2.5	2.5
3	5	5	5
4	7.5	7.5	7.5
5	10	10	10

1.3 测定项目和方法

于2012年12月5日,选择菘蓝植株由内至外的第三片功能叶片,用SPAD502叶绿素测定仪测定其叶绿素含量,之后用LI-6400型光合仪在1000 μmol/(m^2·s)的光子强度下,测定同一位置菘蓝叶

片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr),根据净光合速率和蒸腾速率计算水分利用率(WUE),即 WUE = Pn/Tr,每个处理测定 10 片叶。

完成叶绿素及光合参数的测定后收获、采样,分析不同处理菘蓝地上与地下部分生长状况。将菘蓝植株用蒸馏水洗净、擦干,称单株鲜重,每个处理取 10 株,计算其平均单株重,并测定其主根中部的直径、主根长度、每株的分根数,然后将其分成地上和地下两部分,分别称重,计算根冠比,然后在 105℃下杀青 5 min,并于 60℃下烘至恒重,称其干重。

试验数据采用 Excel 和 DPS 软件进行处理与分析。

2　结果与分析

2.1　不同氮素形态对菘蓝生长指标的影响

不同形态氮素及不同浓度氮素配比对菘蓝生长的影响(表 2、表 3)表明,主根长度大于对照的有 6、7、10、12、16、17、18、19、20、21、22、23、24、25 等 14 个,其中 17 号组合的主根最长为 25.7cm(17 号组合：铵态氮为 7.5,硝态氮为 2.5,酰胺态氮 5.0 mmol/L),24 个处理的主根长与对照间不存在显著性差异($P>0.05$),长度最小的 4 号与 11 号组合与对照间差异也不显著,说明不同形态氮素及其配比的氮素处理对菘蓝主根长度的影响不显著;直观分析(表 3)显示,对菘蓝主根长度影响最显著的为铵态氮,其次是硝态氮与酰胺态氮。24 个组合氮素处理后的主根直径均大于对照,且与对照间差异显著($P<0.05$),其中 4 号组合的主根直径最大为 13.8 mm(4 号组合为铵态氮 0,硝态氮 7.5,酰胺态氮 7.5 mmol/L),说明不同形态氮素及其配比能有效地促进菘蓝主根的横向生长,使其直径显著增大。直观分析显示,对菘蓝主根直径影响最显著的是铵态氮,其次是硝态氮与酰胺态氮,但硝态氮的极差值(2.7)与酰胺态氮的极差值(2.8)相差极小,说明硝态氮对菘蓝主根直径的影响也较大。分根数只有 17 和 21 两个组合小于对照,其余组合均大于对照的分支数,其中除 5、15、17、19、21、23、25 七个组合分支数与对照间无显著性差异外,其余 17 个组合分支数与对照间存在显著性差异($P<0.05$),8 号组合的分根数最多为 13.8 支(8 号组合为铵态氮 2.5,硝态氮 5.0,酰胺态氮 10.0 mmol/L)。直观分析显示,影响侧根数的依次为铵态氮、酰胺态氮、硝态氮。由此可见,不同氮素形态及浓度组合处理菘蓝后,部分组合能有效地促进其主根的伸长,同时也使菘蓝根的分支数增加,所有处理均能显著促进主根直径的增加,铵态氮对菘蓝主根长及侧根数的影响最显著,酰胺态氮对菘蓝主根直径的影响最大。

不同形态及不同配比氮素处理菘蓝能促进其叶的干物质增加,24 个组合的叶干重与对照间存在显著性差异($P<0.05$),对照组叶干重仅 0.39 g/plant,叶干重位于前 5 位的依次为 4、8、10、25、20 号,分别比对照增加 27.0、23.7、21.1、20.8、20.7 倍;直观分析(表 3)显示,影响菘蓝叶干重的氮素形态依次为硝态氮、酰胺态氮、铵态氮。不同形态及配比的氮素处理对菘蓝根的干物质影响与叶基本一致,24 个组合的根干重均显著高于对照($P<0.05$),根干重位于前 5 位的依次为 4、8、10、23、24 号,分别比对照增加 8.2、7.1、5.6、4.2、4.2 倍,直观分析表明硝态氮影响根干重最显著,其次是铵态氮与酰胺态氮。根与叶干物质重量的前三位是一致的,即为 4、8、10 号组合,但该 3 个组合的根干重间存在显著性差异($P<0.05$)。根冠比分析显示,对照的根冠比为 1.9,明显高于所有的氮素处理组合,究其原因主要是由于缺乏氮素营养,导致其地上的生长势弱;而所有氮素处理菘蓝的根冠比均低于对照,说明氮素对菘蓝的促生长作用主要体现在对叶片的促进作用大于对根部的促进作用。表 3 显示,不同形态及其配比的氮素对菘蓝的根冠比的影响最显著的是硝态氮,其次是铵态氮和酰胺态氮。结合对主根长和主根直径的分析,说明硝态氮对菘蓝根的影响主要是促进其主根直径的增加,从而增加根干重。

2.2　不同氮素形态及其比例对菘蓝叶绿素含量的影响

不同氮素形态对菘蓝生长过程中叶片叶绿素含量的影响见图 1。在所有的 24 个氮素处理组合中,叶绿素含量均显著高于对照组($P<0.05$),即菘蓝生长过程中有氮素处理的其叶片叶绿素合成多,其中叶绿素含量大于 70 的有 4、5、8、15、17、18、19、23、25 等 9 个组合,其中 4 号组合的叶绿素含量最高(75.0)。但不同形态氮素对菘蓝的影响存在差异,直观分析结果(表 3)表明,硝态氮(NO_3^--N)对其叶绿素含量影响最大,其次是酰胺态氮与铵态氮。结合菘蓝叶的干物质重量分析结果,4、8、25 三个组合的叶绿素含量与干重均处于前列,叶干重与叶绿素含量的相关性分析(图 2-A)显示,叶干

重与叶绿素含量间存在较好的相关性,其相关系数 $r=0.7039$,说明叶绿素含量高有利于菘蓝地上部分干物质的增加;叶绿素含量与根干重间的相关性较差(图2-B),相关系数 $r=0.5242$,说明叶绿素合成的多少影响了菘蓝地上部分的光合作用,含量高者其合成的初生产物得以积累。

表2 不同氮素形态及其比例对菘蓝生长的影响(n=10)

Table 2 Effects of different nitrogen forms and concentrations on growth indicators of *Isatis indigotica* (n=10)

处理 Treatment	主根长 Length of taproots (mm)	主根直径 Diameter of taproots (mm)	分根数 Number of roots (piece)	叶干重 Dry weight of leaves (g/plant)	根干重 Dry weight of root (g/plant)	单株干重 Dry weight per plant (g/plant)	鲜重根冠比 Root to shoot ratio
1	21.6±0.2 abcd	5.6±0.1 c	4.6±0.5 h	0.4±0.1 j	1.2±0.2 l	1.6±0.2 m	1.9
2	20±0.1 abcd	9.2±0.5 ab	7.6±0.5 ef	2.4±0.2 i	3.9±0.5 k	6.3±0.5 l	1.0
3	16.4±0.3 cd	11.2±0.2 ab	6.0±1.0 fg	4.6±0.4 fg	5.6±0.4 fghi	10.2±0.8 ij	0.7
4	15.7±0.2 d	13.8±0.1 a	9.4±0.7 de	10.9±1.4 a	11.4±1.1 a	22.3±2.5 a	0.6
5	21.4±0.1 abcd	10.0±0.2 ab	4.9±0.9 h	7.6±0.7 c	5.6±0.5 efgh	13.2±1.1 def	0.4
6	24.2±0.2 ab	7.4±0.1 bc	6.8±0.7 fg	2.1±0.4 i	5.4±0.4 hij	7.5±0.2 kl	1.3
7	22.3±0.3 abcd	10.9±0.1 ab	6.9±1.2 ef	3.8±0.2 gh	6.2±0.2 ef	10.0±0.3 ij	0.9
8	19.1±0.4 abcd	12.4±0.1 a	13.8±0.9 a	9.6±1.8 b	10.1±1.0 b	19.7±2.6 b	0.6
9	18.6±0.1 abcd	10.3±0.2 ab	10.1±2.5 b	4.7±0.5 f	7.0±0.3 d	11.8±0.8 fghi	0.8
10	21.7±0.5 abcd	12.1±0.1 ab	12.0±2.7 a	8.6±0.6 c	8.2±0.3 c	16.8±0.7 c	0.6
11	15.7±0.3 d	9.1±0.2 ab	10.3±1.6 bc	3.4±0.5 h	4.6±0.4 jk	8.0±0.1 kl	1.5
12	23.5±0.2 ab	9.6±0.3 ab	9.0±1.0 de	2.4±0.1 i	5.2±0.1 ghij	7.6±0.3 kl	1.1
13	20.9±0.1 abcd	11.4±0.1 ab	8.8±1.3 cd	5.2±1.5 e	6.0±0.4 ef	11.3±1.9 ghi	0.6
14	17.3±0.3 bcd	10.4±0.2 ab	9.3±1.6 bcd	6.0±0.2 e	6.2±0.7 de	12.1±0.8 efgh	0.4
15	21.2±0.5 abcd	13.4±0.3 a	5.6±0.5 gh	7.5±0.7 c	5.5±0.6 efgh	13.0±1.3 defg	0.5
16	23.1±0.5 abc	12.4±0.3 a	8.9±1.2 cd	3.4±0.1 h	5.3±0.8 efgh	8.7±0.8 jk	1.0
17	25.7±0.3 a	11.5±0.2 ab	4.0±2.7 gh	4.3±0.3 fg	4.6±0.5 ijk	8.9±0.7 jk	0.7
18	21.8±0.3 abcd	12.9±0.1 a	8.1±0.9 de	5.9±0.2 e	6.4±0.2 ef	12.3±0.1 efg	0.8
19	23.6±0.3 ab	9.2±0.4 ab	5.1±0.9 gh	6.2±0.3 de	4.1±0.4 k	10.3±0.6 hij	0.4
20	23.4±0.6 abc	11.4±0.3 a	7.9±1.2 de	8.5±0.3 h	6.0±0.4 efg	14.5±0.7 d	0.5
21	22.4±0.4 abcd	9.8±0.1 ab	4.4±0.5 h	3.3±0.2 h	4.0±0.6 k	7.2±0.8 kl	0.6
22	23.2±0.4 abc	12.9±0.1 a	7.9±1.2 de	6.2±0.1 de	5.4±0.7 efgh	11.6±0.6 fghi	0.6
23	24.3±0.1 ab	9.9±0.3 ab	5.4±0.5 gh	6.8±0.3 d	6.5±0.5 ef	13.3±0.3 def	0.6
24	23.4±0.7 abc	10.6±0.3 ab	6.4±0.5 fg	6.9±0.2 de	6.5±0.5 ef	13.4±0.7 def	0.6
25	23.7±0.2 ab	11.0±0.1 ab	5.4±0.5 gh	8.5±0.5 c	5.5±0.7 efgh	14.0±0.3 de	0.4

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant different among treatments at the 5% level.

表 3　氮素处理后菘蓝生长与光合参数的直观分析

Table 3　Visual analysis of growth and photosynthesis parameters of I. indigotica under the nitrogen treatments

氮素形态 N form		主根长 Length of taproots (cm)	主根直径 Diameter of taproots (cm)	分根数 Number of roots (piece)	叶干重 dry weight of leaves (g)	根干重 dry weight of root (g)	根冠比 Root/shoot ratio	叶绿素含量 Content of chlorophyll (SPAD)	净光合速率 Pn [mmol/(m²·s)]	气孔导度 Gs [mol/(m²·s)]	蒸腾速率 Tr [mmol/(m²·s)]	胞间 CO_2 浓度 Ci [μmol/(m²·s)]
铵态氮 NH_4-N	均值 1 Mean 1	19.0	10.0	6.5	5.2	5.5	0.9	59.9	15.1	0.3	2.2	288.0
	均值 2 Mean 2	21.2	10.6	9.9	5.8	7.4	0.9	60.7	15.8	0.2	2.6	241.9
	均值 3 Mean 3	19.7	10.8	8.6	4.9	5.5	0.8	63.9	16.2	0.3	2.5	268.5
	均值 4 Mean 4	23.5	11.5	6.8	5.7	5.3	0.7	71.2	15.4	0.3	1.9	302.7
	均值 5 Mean 5	23.4	10.8	5.9	6.3	5.6	0.6	66.6	15.8	0.2	2.7	253.3
	极值 Extreme	4.5	1.5	4.0	1.4	2.1	0.4	11.4	1.1	0.1	0.8	60.8
硝态氮 NO_3-N	均值 1 Mean 1	21.4	8.9	7.0	2.5	4.1	1.3	56.0	13.5	0.2	2.0	275.7
	均值 2 Mean 2	22.9	10.8	7.1	3.8	5.1	0.9	59.9	15.0	0.3	2.7	267.5
	均值 3 Mean 3	20.5	11.6	8.4	6.4	6.9	0.7	69.3	15.8	0.3	2.4	284.2
	均值 4 Mean 4	19.7	10.9	8.1	6.9	7.0	0.6	67.9	17.1	0.3	2.4	262.5
	均值 5 Mean 5	22.3	11.6	7.2	8.1	6.2	0.5	69.1	16.8	0.3	2.6	264.6
	极值 Extreme	3.2	2.7	1.4	5.6	2.9	0.8	13.4	3.6	0.1	0.7	21.7
酰胺态氮 ($-CONH_2$)-N	均值 1 Mean 1	22.3	9.4	7.4	4.6	5.2	1.0	60.3	15.6	0.3	2.2	281.9
	均值 2 Mean 2	21.8	11.1	8.7	5.3	6.0	0.8	60.6	16.3	0.3	2.7	250.9
	均值 3 Mean 3	21.5	10.3	6.3	5.1	5.5	0.7	67.6	15.8	0.3	2.6	266.0
	均值 4 Mean 4	20.7	12.2	6.9	6.3	6.7	0.7	66.8	15.1	0.2	2.0	266.1
	均值 5 Mean 5	20.6	10.7	8.4	6.6	6.0	0.7	66.9	15.5	0.3	2.5	272.8
	极值 Extreme	1.7	2.8	2.4	2.1	1.5	0.3	7.3	1.3	0.1	0.8	27.6

注(Note)：均值 1、2、3、4、5 分别表示某一因素在该水平下的平均表现 Means of 1, 2, 3, 4 and 5 represent average performance of one factor in the level. Pn—Net photosynthetic rate; Gs—Stomatal conductance ; Ci—Concentration of carbon dioxide in the intercellular; Tr—Transpiration rate; WUE—Water use efficiency.

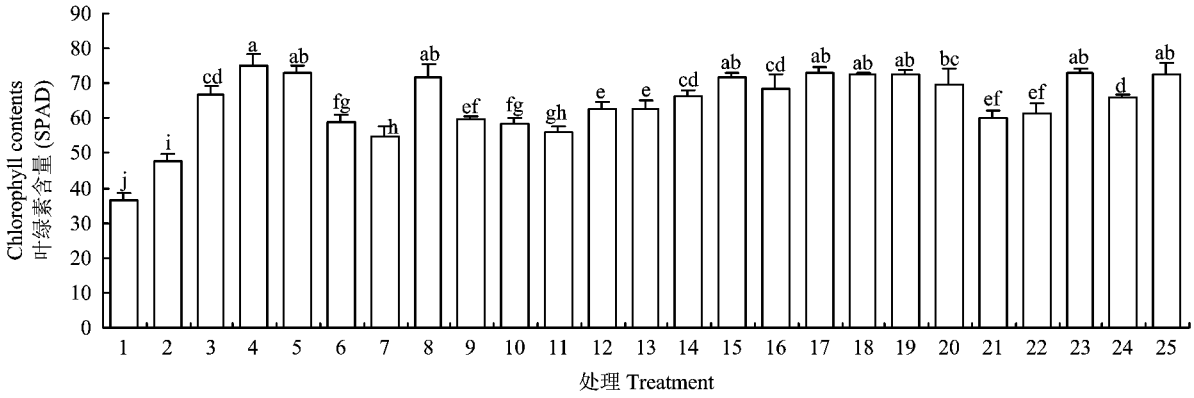

图1 菘蓝叶片内叶绿素含量对不同氮素及不同浓度的响应

Fig. 1 The response of chlorophyll contents in the leaves of *I. indigotica* to different nitrogen forms and concentrations

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异达5% Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels.]

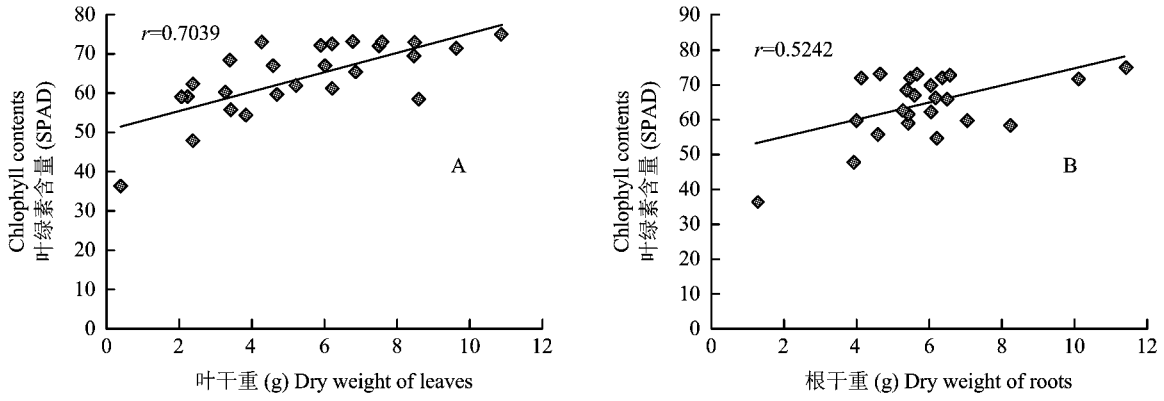

图2 氮素处理后菘蓝叶干重(A)、根干重(B)与叶绿素含量的相关性

Fig. 2 The correlations between chlorophyll contents (A) and dry weight of leaves (B) and roots of *I. indigotica* under the nitrogen treatments

2.3 不同氮素形态及其配比对菘蓝叶片气体交换参数的影响

不同形态及不同浓度氮素配比处理对菘蓝叶片的气体交换参数的影响存在较大的差异(表4),除21号组合外,氮素处理后菘蓝的净光合速率均高于对照,除12号与21号组合外均与对照间存在显著差异($P<0.05$),其中24、14、20、9、13号5个组合的净光合速率位于前五位,它们之间差异不显著($P>0.05$),说明氮素处理能有效地提高菘蓝叶片的净光合速率。直观分析(表3)显示,影响菘蓝叶片净光合速率的氮素形态依次为硝态氮、酰胺态氮与铵态氮。氮素处理后对叶片气孔导度的影响也存在较大的差异,氮素处理后气孔导度高于对照的有3、5、8、10、12、13、14、15、16、17、20、22等12个组合,其余的12个组合的气孔导度则低于对照,其中与对照间存在显著性差异($P<0.05$)的有:显著高于对照的为14、3、17、8、22号5个组合,显著低于对照的有4、24、11、21、7号5个组合;直观分析显示,影响菘蓝叶片气孔导度的氮素形态依次为酰胺态氮、硝态氮与铵态氮,而对蒸腾速率的影响则表现为所有24个处理组合均显著高于对照($P<0.05$),位于前5位的分别为22、10、3、24、12号组合;叶片气孔导度与蒸腾速率的相关性分析表明,二者间的相关性较低(图3-A),相关系数$r=0.3136$,说明蒸腾速率不完全与气孔导度相关,可能与其他因素还存在关联。直观分析显示,影响菘蓝叶片蒸腾速率的氮素形态依次为酰胺态氮、铵态氮与硝态氮。对胞间二氧化碳浓度(Ci)的影响表现为氮素处理后均显著低于对照,且与对照间差异显著($P<0.05$),其中7号组合的Ci值最低为199.1

表 4　菘蓝的气体交换参数对不同氮素形态及浓度处理的响应

Table 4　Response of gas exchange parameters on leaves of *I. indigotica* to different nitrogen forms and concentrations.

处理 Treatment	净光合速率 Pn [mmol/(m²·s)]	气孔导度 Gs [mol/(m²·s)]	胞间 CO_2 浓度 Ci [μmol/(m²·s)]	蒸腾速率 Tr [mmol/(m²·s)]	水分利用率 WUE
1	12.3 ±0.9 m	0.3 ±0.0 efgh	351.2 ±6.7 a	1.2 ±0.2l	9.9
2	15.6 ±0.8 fghi	0.3 ±0.0 fghi	270.5 ±10.4 fg	2.8 ±0.2 cde	5.6
3	14.7 ±0.6 hijk	0.4 ±0.0 b	285.2 ±13.7 de	3.1 ±0.5 b	4.8
4	17.0 ±1.1 bcde	0.2 ±0.0 ij	257.4 ±9.7 gh	2.0 ±0.3 ij	8.7
5	16.0 ±0.6 efg	0.3 ±0.0 efgh	275.7 ±10.8 ef	2.2 ±0.2 hi	7.4
6	13.8 ±0.7 kl	0.2 ±0.0 hij	268.3 ±12.3 fg	2.4 ±0.2 gh	5.7
7	14.7 ±0.8 hijk	0.1 ±0.0 l	199.1 ±20.4 k	2.0 ±0.2 ij	7.4
8	16.0 ±0.4 efgh	0.3 ±0.0 c	270.9 ±5.0 fg	2.7 ±0.2 def	5.9
9	17.5 ±0.7 abcd	0.2 ±0.1 hij	221.0 ±4.3 j	2.5 ±0.2 fg	7.1
10	16.8 ±1.0 def	0.3 ±0.0 cde	250.0 ±11.9 hi	3.5 ±0.1 a	4.9
11	15.3 ±1.4 ghij	0.2 ±0.0 k	200.5 ±6.8 k	2.3 ±0.2 gh	6.7
12	13.1 ±1.1 m	0.3 ±0.1def	289.9 ±8.9 cd	3.0 ±0.1 bc	4.3
13	17.2 ±1.0 abcde	0.3 ±0.0 efgh	275.9 ±5.4 ef	2.4 ±0.1 gh	7.1
14	18.2 ±0.6 ab	0.5 ±0.0 a	300.3 ±3.6 c	2.5 ±0.1 efg	7.2
15	17.1 ±0.17 abcde	0.3 ±0.0 cde	275.9 ±8.0 ef	2.4 ±0.2 gh	7.2
16	13.9 ±1.0 kl	0.3 ±0.0 defg	320.2 ±8.1 b	2.0 ±0.1 ij	7.0
17	16.1 ±0.4 efg	0.3 ±0.0 c	327.8 ±10.1 b	1.9 ±0.1 ij	8.3
18	14.3 ±1.2 jk	0.2 ±0.0 fghi	320.2 ±7.5 b	1.5 ±0.0 k	9.4
19	14.5 ±0.8 ijk	0.2 ±0.0 ghij	266.5 ±6.8 fg	1.8 ±0.1 j	7.9
20	18.0 ±0.8 abc	0.3 ±0.0cde	278.7 ±9.1 def	2.4 ±0.1 gh	7.7
21	12.2 ±1.0 m	0.2 ±0.0 k	238.2 ±4.9 i	2.0 ±0.1 ij	6.2
22	15.5 ±0.5 ghij	0.3 ±0.0cd	250.2 ±7.8 hi	3.5 ±0.1 a	4.4
23	16.9 ±1.5 cde	0.2 ±0.0 ghij	268.8 ±13.8 fg	2.0 ±0.1 ij	8.3
24	18.3 ±0.8 a	0.2 ±0.0j	267.0 ±8.2 fg	3.0 ±0.3 b	6.0
25	15.9 ±0.5 hij	0.2 ±0.0hij	242.5 ±9.6 i	2.8 ±0.1 bcd	5.7

注(Note): Pn—Net photosynthetic rate; Gs—Stomatal conductance ; Ci—Concentration of carbon dioxide in the intercellular; Tr—Transpiration rate; WUE—Water use efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant different among treatments at the 5% level.

μmol/(m²·s),净光合速率与胞间二氧化碳浓度的相关性分析(图 3-B)表明,经不同形态及不同浓度配比的氮素处理后二者间存在一定的负相关,相关系数 $r = -0.1897$,说明菘蓝叶片胞间二氧化碳浓度较高时其净光合速率相对较低。直观分析结果(表 3)显示,铵态氮影响胞间二氧化碳浓度最显著,其次是酰胺态氮与硝态氮。

结合菘蓝根的生长和干物质积累综合分析,硝态氮对菘蓝生长与光合参数影响最显著的指标是叶绿素、净光合速率、叶干重、根干重与根冠比,铵态氮影响最显著的是主根长度、侧根数与胞间二氧化碳浓度,酰胺态氮影响最显著的是主根直径、气孔

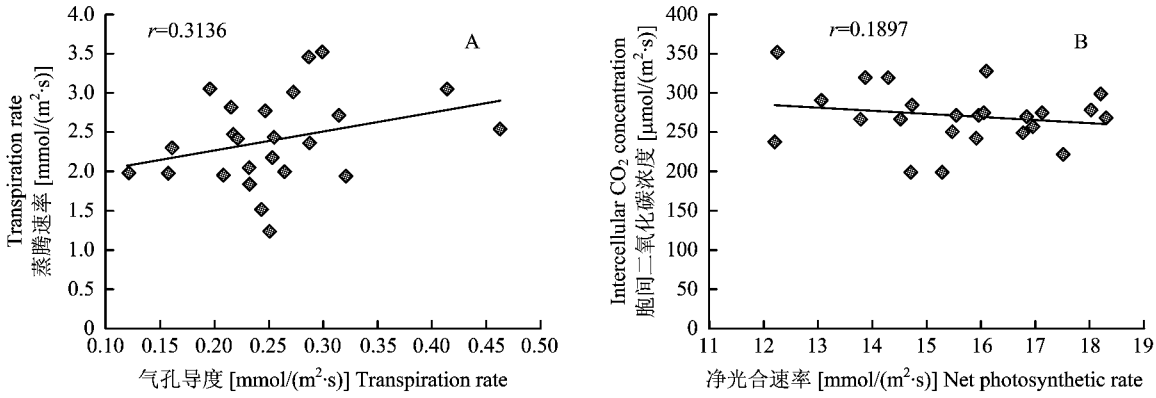

图3 氮素处理后菘蓝叶片气孔导度与蒸腾速率的相关性(A),叶片的净光合速率与胞间二氧化碳浓度的相关性(B)

Fig. 3 The correlations between stomatal conductance and transpiration rate(A), and between net photosynthetic rate and concentration of carbon dioxide in the intercellular (B)

导度与蒸腾速率,其中硝态氮与酰胺态氮对菘蓝主根直径的影响程度接近,由此可见,硝态氮是对菘蓝生长过程影响最重要的氮素形态。

3 讨论

3.1 氮素形态及配比对菘蓝生长的影响

植物在生长过程中,需要充足的不同形态的氮源。植物对硝态氮的响应存在复杂而精密的调节机制,低硝酸盐供应促进根的增殖,而高硝酸盐供应会抑制根的生长[11],即局部供应硝酸盐对侧根(lateral root,LR)伸长有明显的刺激效应,刺激侧根生长,NO_3^--N 供应能显著增加玉米侧根的长度和生物量[11],但是当植物组织中有高浓度的硝酸盐时则表现出对侧根分裂组织活动的抑制效应;这种抑制效应随着硝酸盐供应的增加而增加,当外界硝酸盐浓度在 10 mmol/L 以上时最明显[11-12]。在所有 24 个处理组合中,侧根分支数前 5 位的为 8、10、11、9 和 4 组合,除 11 号组合的硝态氮为 0 mmol/L 之外,其余组合的硝态氮均大于 5.0 mmol/L,也说明了适宜浓度的硝态氮对菘蓝侧根生长的刺激效应。而菘蓝主根直径分析结果显示,位于前五位的 4、15、18、8、22 组合中除 22 号组合外硝态氮均大于 5.0 mmol/L。结合硝态氮对菘蓝根、叶的干重与根冠比的影响,可以看出适宜的硝态氮是通过刺激菘蓝根的侧根生长、主根直径增加、叶与根的鲜重增加,从而促进了菘蓝的生长。K. Raja Reddy 等人[13]的研究表明,蓖麻叶的氮水平在不同时期存在差异,N 55.3 g/kg 有利于茎的延长,N 63 g/kg 利于节的增加,N 65.4 g/kg 利于增加叶面积,N 60.3 g/kg 则利于光合作用,低氮处理中叶的干重降幅最大,而根冠比则增加。Narumol Piwpuan 等人的研究结果表明[14],不同的氮素营养提供给风车草和新西兰麻在变化氮源的淹水环境中良好生长的能力,然而风车草可能更好地适应常年被水淹没的且有高 NH_4^+ 浓度的土壤,而新西兰麻则可以更好地适应在高 NO_3^- 条件的土壤中生长。李韵珠等人[15]以小麦和玉米为研究对象,研究了土壤水、氮条件与作物根系生长的关系,表明植物的根长密度(LrI)及其垂直分布和根长/冠重比值(Lr/DMp)均受土壤水氮条件的影响,因此对于菘蓝在不同氮素水平下的形态建成尚需要结合其对水分的利用开展更进一步的研究。

3.2 氮素形态对菘蓝叶绿素及光合参数的影响

氮是植物体内许多重要有机化合物的成份,氮是叶绿素的组成成份,叶绿素 a 和叶绿素 b 都是含氮的化合物,氮素的丰缺与叶绿素含量密切相关。Arunothai Jampeetong 等人[16]的研究结果表明,槐叶萍在只供给 NO_3^- 时比单独给予 NH_4^+ 或 NH_4^+ 与 NO_3^- 配合施用有更低的生长率、更短的根、更少叶绿素含量。铵态氮、硝态氮与酰胺态氮配合施用均能提高菘蓝的叶绿素含量,硝态氮对其影响最显著。光合参数(Pn、Gs、Ci、Tr)中的净光合速率也受硝态氮影响最大,其中 Pn 低于对照的 21 号组合为铵态氮 10、硝态氮 0、酰胺态氮 7.5 mmol/L,由此可见,硝态氮缺乏时能影响 Pn 值,这与晏枫霞等人[17]的适宜增硝有利于提高菘蓝的 Pn 的结果是一致的。不同形态氮素及浓度配比施用后的菘蓝叶片叶绿素含量与净光合速率间有一定的相关性,相关系数为

r = 0.4109，由此说明氮素处理后通过影响叶片叶绿素含量在一定程度上影响净光合速率，从而影响菘蓝叶的干重。

在酰胺态氮为 0 mmol/L 的 9、12、20 和 23 号 4 个组合中，净光合速率较大的 9 号（NH_4^+-N 为 2.5，NO_3^--N 为 7.5 mmol/L）与 20 号组合（NH_4^+-N 为 7.5，NO_3^--N 为 10 mmol/L）与 Pn 值最大的 24 号组合间不存在显著差异，这与晏枫霞等人[17]的研究，菘蓝在铵态氮－硝态氮比例为 75∶25 时 Pn 值最大的结果不一致，分析其原因，主要是由于本试验设计主要是为了考察对菘蓝生物学特性影响的 3 种形态氮素的主次效应，每一个处理的总氮量不固定，9 号与 20 号组合的总氮浓度分别为 10、17.5 mmol/L，分别小于和大于他们试验中的 14 mmol/L 的总氮量。在铵态氮为 0 mmol/L 的 2、3、4、5 号 4 个组合中，4 号组合的叶与根干重、叶绿素含量均为最高，其氮素组合为硝态氮 7.5 mmol/L、酰胺态氮 7.5 mmol/L，显示硝态氮与酰胺态氮配合施用也能有效地促进菘蓝的生长。对 3 种不同形态氮素及配比对菘蓝生物学特性影响的综合分析表明，硝态氮通过影响菘蓝功能叶片的叶绿素合成，使其叶绿素含量增加，同时也通过影响叶片的净光合速率促进其光合初产物的积累；其次，酰胺态氮也可通过影响菘蓝主根的直径而促进菘蓝的生长。

参 考 文 献：

[1] 赵平，孙谷寿，彭少林. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. 生态科学，1998，17(2)：36-42.
Zhao P, Sun G S, Peng S L. Ecophysiological research on nitrogen nutrition of plant[J]. Ecol. Sci., 1998, 17(2): 36-42.

[2] 陆景陵，胡霭堂. 植物营养学[M]. 北京：高等教育出版社，2006.
Lu J L, Hu A T. Science of plant nutrition[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[3] 田霄鸿，王朝辉，李生秀. 不同氮素形态及配比对蔬菜生长和品质的影响[J]. 西北农业大学学报，1999，27(2)：6-10.
Tian X H, Wang Z H, Li S X. Effect of different nitrogenous forms and NO_3^- to NH_4^+ ratio on growth and quality of vegetables [J]. Acta Univ. Agric. Bor. - occid., 1999, 27(2): 6-10.

[4] 曹翠玲，李生秀. 氮素形态对作物生理特性及生长的影响[J]. 华中农业大学学报，2004，23(5)：581-586.
Cao C L, Li S X. Effect of N form on crop physiological characteristics and growth [J]. J. Huazhong Agricultural University, 2004, 23(5): 581-586.

[5] 肖凯，张树华，邹定辉，张荣铣. 不同形态氮素对小麦光合特性的影响[J]. 作物学报，2000，26(1)：53-58.
Xiao K, Zhang S H, Zou D H, Zhang R X. The effects of different nitrogen forms on photosynthetic characteristics in wheat leaves[J]. Acta Agron. Sin., 2000, 26(1): 53-58.

[6] 汪建飞，董彩霞，沈其荣. 氮素不同形态配比对菠菜体内游离氨基酸含量和相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(4)：664-670.
Wang J F, Dong C X, Shen Q R. Effect of NH_4^+-N/NO_3^--N ratios on the free amino acids and three kinds of enzymes of nitrogen metabolism in spinach (*Spinacia oleracea* L.) shoot[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4): 664-670.

[7] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京：中国医药科技出版社，2010. 20-21.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of People's Republic of China. (One edition)[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2010. 20-21.

[8] 国家药典委员会，中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京：中国医药科技出版社，2010. 191-192.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of People's Republic of China (One edition)[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2010. 191-192.

[9] 晏枫霞，王康才，罗庆云，罗春红. 氮素形态对菘蓝活性成分和矿质元素含量的影响[J]. 江苏农业学报，2010，26(4)：735-739.
Yan F X, Wang K C, Luo Q Y, Luo C H. Effects of nitrogen forms on the active component and mineral elements contents of *Isatis indigotica* Fort[J]. Jiangsu J. Agric. Sci. 2010, 26(4): 735-739.

[10] 肖云华，赵雪玲，王康才，等. 不同氮素形态和浓度对菘蓝生物量与生物碱类成分的影响[J]. 中国中药杂志，2013，38(17)：2755-2760.
Xiao Y H, Zhao X L, Wang K C *et al*. Effect on the biomass and alkaloids of Isatidis Folium under different nitrogen forms and concentrations[J]. China J. Chin. Mater. Med., 2013, 38 (17): 2755-2760.

[11] 郭亚芬，米国华，陈范骏，张福锁. 硝酸盐供应对玉米侧根生长的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报，2005，31(1)：90-96.
Guo Y F, Mi G H, Chen F J, Zhang F S. Effect of NO_3 supply on lateral root growth in maize plants[J]. J. Plant Phys. Mol. Biol., 2005, 31(1): 90-96.

[12] 张林. 硝酸盐供应对拟南芥侧根发展的影响[J]. 浙江农业科学，2007，(1)：12-15.
Zhang L. Effect of supply of nitrates on lateral root development of *Arabidopsis thaliana*[J]. Zhejiang Agric. Sci., 2007, (1): 12-15.

[13] Raja Reddy K, Satyasai K. Matcha. Quantifying nitrogen effects on castor bean (*Ricinus communis* L.) development, growth, and hotosynthesis[J]. Ind. Crops Prod., 2010, 31: 185-191.

[14] Piwpuan N, Zhai X, Brix H. Nitrogen nutrition of *Cyperus laevigatus* and *Phormium tenax*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, nitrate reductase activity and N uptake kinetics[J]. Aquat. Bot., 2013, 106: 42-51.

[15] 李韵珠，王凤仙，刘素华. 土壤水氮资源的利用与管理 I. 土壤水氮条件与根系生长[J]. 植物营养与肥料学报，1999，5(3)：206-213.
Li Y Z, Wang F X, Liu S H. The usage and management of soil water and nitrogen resources. I. The relationship between soil water and nitrogen condition and root growth[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(3): 206-213.

[16] Jampeetong A, Brix H. Nitrogen nutrition of *Salvinia natans*: Effects of inorganic nitrogen form on growth, morphology, nitrate reductase activity and uptake kinetics of ammonium and nitrate [J]. Aquat. Bot., 2009, 90: 67-73.

[17] 晏枫霞，王康才，罗庆云，罗春红. 氮素形态对菘蓝氮代谢、光合作用及生长的影响[J]. 中国中药杂志，2009，34(16)：2039-2042.
Yan F X, Wang K C, Luo Q Y, Luo Ch H. Effects of NH_4^+-N/NO_3^--N ratio in applied supplementary fertilizer on nitrogen metabolism, photosynthesis and growth of *Isatis indigotica*[J]. China J. Chin. Mater. Med., 2009, 34(16): 2039-2042.