

氮素形态对冬油菜幼苗生长的影响

张树杰,张春雷*,李 玲,余利平

(中国农业科学院油料作物研究所,农业部油料作物生物学与遗传育种重点开放实验室,
农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室,湖北 武汉,430062)

摘要:通过营养液培养试验研究了硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)不同搭配比例对甘蓝型油菜中双9号幼苗生长的影响。试验设5个处理: NO_3^- : NH_4^+ 分别为100:0(N1)、75:25(N2)、50:50(N3)、25:75(N4)和0:100(N5)。结果发现,与N1处理相比,油菜幼苗干重、根长、根表面积、根体积、氮(N)含量及N积累量、硝酸还原酶活性等指标均以N2处理最高,之后随着营养液中 NH_4^+ 比例的升高而显著降低。而光合色素含量、铁(Fe)和锌(Zn)浓度却随营养液中 NH_4^+ 的添加而显著升高,锰(Mn)浓度随 NH_4^+ 的添加而显著降低。说明中双9号属于喜硝态氮的作物,在供应 NO_3^- 时搭配适量的 NH_4^+ 更有利于其生长,但是当 NH_4^+ 比例超过50%时,则会显著抑制其生长。

关键词:油菜;营养液培养;根系形态;光合色素;硝酸还原酶;微量元素

中图分类号:S565.401 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-9084(2011)06-0567-07

Effects of nitrogen forms on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) seedling growth

ZHANG Shu-jie, ZHANG Chun-lei*, LI Ling, YU Li-ping

(Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Oil Crop Biology and Genetic Improvement of the Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China)

Abstract: A hydroponic experiment was carried out to investigate the effects of nitrogen (N) forms on winter rapeseed (*Brassica napus* L. cv Zhongshuang 9) seedling growth. The tests included 5 treatments with NO_3^- : NH_4^+ ratios of 100:0 (N1), 75:25 (N2), 50:50 (N3), 25:75 (N4) and 0:100 (N5). Results showed that the highest dry weight, root length, root surface area, root volume, N concentration and accumulation and nitrate reductase activity were obtained in N2 treatment. They were significantly decreased when NH_4^+ proportion in hydroponic solution increased in N3 to N5. On the contrast, photosynthetic pigments contents, Fe and Zn concentrations of plants were significantly increased from N1 to N5, except Mn concentration. Results indicated that rapeseed Zhongshuang 9 seedlings preferred to use NO_3^- as N source and their growth performance was more pronounced when NO_3^- combined with NH_4^+ below 50%.

Key words: *Brassica napus* L.; Hydroponic; Root morphology; Photosynthetic pigment; Nitrate reductase; Microelement

氮(N)是植物生长的必需营养元素,土壤中N素的供应影响植物生长^[1,2]。土壤中的N以各种复杂的化学形态存在,其中硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)是植物可吸收利用的主要无机N素形

态^[3-5]。土壤N素形态分布受土壤有机质含量、土壤水分和通气条件等因素影响^[6]。一般的农田土壤往往以硝态氮为主,而在酸性土壤或淹水条件下,土壤中铵态氮含量往往更高^[7,8]。植物吸收N素的

收稿日期:2011-05-11

基金项目:国家现代油菜产业体系建设专项(MATS);农业部公益性科研院所专项资金项目(1610172011016)

作者简介:张树杰(1972-),男,陕西省延安市人,博士,主要从事作物生理生态与栽培技术研究,E-mail: sjzhang1972@126.com

*通讯作者:张春雷,男,陕西省汉中,人,博士,研究员,主要从事油菜生理与高效栽培技术研究,Tel & Fax 027-86739796, E-mail: clzhang@vip.sina.com

形态会影响植物的生理过程,如 N 素同化、呼吸作用、光合作用以及阴阳离子平衡等^[6,9]。因此,植物在长期的进化过程中形成了对不同 N 素形态的偏向选择性^[3,4]。有的植物喜欢以硝态氮为主要 N 源,如黄瓜(*Cucumis sativus*)和番茄(*Lycopersicon esculentum*),在硝态氮为 N 源时生长良好,而在铵态氮为主要 N 源时,即使 NH₄⁺ 浓度很低也会抑制其生长^[10,11]。另一些植物,如水稻和针叶类树木则喜欢以铵态氮作为 N 源^[3,4,6,12]。但多数植物在混合 N 源中生长更好^[3,4,6]。

油菜(*Brassica napus* L. 和 *Brassica rapa* L.) 是我国主要的油料作物^[13-15],其幼苗对 N 的需求量很大^[2,16]。研究认为,冬油菜幼苗期对 N 的吸收能力很强,可以达到 350 kg · hm⁻²^[17]。Rathke 等^[2]认为,冬前提高氮肥供应可以促进冬油菜叶面积的增加,进而可以增加春季单株角果数和籽粒产量。但是,有关氮素形态对冬油菜幼苗生长及生理过程影响的研究还不够深入。本文通过营养液培养试验,研究不同比例硝态氮和铵态氮混合对冬油菜(*B. napus*)中双 9 号幼苗生长和生理过程的影响,旨在为提高 N 肥利用效率,促进油菜高产、高效生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试油菜为长江流域广泛种植的双低油菜品种中双 9 号(*B. napus* L.),由中国农业科学院油料作物研究所生物技术育种课题组提供。于 2010 年 9 月至 11 月在中国农业科学院油料作物研究所(东经 114°20′,北纬 30°37′)网室内进行试验。

1.2 试验设计

饱满的油菜种子用 1% 次氯酸钠溶液浸泡 10min,去离子水冲洗干净,均匀地摆放在铺垫有湿润滤纸的培养皿中,生长箱(温度 25℃,湿度 60%)催芽培养。待幼苗生长至 3cm 时,挑选生长一致的健壮幼苗移植到营养液中。培养箱(30cm × 20cm × 10cm,) 体积 6.0L,内装营养液 5.8L,覆盖中间开有 2 孔的塑料板,每孔 1 株油菜幼苗。营养液中 N 素浓度为 8mmol/L,NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 比例分别设置为 100: 0(N1)、75: 25(N2)、50: 50(N3)、25: 75(N4) 和 0: 100(N5)。其它营养元素浓度分别为:K⁺ 3.05 mmol/L, Ca²⁺ 2.0mmol /L,SO₄²⁻ 1.0mmol/L,Mg²⁺ 1.0mmol/L,PO₄³⁻ 1.0mmol/L,Cl⁻ 3.15mmol/L,Fe-EDTA 20.0μmol/L,BO₃³⁻ 25.0μmol/L,Zn²⁺ 2.0 μmol/L, Cu²⁺ 0.5μmol/L, Mn²⁺ 2.0μmol/L,

Mo₇O₂₄²⁻ 0.5μmol/L^[18],pH5.8 ± 0.1。每处理 4 个重复、随机排列。每天 09: 00 更换营养液,同时用增氧泵定时通气。

1.3 采样方法

待幼苗生长至 30d 时收获全株。先用去离子水多次清洗植株,去除地上部尘土和根系上的养分离子,用根系分析仪(WinRHIZO Pro. LA2400)测定根系形态参数。每箱取 1 株幼苗在 105℃ 下杀青 30min,80℃ 烘干至恒重,测定生物量和元素含量。另 1 株 4℃ 保存,测定光合色素含量及其它生理指标。

1.4 测定项目

1.4.1 光合色素含量测定 光合色素含量的测定参照 Zhang 等^[19]的方法进行。取鲜叶 0.2g 加少量碳酸钙粉末和 2~3mL 95% 乙醇匀浆。匀浆液过滤到 25mL 棕色容量瓶中,用 95% 乙醇冲洗研钵和滤纸多次后定容至刻度。4℃、暗条件下用分光光度计测定提取液在 665nm、649nm 和 460nm 波长下的吸光值,计算光合色素含量。

1.4.2 硝酸还原酶活性(NRA)测定 NRA 测定参照 Zhang 等^[16]方法进行。取鲜样 0.5g 放置于预冷的研钵中,加入 4.0mL 0.025mol/L 磷酸缓冲液(pH8.7,内含 12.11mg/L 半胱氨酸和 3.72mg/L EDTA)在冰浴中研磨匀浆。匀浆液 4℃、4 000 rpm/min 离心 15min。取上清液 0.4mL,加入 1.2mL 0.1 mol/L KOH 缓冲液和 0.4mL NADH,混匀在 25℃ 水浴中保温 30min。然后加入 1.0mL 1% 磺胺溶液终止反应,再加入 1.0mL 0.02% 萘基乙烯胺溶液显色 15min,取上清液在 540nm 波长下测定吸光值,对照标准曲线计算硝酸还原酶活性。NRA 单位表示为 μgNO₂ - N · g_{FW}⁻¹ · h⁻¹。

1.4.3 N 及微量元素含量测定 植株 N 含量测定采用浓 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,微量凯氏定氮仪测定^[20],N 积累量用 N 含量 × 植株干重计算。微量元素铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)含量用 HNO₃ - HClO₄ (4: 1, v/v) 消煮,电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP - OES,Optima 7000 DV,Pekin Elmer)测定^[19]。

1.5 数据分析

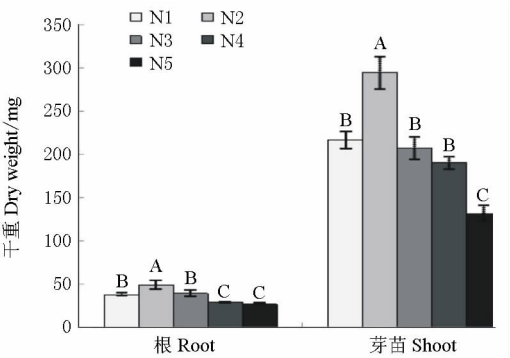
所有数据均为 4 次重复的平均值 ± 标准误(± SE),SPSS(16.0)软件进行 ANOVA 统计分析,Duncan's 法检验处理间差异显著性(*p* < 0.01 和 *p* < 0.05),Excel 制作相应图表。

2 结果与分析

2.1 N 素形态对油菜幼苗干重的影响

收获时,中双 9 号冬油菜幼苗根系和地上部干

重均以 N2 处理为最高,N5 处理最低。在营养液中 NH_4^+ 所占比例超过 25% 时,油菜幼苗根系和地上部干重均随营养液中 NH_4^+ 浓度增加而显著降低($p < 0.01$)。说明无论是根系还是地上部均受营养液中 N 素形态的显著影响(图 1)。



注:Duncan 检验,不同小写和大写字母分别表示差异显著($p < 0.05$)和极显著($p < 0.01$);N1 至 N5 分别代表营养液中 $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 比例为 100: 0,75: 25,50: 50,25: 75 和 0: 100 处理,下同
Note:Different lower case and capital letters indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level (Duncan's test) respectively.
N1 to N5 indicated $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratios as 100: 0, 75: 25, 50: 50, 25: 75 and 0: 100 in hydroponic solution. Same as below

图 1 N 形态对中双 9 号油菜干重的影响
Fig.1 Effect of N forms on plant dry weight of rapeseed Zhongshuang 9

2.2 N 素形态对油菜幼苗根系生长的影响

中双 9 号油菜幼苗主要根系形态参数在各处理间差异显著(表 1),说明 N 素形态对油菜幼苗根系生长影响显著。其中,总根长、根表面积和根体积三

个指标在 N2 处理时最大,然后随着 NH_4^+ 浓度的升高而显著降低($p < 0.01$)。根平均直径在 N5 时最高($p < 0.01$),N2 时次之,N1、N3 和 N4 处理间没有显著差异。根尖数以 N1 处理最高,并随 NH_4^+ 浓度升高而显著降低($p < 0.01$)。

2.3 N 素形态对油菜幼苗光合色素含量的影响
营养液中 N 素形态对油菜幼苗光合色素含量的影响显著。与 NO_3^- 为单一 N 源相比,营养液中添加 NH_4^+ 后,油菜幼苗叶片中叶绿素 a(Chl a)和叶绿素 b(Chl b)含量显著($p < 0.01$)升高,在 N2 处理时最高。因此,叶绿素总量也是在 N2 处理最高。类胡萝卜素含量同叶绿素含量变化趋势一致,随着营养液中 NH_4^+ 的添加,显著($p < 0.01$)升高,其中仍以 N2 处理最高(表 2)。

2.4 N 素形态对油菜幼苗体内硝酸还原酶活性的影响
中双 9 号油菜幼苗体内硝酸还原酶活性(NRA)受营养液中 N 素形态影响显著(图 2)。无论是根系还是叶片,NRA 均是 N2 处理最高。在油菜幼苗根系中,N3 处理使 NRA 显著高于 N1 却显著低于 N2;N3 处理与 N1 处理之间 NRA 差异不大;而 N5 处理却显著低于 N1($p < 0.01$)。在油菜幼苗叶片中,N3 处理使 NRA 略高于 N1 却显著低于 N2;N4 和 N5 处理则使 NRA 显著低于 N1($p < 0.01$)。

表 1 N 素形态对中双 9 号油菜根系形态参数的影响
Table 1 Effects of N forms on root morphology (±SE) in rapeseed Zhongshuang 9 seedlings

处理 Treatment	根长 Length/cm	根表面积 Surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³	平均根直径 Average diameter/mm	根尖数 Tip number
N1	597.7 ± 26.9 B	54.2 ± 3.1 B	0.38 ± 0.02 B	0.28 ± 0.01 C	787 ± 25 A
N2	667.3 ± 20.9 A	64.8 ± 1.1 A	0.48 ± 0.02 A	0.31 ± 0.01 B	704 ± 39 B
N3	594.4 ± 17.9 B	56.3 ± 1.7 B	0.41 ± 0.02 B	0.29 ± 0.01 C	740 ± 74 A
N4	363.0 ± 20.6 C	32.3 ± 1.2 C	0.23 ± 0.01 D	0.28 ± 0.01 C	509 ± 58 B
N5	333.5 ± 10.0 C	34.4 ± 0.7 C	0.28 ± 0.01 C	0.33 ± 0.01 A	319 ± 15 C

表 2 N 素形态对中双 9 号油菜叶片光合色素含量的影响
Table 2 Effects of N forms on photosynthetic pigments (±SE) in Zhongshuang 9 seedlings

处理 Treatment	色素含量 Pigments content /(μg · g ⁻¹ FW)			
	叶绿素 Chl a	叶绿素 Chl b	叶绿素总量 Chl a + Chl b	类胡萝卜素 Carotenoid
N1	520.5 ± 28.4 C	232.0 ± 8.8 C	752.5 ± 31.7 C	114.1 ± 12.3 B
N2	881.4 ± 26.1 A	337.7 ± 12.9 A	1 219.1 ± 36.8 A	176.0 ± 4.5 A
N3	670.9 ± 16.2 B	292.6 ± 9.8 B	963.5 ± 25.3 B	128.9 ± 3.2 B
N4	806.5 ± 32.2 A	324.6 ± 14.9 AB	1 131.1 ± 47.0 A	165.8 ± 6.7 A
N5	851.7 ± 11.2 A	335.8 ± 5.5 A	1 187.4 ± 16.0 A	172.6 ± 4.4 A

注:FW 代表鲜重,下同 Note:FW: fresh weight, the same as below

2.5 N 素形态对油菜幼苗体内 N 含量与 N 积累量的影响
从 N 含量来看,与 N1 处理相比,N2 处理使中

双 9 号油菜幼苗根系和地上部 N 含量显著($p < 0.05$)升高;N3 和 N5 处理使根系和地上部 N 含量轻微降低;而 N4 处理使地上部 N 含量显著升高、却

使根系 N 含量轻微降低(图 3A)。从 N 积累量来看,与 N1 处理相比,N2 处理使中双 9 号油菜幼苗根系和地上部 N 积累量显著升高($p < 0.01$);N5 处理使根系和地上部 N 积累量显著降低($p < 0.01$);N4 处理对油菜幼苗根系和地上部 N 积累量没有产生显著影响;而 N5 处理对地上部 N 积累量没有显著影响、却使根系 N 积累量显著降低(图 3B)。

2.6 N 素形态对油菜幼苗体内微量元素 Fe、Mn、Zn 含量的影响

在中双 9 号油菜幼苗根系中,随着营养液中 NH_4^+ 所占比例的升高,Fe 和 Zn 浓度显著($p < 0.01$)升高,而 Mn 浓度显著($p < 0.01$)降低(图 4A)。其中 Fe 和 Zn 浓度均为 N5 处理最高,N1 最低;而 Mn 浓度为 N1 处理最高,N4 最低。在油菜幼苗地上部,Fe、Mn、Zn 浓度变化相对复杂(图 4B)。与 N1 处理相比,油菜幼苗地上部 Fe 浓度因 NH_4^+

的添加而升高,但只有 N2 和 N5 处理达到显著性差异($p < 0.01$);Mn 浓度在 N2、N3 和 N4 处理时显著降低($p < 0.01$),而在 N5 处理时没有显著变化;Zn 浓度在 N2 和 N5 处理时显著升高($p < 0.01$),却在 N3 和 N4 处理时没有显著变化。

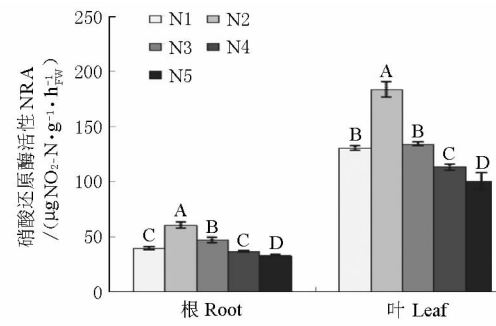
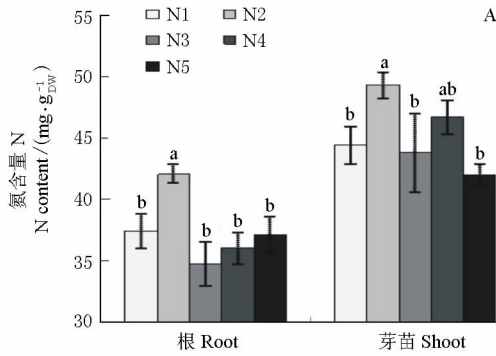


图 2 N 素形态对中双 9 号油菜根系和叶片硝酸还原酶活性(NRA)的影响

Fig. 2 Effects of N forms on NRA of Zhongshuang 9 seedlings



注:DW 代表干重,下同 Note:DW:dry weight, same as below

图 3 N 素形态对中双 9 号 N 含量(A)及 N 积累量(B)的影响

Fig. 3 Effects of N forms on N contents (A) and accumulations (B) of Zhongshuang 9 seedlings

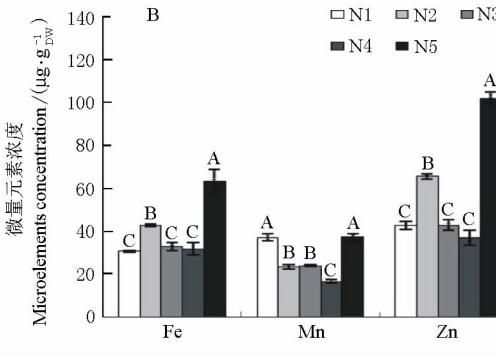
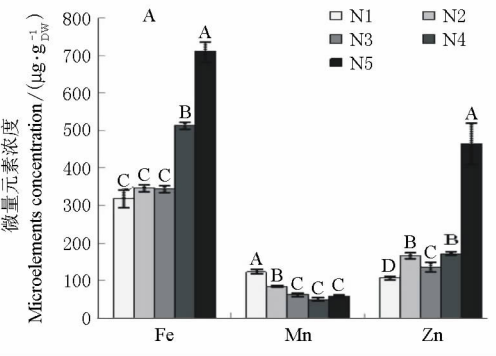
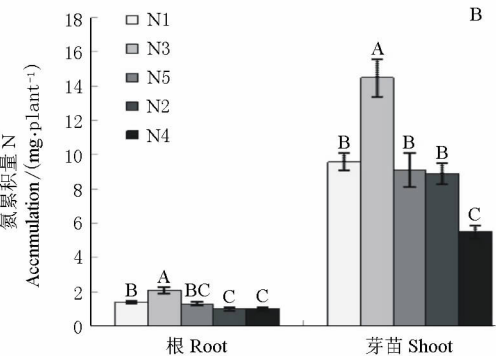


图 4 N 形态对油菜根系(A)和地上部(B)微量元素浓度的影响

Fig. 4 Effects of N forms on roots (A) and shoots (B) micro - element concentration of Zhongshuang 9 seedlings

3 结果与讨论

本文发现,与硝态氮(NO_3^-)为单一 N 源的 N1 处理相比,铵态氮(NH_4^+)在营养液中比例为 25% (N2)时中双 9 号冬油菜(*B. napus* L.)幼苗根系和地上部干重显著增加,而当营养液中 NH_4^+ 比例超

过 50%时(N4 和 N5)油菜幼苗根系和地上部干重显著降低。这个结果与其它研究有一致性^[21~23],如 Tabatabaei 等^[21]研究发现,草莓(*Fragaria ananassa* var *Camarosa*)叶片干重在 NO_3^- : NH_4^+ 比例为 75: 25 和 50: 50 时最大,而在 NH_4^+ 比例超过 50% 时显著低于 NO_3^- 为单一 N 源处理。Lu 等^[22]也发现,与

NO_3^- 为单一 N 源相比,番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 幼苗根系和地上部干重在 $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ 为 75:25 时显著升高 10.3% 和 15.6%,而在 $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ 比例为 50:50 时显著降低 17.9% 和 16.0%。Tylová 等^[23] 研究发现,高浓度 NH_4^+ 显著降低滨海沼生植物 *Glyceria maxima* 的生物量,而对另一种沼生植物 *Phragmites australis* 却没有产生显著影响。相反,对于喜铵植物而言,郭亚芬等^[3] 研究发现,红松 (*Pinus koraiensis*) 幼苗在 $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ 为 0:4 或 1:3 时生长最好,而当 NO_3^- 比例超过 50% 则抑制了其生长。

高浓度 NH_4^+ 会对许多农作物产生毒害作用,抑制其生长,如番茄、大麦、豆类、芥菜、甜菜和黄瓜等。多数研究者把 NH_4^+ 的这种毒害作用称为“铵毒”^[6,24]。“铵毒”不仅能引起作物生长受阻、根系畸变、光合作用降低、离子平衡失调等^[8],还会引起作物根系生长受抑,降低细根与粗根的比例^[6,25]。Rothstein 等^[25] 研究发现,升高 N 源中 NH_4^+ 的比例显著抑制了冷杉 (*Abies fraseri*) 细根的形成。焦立新等^[26] 研究也发现,随着培养基质中 NH_4^+ 浓度的增加,沉水植物穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 主根数量和主根总长显著降低,而主根直径、主根与侧根比例却呈现增大趋势。本研究得出了类似的结果,在营养液 NH_4^+ 比例超过 50% 时不仅油菜幼苗干重显著降低,细根与粗根比例也显著降低,推测是 NH_4^+ 的毒害所致。

植物光合色素是绿色植物光合系统的中心成分,其含量的变化往往会引起植物整体代谢过程的改变。许多研究者认为,高浓度 NH_4^+ 能够加速光合色素的降解、引起光合速率降低,从而导致植物生长受阻^[6,9,12]。而在本研究中,油菜幼苗叶片中的光合色素含量,包括叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量因 NH_4^+ 的添加而显著升高,其中 N2 处理最高。这个结果与 Jampeetong 等^[8] 研究结果一致,他们发现在以 NO_3^- 为单一 N 源时,水生蕨类植物 *Salvinia natans* 叶绿素含量显著低于以 NH_4^+ 为单一 N 源或 NO_3^- 和 NH_4^+ 复合 N 源处理。不同的是 Wang 等^[27] 发现水生植物 *Hydrilla verticillata* Royle 叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量在 1.5 ~ 3.0 mmol/L NH_4^+ 处理 12h 后显著降低。可能不同植物对 NH_4^+ 毒害的临界阈值不同。有研究者认为,敏感植物对 NH_4^+ 毒害的临界浓度为 0.1 ~ 0.5 mmol/L,而抗性植物对 NH_4^+ 毒害的临界浓度在 5.0 mmol/L 以上^[6,8]。另外,中双 9 号幼苗生物量的降低可能也

是 N4 和 N5 处理中光合色素含量显著升高的原因之一,因为此时幼苗地上部干重显著降低。

硝酸还原酶(NR)是植物 N 素代谢过程中的起始酶和限速酶,是催化 NO_3^- 转化为 NO_2^- 的关键酶,其活性可以作为植物同化利用 N 素能力的评价指标^[16,28]。在本研究中,无论是在油菜幼苗根系还是叶片,硝酸还原酶活性(NRA)均以 N2 处理最高,而后随着营养液中 NH_4^+ 比例的增加显著降低,并且根系 NRA 降低的幅度要大于叶片,说明随着 NH_4^+ 比例的升高,油菜幼苗对 NO_3^- 的同化能力在逐渐减弱。研究认为,适当比例的 NH_4^+ 与 NO_3^- 可以促进植物的 N 素吸收,但是高浓度的 NH_4^+ 会有抑制作用^[8]。Kronzucker 等^[29] 认为,植物在 NO_3^- 和 NH_4^+ 混用条件下, N 素同化利用率要显著高于单一(NO_3^- 或 NH_4^+) N 源处理。在本研究中,与 N1 处理相比, N2 处理使油菜幼苗根系和地上部 N 含量和 N 累积量显著增加,而 N4 和 N5 处理却使油菜根系和地上部 N 含量和 N 累积量显著降低。说明高浓度 NH_4^+ 条件下,油菜幼苗对 N 素的吸收和同化受到抑制,这个结果与高浓度 NH_4^+ 条件下油菜幼苗体内 NRA 显著降低的结果一致。因此,抑制 NO_3^- 的吸收和同化,降低植株对 N 的吸收利用可能是高浓度 NH_4^+ 抑制油菜幼苗生长的主要原因之一。

许多研究认为,植物以 NH_4^+ 为主要 N 源时,细胞和组织中矿质离子(如 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)含量会发生显著变化,表明 NH_4^+ 影响着植物对矿质离子的吸收^[6,25,26,30]。Kotsiras 等^[30] 研究发现,高浓度 NH_4^+ 降低了黄瓜 (*Cucumis sativus* L. cv Palmera) 果实中 Mn 浓度,但对 Fe 和 Zn 没有产生显著影响。Roosta 等^[24] 发现,5.0 和 10.0 mmol/L NH_4^+ 显著降低了黄瓜 (*C. sativus* L. cv Styx) 中 Ca 和 Mg 含量,却使 P 和 S 含量显著升高。Tylová 等^[23] 研究发现,在以 NH_4^+ 为 N 源时,滨海沼生植物 *G. maxima* 根系中 K^+ 和 Mg^{2+} 浓度低于以 NO_3^- 为 N 源,但 Ca^{2+} 浓度却没有显著变化;而在另一种沼生植物 *P. australis* 中 NH_4^+ 对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度没有显著影响。焦立新等^[26] 研究发现,沉积物中添加氯化铵显著降低穗花狐尾藻 (*M. spicatum*) 体内 P 的含量。本试验中,随着营养液中 NH_4^+ 比例的升高,油菜幼苗根系和地上部 Fe 和 Zn 浓度显著升高,而 Mn 浓度却显著降低。这个结果说明, NH_4^+ 影响了油菜幼苗对矿质离子的吸收和利用。因此,扰乱细胞和组织中阴阳离子平衡、引起矿质元素代谢紊乱可能是高浓度

NH₄⁺降低油菜幼苗生长的另一个主要原因^[6,8]。

综上,本研究发现甘蓝型油菜中双9号是喜硝作物,在供应NO₃⁻的同时搭配适量的NH₄⁺(NO₃⁻:NH₄⁺为75:25)更有利于生长。但是当NH₄⁺比例超过50%时则会显著抑制其生长,其原因可能是高浓度NH₄⁺抑制幼苗对N素的吸收和同化、引起矿质元素代谢紊乱。

参考文献:

[1] 李志玉,郭庆元,廖 星,等. 不同氮水平对双低油菜中双9号产量和品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2007,29(2):184-188.

[2] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review[J]. Agr Ecosyst Environ, 2006,117:80-108.

[3] 郭亚芬,孔凡婧,付连云,等. 不同NH₄⁺/NO₃⁻配比对红松幼苗生长的影响[J]. 土壤通报,2010,41(4):923-926.

[4] 张 韫,崔晓阳. 生境因子作用下NO₃⁻/NH₄⁺吸收及硝酸还原酶活性变化[J]. 土壤通报,2010,41(1):242-247.

[5] Sánchez E, Rivero R M, Ruiz J M, et al. Changes in biomass, enzymatic activity and protein concentration in roots and leaves of green bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv Strike) under high NH₄NO₃ application rates[J]. Scientia Horticulturae, 2004,99:237-248.

[6] Britto D T, Kronzucker H J. NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review[J]. J Plant Physiol, 2002,159:567-584.

[7] Dan T H, Brix H. Growth responses of the perennial legume *Sesbania sesban* to NH₄ and NO₃ nutrition and effects on root nodulation[J]. Aquatic Botany, 2009,91:238-244.

[8] Jampeetong A, Brix H. Effects of NH₄⁺ concentration on growth, morphology and NH₄⁺ uptake kinetics of *Salvinia natans*[J]. Ecol Eng, 2009,35:695-702.

[9] Roosta H R, Sajjadinia A, Rahimi A, et al. Responses of cucumber plant to NH₄⁺ and NO₃⁻ nutrition: The relative addition rate technique vs. cultivation at constant nitrogen concentration [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 121:397-403.

[10] Kotsiras A, Olympios C M, Passam H C. Effects of nitrogen form and concentration on yield and quality of cucumbers grown on rockwool during spring and winter in southern Greece[J]. J Plant Nutr, 2005,13(10):1291-1306.

[11] Claussen W. Growth, water use efficiency, and proline content of hydroponically grown tomato plants as affected by nitrogen source and nutrient concentration [J]. Plant Soil, 2002,247:199-209.

[12] Britto D T, Kronzucker H J. Bioengineering nitrogen acquisition in rice: Can novel initiatives in rice genomic and physiology contribute to global food security [J]. BioEssays, 2004,26:683-692.

[13] 殷 艳,王汉中,廖 星. 2009年我国油菜产业发展形势分析及对策建议[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(2):259-262.

[14] 王汉中. 我国油菜产需形势分析及产业发展对策 [J]. 中国油料作物学报, 2007,29(1):101-105.

[15] 苏 伟,鲁剑巍,李云春,等. 氮肥运筹方式对油菜产量、氮肥利用率级氮素淋失的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010,32(4):558-562.

[16] Zhang S J, Chao Y, Zhang C L, et al. Earthworms enhanced winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) growth and nitrogen uptake [J]. Agr Ecosyst Environ, 2010, 139:463-468.

[17] Colnenne C, Meynard J M, Roche R, et al. Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape [J]. Euro J Agron, 2002,17:11-28.

[18] Blake - Kalf M M A, Harrison K R, Hawkesford M J, et al. Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth [J]. Plant Physiol, 1998,118:1337-1344.

[19] Zhang S J, Hu F, Li H X, et al. Influence of earthworm mucus and amino acids on tomato seedling growth and cadmium accumulation [J]. Environ Pollut, 2009,157: 2737-2742.

[20] Vogeler I, Rogasik J, Funder U, et al. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake [J]. Soil Tillage Res, 2009,103:137-143.

[21] Tabatabaei S J, Yusefi M, Hajiloo J. Effects of shading and NO₃:NH₄ ratio on the yield, quality and N metabolism in strawberry [J]. Scientia Horticulturae, 2008, 116:264-272.

[22] Lu Y L, Xu Y C, Shen Q R, et al. Effects of different nitrogen forms on the growth and cytokinin content in xylem sap of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings [J]. Plant Soil, 2009,315:67-77.

[23] Tylová E, Steinbachová L, Votrubová O, et al. Different sensitivity of *Phragmites australis* and *Glyceria maxima* to high availability of ammonium - N [J]. Aquatic Botany, 2008,88:93-98.

[24] Roosta H R, Schjoerring J K. Effects of ammonium toxicity on nitrogen metabolism and elemental profile of cu-

- cumber (*Cucumis sativus* L. , cv Styx) plants [J]. J Plant Nutr, 2007, 30: 1 933 – 1 951.
- [25] Rothstein D E, Cregg B M. Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of fraser fir (*Abies fraseri*) [J]. Forest Ecol Manag, 2005, 219: 69 – 80.
- [26] 焦立新, 王圣瑞, 金相灿. 外源 NH_4^+ 对穗花狐尾藻根系形态和养分吸收的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (7): 1 817 – 1 824.
- [27] Wang C, Zhang S H, Wang P F, et al. Effects of ammonium on the antioxidative response in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle plants [J]. Ecotox Environ Safe, 2010, 73: 189 – 195.
- [28] 李合生. 现代植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 216 – 222.
- [29] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D M, et al. Nitrate – ammonium synergism in rice: A subcellular analysis [J]. Plant Physiol, 1999, 119: 1 041 – 1 046.
- [30] Kotsiras A, Olympios C M, Drosopoulos J, et al. Effects of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruits [J]. Scientia Horticulturae, 2002, 95: 175 – 183.