

氮素形态对烟苗根系生长及碳、氮积累的影响

邢 瑶¹, 孙泽东¹, 陈 乐², 马兴华^{1*}, 张本强³, 郑成鹏⁴

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 农业部烟草生物学与加工重点实验室, 青岛 266101; 2. 云南省烟草公司红河州公司, 云南红河 652399; 3. 山东中烟工业有限责任公司, 济南 250014; 4. 山东临沂烟草有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 为探讨烤烟幼苗生长、根系发育及碳氮积累对不同氮素形态的响应, 选用烤烟品种 NC55, 在水培条件下设置相同氮浓度的全铵 ($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^- = 100:0$)、铵硝各半 ($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^- = 50:50$) 和全硝 ($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^- = 0:100$) 3 个处理, 测定不同处理的干物质积累、根系形态、烟株碳氮含量及碳氮积累量。结果表明, 地上部分生物量和总生物量在不同处理时间均表现为全硝处理 > 铵硝各半处理 > 全铵处理。处理后 7 d 和 14 d, 根系生物量、总长度、总体积、总表面积以及各器官的碳、氮积累量和总氮积累量表现为全硝处理 > 铵硝各半处理 > 全铵处理; 处理后 21 d, 上述指标表现为铵硝各半处理 > 全硝处理 > 全铵处理。铵态氮肥作为单一氮源抑制了烤烟生长, 硝态氮肥有利于地上部生长和碳积累, 但长时间作为单一氮源根系生长缓慢, 铵硝混合态氮素更有利于根系的生长发育和碳氮积累。

关键词: 烤烟; 氮素形态; 根系形态; 碳积累量; 氮积累量

中图分类号: S572.06

文章编号: 1007-5119(2015)05-0013-06

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2015.05.003

Effect of Nitrogen form on Root Growth and C and N Accumulation of Flue-cured Tobacco Seedlings

XING Yao¹, SUN Zedong¹, CHEN Le², MA Xinghua^{1*}, ZHANG Benqiang³, ZHENG Chengpeng⁴

(1. Tobacco Research Institute of CAAS, Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture, Qingdao 266101, China; 2. Honghe Tobacco Company of Yunnan, Honghe, Yunnan 652399, China; 3. China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Jinan 250014, China; 4. Linyi Tobacco Company of Shandong Province, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: In order to investigate the response of root growth, C and N accumulation of flue-cured tobacco seedlings to different nitrogen forms, hydroponic experiments were conducted by supplying equal amount of N in three different ratios of $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (100:0, as 100-0AN; 50:50, as 50-50AN; 0:100, as 0-100AN) to seedlings of flue-cured tobacco cultivar NC55. Plant dry biomass, root morphology, C and N content, C and N accumulation were assayed during the cultivation. The results showed that shoot and total biomass showed 0-100AN>50-50AN>100-0AN at all treating times. On 7 and 14 d, root biomass, root total length, root total volume, root total surface area, C and N accumulation of root, stem, leaf and total nitrogen accumulation showed 0-100AN>50-50AN>100-0AN. On 21 d, the same parameters showed 50-50AN>0-100AN>100-0AN. Ammonium as sole nitrogen source inhibited flue-cured tobacco growth. Nitrate is beneficial to shoot growth and carbon accumulation, it however inhibits root growth as sole nitrogen source for prolonged time. Optimum nitrogen form for root development, C and N accumulation is the mixture of ammonium and nitrate.

Keywords: flue-cured tobacco; nitrogen form; root morphology; carbon accumulation; nitrogen accumulation

氮是植物生长发育的必需元素, 也是植物体许多物质的组成成分^[1]。植物根系从土壤中吸收氮的主要形式是铵态氮和硝态氮^[2], 已有研究证明, 大多数根系吸收铵态氮伴随着 H^+ 的排出, 使根际土壤酸化, 而吸收硝态氮则相反, 且植物对

硝态氮的吸收利用消耗更多能量^[3-4]。这些差异造成氮素形态对植物生长发育的影响不同。氮素形态对植物生长发育的影响在水稻^[5-6]、大麦^[7]、小麦^[8]、玉米^[9]和蔬菜^[10-12]等作物研究较多, 但因研究对象不同结论不尽相同。有研究认为, 施用铵

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费“烟草增香减害关键技术研究示范”(201203091); 中国烟草总公司特色优质烟叶开发重大专项“低危害烟叶研究开发”(110201101006 ts-06)

作者简介: 邢 瑶(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为作物生理生态。E-mail: xingyao19901205@163.com。*通信作者, E-mail: maxinghua@caas.cn

收稿日期: 2015-04-22

修回日期: 2015-07-10

硝混合态氮素的烟株生物性状最佳,经济效益和烟叶化学成分最优^[13-14]。根系不仅是植物养分吸收的器官,也是物质合成的场所,对植物地上部的生长尤为重要。同时,碳氮代谢直接或间接地影响烟叶中各种化学成分含量及比例^[15]。因此研究氮素形态对根系生长发育及植株碳氮积累的影响对提高烤烟产量和品质具有重要意义。

本文以烤烟品种 NC55 为供试材料,通过供给不同氮素形态的培养液试验,研究烤烟根系的形态差异以及植株的碳氮积累差异,以揭示氮素形态对烤烟根系发育和烤烟生长的影响,为生产上合理配置氮肥种类,实现烤烟优质适产的目标提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试烤烟品种为 NC55,由国家农作物种质资源平台烟草种质资源子平台提供。

1.2 试验设计

将包衣种子播种于塑料培养盒中,基质为消毒的石英砂,培养液为全素营养液(N以 NH_4NO_3 形式加入)。待幼苗长至6叶1心期时,选择长势一致的烟苗,洗净根部砂粒,移栽于500 mL的塑料容器中(深约10 cm),塑料容器上覆盖具孔盖板,每个容器1株,植株根茎结合部位用海绵包裹,固定在盖板上。先用1/4全素营养液(N以 NH_4NO_3 形式加入)培养3 d后,使烟苗适应水培环境,再用1/4无氮营养液培养2 d,然后用不同形态的氮素处理。所有烟苗放置于同一温室中,温室温度控制在25~28 °C/18~20 °C(光/暗),光照周期为12 h/12 h(光/暗)。全素营养液的成分为:N 4.0 mmol/L、Mg 1.2 mmol/L、P 0.6 mmol/L、K 2.5 mmol/L、Ca 2.0 mmol/L、Fe(Fe-EDTA)30.00 μmol/L、B 10.00 μmol/L、Mn 1.00 μmol/L、Cu 0.10 μmol/L、Zn 0.50 μmol/L、Mo 0.05 μmol/L。在总氮量保持一致的条件下,根据氮素形态的不同,设置3个处理,即 $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^- = 100:0$ (T1);

$\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^- = 50:50$ (T2); $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^- = 0:100$ (T3),每个处理20株,每次采集5株。每3天更换1次营养液,并用0.1 mol/L的NaOH调节pH在6.8~7.0之间。烟苗自培养0 d开始,每7 d进行取样测定。

1.3 测定项目和方法

采集的烟苗用蒸馏水冲洗干净后将样品按根、茎、叶分样,称鲜重,进行根系扫描分析,然后70 °C烘干至恒重,称重后粉碎,过100目筛,用于测定总氮、总碳含量。

根系扫描采用EPSON Perfection V700 Photo(分辨率为6400*9600 dpi)。扫描时将根系放入特制的透明托盘内,加入一定量水便于分散根系避免缠绕。扫描后保存图像,采用WinRHIZO Pro 2012b分析程序对图像进行分析。总氮、总碳含量采用碳氮硫元素分析仪(Elementar vario PYRO cube, Germany)测定。植株的氮(碳)积累量为含氮(碳)量与干物质量的乘积。

用Excel 2007软件进行数据整理和作图,用SAS 9.2数据分析软件进行统计分析,采用LSD法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果

2.1 氮素形态对烤烟 NC55 生物量的影响

如表1所示,在处理7 d和14 d,烤烟根系生物量均表现为 $T3 > T2 > T1$;处理后21 d, $T3$ 和 $T2$ 的根系生物量显著高于 $T1$,且 $T3$ 的根系生物量比 $T2$ 低16.3%,而且在处理后期 $T1$ 的根系颜色变褐。由表1还可以看出,处理后7 d, $T3$ 的地上部生物量和总生物量显著高于 $T1$ 和 $T2$;处理后14 d, $T3$ 的植株地上部生物量和总生物量显著高于 $T1$,但与 $T2$ 的差异不显著;处理后21 d, $T3$ 和 $T2$ 的植株地上部生物量和总生物量均显著高于 $T1$ 。处理后7 d, $T2$ 的根冠比显著高于 $T1$ 和 $T3$;处理后14 d, $T3$ 的根冠比分别比 $T1$ 和 $T2$ 高14.3%和11.2%,但处理间差异不显著;处理后21 d, $T1$ 和 $T2$ 的根冠比显著高于 $T3$ 。

表 1 氮素形态对生物量的影响
Table1 Effect of nitrogen form on biomass

处理时间/d	处理	根系生物量/(g·株 ⁻¹)	地上部生物量/(g·株 ⁻¹)	总生物量/(g·株 ⁻¹)	根冠比
0	-	0.08±0.02	0.85±0.10	0.93±0.40	0.09±0.02
7	T1	0.15±0.01b	0.89±0.10b	1.00±0.11b	0.17±0.00b
	T2	0.19±0.01ab	0.91±0.08b	1.10±0.09b	0.21±0.00a
	T3	0.21±0.01a	1.23±0.08a	1.44±0.10a	0.17±0.00b
14	T1	0.22±0.04a	1.47±0.10b	1.69±0.14b	0.15±0.02a
	T2	0.28±0.03a	1.82±0.08ab	2.10±0.11ab	0.15±0.01a
	T3	0.35±0.06a	2.05±0.23a	2.40±0.29a	0.17±0.01a
21	T1	0.25±0.01b	1.63±0.01b	1.88±0.00b	0.15±0.01a
	T2	0.50±0.04a	3.24±0.20a	3.74±0.23a	0.15±0.00a
	T3	0.43±0.04a	3.51±0.16a	3.94±0.19a	0.12±0.00b

注：每列中不同字母表示差异达 5%显著水平，下同。

2.2 氮素形态对烤烟 NC55 根系形态的影响

2.2.1 氮素形态对烤烟 NC55 总根长的影响

由图 1 可以看出，在处理周期内，T2 和 T3 的根系总长度显著大于 T1，但 T2 和 T3 的根系总长度无显著差异。处理后 7 d 和 14 d，T3 的根系总长度比 T2 分别高 14.6%和 12.0%；处理后 21 d，T3 的根系总长度比 T2 低 5.0%。

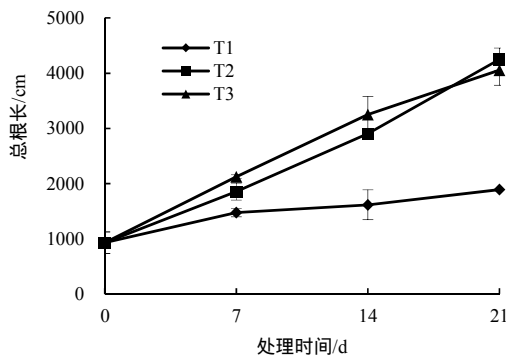


图 1 氮素形态对总根长的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen form on total root length

2.2.2 氮素形态对烤烟 NC55 根系总表面积和总体积的影响

由图 2 可见，T2 和 T3 的根系总体积和总表面积在处理周期内呈增加趋势，而 T1 的根系总体积和总表面积在处理前中期呈增加趋势，后期增加缓慢，根系总体积出现减少的现象。在处理 7 d，T3 显著高于 T1；处理后 14 d 和 21 d，T2 和 T3 的根系总表面积和总体积均显著高于 T1；处理后 14 d，T3 的根系总表面积和总体积比

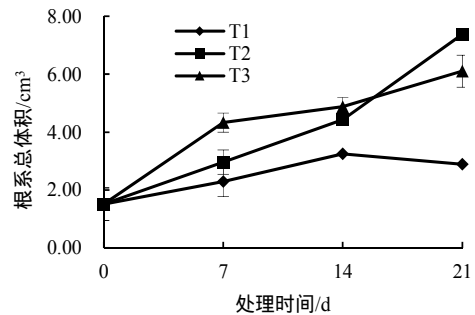
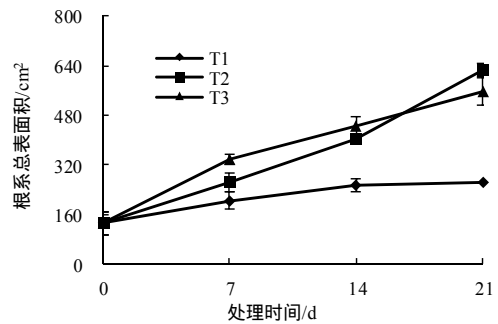


图 2 氮素形态对根系总表面积和总体积的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen form on root total surface area and volume

T2 高，但处理后 21 d，T3 比 T2 分别低 12.5%和 20.8%。

2.2.3 氮素形态对烤烟 NC55 根系平均直径的影响

由图 3 可见，T1 和 T3 的根系平均直径随处理时间的增加先增加后降低，T2 总体呈增长趋势。处理后 7 d，T3 根系平均直径显著高于 T1 和 T2；处理后 14 d，T1 根系的平均直径显著高于 T2 和 T3；处理后 21 d，T2 根系的平均直径显著高于 T1 和 T3。

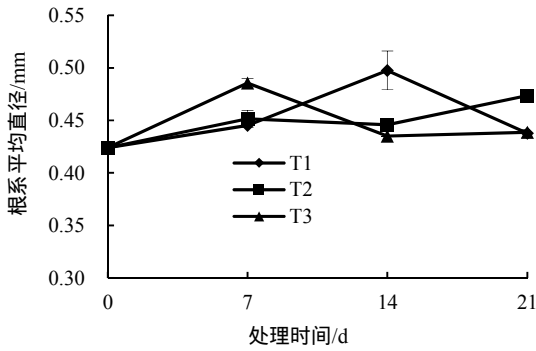


图3 氮素形态对根系平均直径的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen form on root average diameter

2.3 氮素形态对烟株各器官含氮量和氮素积累量的影响

由表2可见,在处理后7d,根系含氮量表现为T3>T2>T1;处理后14d和21d,根系含氮量表现为T2>T1>T3。在处理后7d和14d,根系氮积累量均表现为T3>T2>T1;处理后21d,T2根系的氮积累量显著高于T1和T3。

T1茎的含氮量随处理天数先降低后增加,而T2和T3茎的含氮量随处理天数先增加后降低。在处理后7d和14d,T2和T3的茎含氮量显著高

于T1;处理后21d,茎含氮量表现为T1>T2>T3。在处理周期内,茎的氮积累量均表现为T3>T2>T1,T3显著高于T1。

在处理周期内,T1叶的含氮量整体呈降低趋势;T2和T3的叶片含氮量呈先增加后降低的趋势,且高于T1。同时,在处理周期内,T2和T3叶的氮积累量和植株总氮积累量显著高于T1。

2.4 氮素形态对烟株各器官含碳量和碳积累量的影响

由表3可见,在处理周期内,各处理根含碳量均表现为T1>T2>T3。在处理7d和14d,根系碳积累量均表现为T3>T2>T1;处理后21d,T3和T2根的碳积累量显著高于T1。各处理茎的含碳量随处理天数先降低后增加。在处理7d和21d,T1茎含碳量显著高于T2和T3;在处理14d,T2茎含碳量显著高于T1和T3。在处理周期内,T2和T3茎的碳积累量始终高于T1。在处理周期内,各处理叶含碳量随处理时间先降低后增加。处理后7d和21d,T1叶含碳量显著

表2 氮素形态对烟株各器官含氮量和氮积累量的影响

Table 2 Effect of nitrogen form on nitrogen content and nitrogen accumulation of different organs

处理时间/d	处理	烟株含氮量/%			烟株氮积累量/(mg·株 ⁻¹)			总氮积累量/(mg·株 ⁻¹)
		根	茎	叶	根	茎	叶	
0	-	4.37±0.00	2.46±0.00	3.72±0.62	3.28±0.93	0.74±0.35	27.23±0.40	31.24±0.87
	T1	4.32±0.10a	2.29±0.03b	3.91±0.82b	6.48±0.46a	1.15±0.34b	32.46±3.59b	40.09±2.79b
7	T2	4.59±0.05a	3.43±0.01a	5.72±0.09a	8.72±0.73a	2.23±0.25a	48.02±3.33a	58.97±4.31a
	T3	4.66±0.50a	3.37±0.08a	4.94±0.14ab	9.82±1.70a	2.78±0.16a	56.46±2.89a	69.06±4.43a
	T1	4.54±0.01a	1.64±0.01b	2.67±0.14b	9.99±1.94a	1.40±0.34b	36.96±0.09b	48.34±2.38b
14	T2	4.66±0.04a	3.52±0.48a	5.44±0.39a	13.06±1.43a	4.03±0.30a	92.59±2.41a	109.68±1.29a
	T3	4.44±0.12a	3.77±0.07a	5.16±0.49a	15.59±2.93a	4.71±0.17a	98.48±2.18a	118.79±5.28a
	T1	4.80±0.08a	2.36±0.16a	3.14±0.41b	11.99±0.48b	4.04±0.95b	45.79±5.68b	61.82±6.14b
21	T2	4.86±0.02a	2.20±0.34a	4.84±0.06a	24.08±1.61a	6.99±1.86ab	141.58±9.75a	172.65±13.22a
	T3	3.66±0.03b	2.10±0.13a	4.30±0.13a	15.55±1.18b	9.67±0.31a	131.00±2.11a	156.21±2.98a

表3 氮素形态对烟株各器官含碳量和碳积累量的影响

Table 3 Effect of nitrogen form on carbon content and carbon accumulation of different organs

处理时间/d	处理	烟株含碳量/%			烟株碳积累量/(mg·株 ⁻¹)			总碳积累量/(mg·株 ⁻¹)
		根	茎	叶	根	茎	叶	
0	-	44.78±0.00	40.29±0.00	40.52±0.53	33.59±9.50	12.09±5.70	334.20±30.19	379.88±45.39
7	T1	43.54±0.40a	39.63±0.06a	39.97±0.29a	65.28±5.56a	19.82±5.64a	335.64±31.52b	420.74±42.72b
	T2	40.80±0.60b	37.17±0.47b	37.45±0.52b	77.56±6.91a	24.17±2.94a	314.73±30.82b	416.47±40.67b
	T3	40.15±0.19b	37.03±0.44b	38.08±0.72b	84.34±6.08a	31.46±2.24a	435.72±26.73a	551.52±30.56a
14	T1	44.28±0.28a	33.76±0.06b	40.19±0.08a	97.35±18.16a	28.69±7.121a	556.61±30.12a	682.65±55.39a
	T2	41.68±0.41b	36.54±0.33a	36.17±1.58ab	116.64±10.64a	42.00±2.20a	617.27±55.03a	775.91±67.87a
	T3	40.11±0.34c	33.59±0.39b	35.44±1.61b	140.46±23.89a	41.97±1.88a	682.20±111.07a	864.64±136.84a
21	T1	45.82±0.41a	40.66±0.45a	40.43±0.55a	114.51±5.46b	69.18±12.26c	590.29±13.74b	773.99±6.94b
	T2	43.53±1.21a	38.89±0.16b	38.46±0.01b	215.71±21.37a	122.47±13.24b	1124.81±62.23a	1463.00±96.84a
	T3	40.84±0.22b	39.16±1.46b	39.21±0.25b	173.51±13.50a	180.09±3.44a	1195.82±47.69a	1549.42±64.63a

高于 T2 和 T3 ; 处理后 14 d , T1 和 T2 显著高于 T3 。各处理叶的碳积累量和植株总碳积累量随处理时间延长而增加。处理后 7 d , T3 叶碳积累量和总碳积累量显著高于 T1 和 T2 ; 处理后 14 d , 各处理间差异不显著 ; 处理后 21 d , T2 和 T3 的叶碳积累量和总碳积累量显著高于 T1 。

3 讨 论

3.1 氮素形态对根系形态的影响

对水稻研究发现, 铵硝混合态氮素有利于根系的生长发育, 促进根系体积和根长的增加^[16-17]; 但也有研究认为, 硝态氮促进水稻根体积、表面积及根冠比的增加^[18]。对大豆的研究发现, 施用硝态氮的根系长度、体积、表面积均大于以铵态氮为营养的根系, 并且在花期硝态氮处理的根系平均直径略高于铵态氮处理^[19]。本试验结果表明, 处理周期内, 全铵处理的根系生物量、总根长、根总表面积及根总体积均最低, 说明铵态氮肥抑制了根系伸长生长, 这可能是由于铵态氮肥抑制了根系细胞的伸长造成的^[20]。全铵处理的植株虽然存在植株矮小、老叶黄化的现象, 但并未出现叶片薄、主根伸长等缺氮的现象^[21], 由于本试验控制了根系环境的 pH, 由此推测铵态氮肥抑制植株的生长主要是植株对铵态氮利用较差而非吸收导致的。处理前期, 全硝处理的根系生物量、总根长、根总表面积以及根总体积均高于铵硝各半处理; 而处理后期, 全硝处理低于铵硝各半处理。考虑到烟草生长期较长, 铵硝混合态氮素更有利于根系的生长, 这与前人的相关研究一致^[16-17]。但是, 处理周期内, 地上部分的生物量始终表现为全硝处理高于铵硝各半处理高于全铵处理, 并且处理后 21 d, 全硝处理的根冠比显著低于全铵处理和铵硝各半处理。说明, 根系的生长与地上部的生长并不同步, 且根系较大将消耗大量同化物, 抑制地上部的生长^[22-23]。

3.2 氮素形态对碳氮积累的影响

对番茄的研究发现, 以铵态氮为单一氮源的

根系全碳含量和叶片全氮含量高于硝态氮和有机氮的处理^[24]。本试验结果表明, 处理周期内, 全铵处理的根系含氮量以及各部位的含碳量较高, 而各部位的碳氮积累量显著低于铵硝各半处理和全硝处理, 并且全铵处理的总氮积累量显著低于铵硝各半处理和全硝处理。处理前期, 铵硝各半处理的根系碳氮积累量、叶的氮积累量及总氮积累量低于全硝处理; 处理后期反之。在处理周期内, 全硝处理茎的碳氮积累量、叶的碳积累量以及植物体总碳积累量始终最高。全铵处理根系含氮量及各部分的含碳量较高可能是由于铵态氮肥影响根系吸收水分和养分, 抑制了根系和地上部分的生长, 导致浓缩效应^[24]。

处理后期, 全硝处理的根系碳氮积累量及叶片的氮积累量低于铵硝各半处理, 可能是由于植物吸收利用硝态氮肥需要消耗较多的能量^[4], 长期供应硝态氮肥为单一氮源使根系吸收利用氮素量逐渐减少, 进而向地上部运输的氮素量减少; 而供应铵硝各半处理的根系总表面积、总体积较大, 有利于根系对氮素的吸收^[16], 并促进同化物向根系的运输。

4 结 论

在处理周期内, 全铵处理的烟苗根系和地上部分生物量均最低, 且在处理后期显著低于铵硝配施处理和全硝处理, 铵态氮肥抑制烤烟地上部分和根系的生长。硝态氮肥更有利于地上部生物量和含碳物质的积累。虽然铵硝混合态氮肥和硝态氮肥都能够促进根系的生长, 但长时间单一供应硝态氮根系生长出现受抑制的倾向, 而铵硝配施处理的根系总长度、总表面积、总体积、平均直径, 以及根系碳、氮积累量和植物体总氮积累量均高于全硝处理。

参考文献

- [1] Raven J A, Handley L L, Andrews M. Global aspects of C/N interactions determining plant-environment interactions[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55: 11-25.

- [2] Walch-Liu P, Neumann G, Bangerth F, et al. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51: 227-237.
- [3] Gijssman A J. Rhizosphere pH along different root zones of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), as affected by source of nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 1990, 124: 161-167.
- [4] Guo S W, Zhou Y, Gao Y X, et al. New insights into the nitrogen form effect on photosynthesis and photorespiration[J]. *Pedosphere*, 2007, 17: 601-610.
- [5] Guo S W, Chen G, Zhou Y, et al. Ammonium nutrition increases photosynthesis rate under water stress at early development stage of rice[J]. *Plant and Soil*, 2007, 296: 115-124.
- [6] Gao Y X, Li Y, Yang X X, et al. Ammonium nutrition increases water absorption in rice seedling (*Oryza sativa* L.) under water stress[J]. *Plant and Soil*, 2010, 331: 193-201.
- [7] Ali S, Farooq M A, Jahngir M M, et al. Effect of chromium and nitrogen form on photosynthesis and anti-oxidative system in barley[J]. *Biologia Plantarum*, 2013, 57: 758-763.
- [8] 罗来超, 苗艳芳, 李生秀, 等. 氮素形态对小麦幼苗生长及根系生理特性的影响[J]. *河南科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(4): 81-84.
- [9] 曹翠玲, 李生秀. 氮素形态对玉米幼苗碳水化合物及养分积累的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2003, 22(5): 457-461.
- [10] Fallovo C, Colla G, Schwarz D, et al. Effect of nitrogen form and radiation on growth and mineral concentration of two Brassica species[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 123: 170-177.
- [11] 王小丽, 杨丹妮, 黄丹枫. 氮素形态对小白菜生长和碳氮积累的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 1042-1048.
- [12] 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 and Soil*, 2009, 315: 67-77.
- [13] 蔡晓布, 钱成. 氮肥形态和用量对藏东南地区烤烟产量和质量的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 66-70.
- [14] 张延春, 陈治锋, 龙怀玉, 等. 不同氮素形态及比例对烤烟长势、产量及部分品质因素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 787-792.
- [15] 史宏志, 韩锦峰. 烤烟碳氮代谢几个问题的探讨[J]. *烟草科技*, 1998(2): 34-36.
- [16] 宋文静, 金晶晶, 哈丽哈什, 等. 不同硝响应型水稻品种苗期根系生长对增硝营养的响应[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 1006-1012.
- [17] 王东升, 张亚丽, 段英华. 不同氮效率水稻品种增硝营养下根系生长的响应特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 585-590.
- [18] 李勇, 周毅, 郭世伟, 等. 铵态氮和硝态氮营养对水、旱稻根系形态及水分吸收的影响[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(3): 294-298.
- [19] 严君, 韩晓增, 祖伟. 不同形态氮肥对大豆根系形态及磷效率的影响[J]. *大豆科学*, 2010, 29(6): 1003-1007.
- [20] Li Q, Li B H, Kronzucker H J, et al. Root growth inhibition by NH_4^+ in *Arabidopsis* is mediated by the root tip and is linked to NH_4^+ efflux and GMPase activity[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 33: 1529-1542.
- [21] 李玥, 赖勇林, 王军, 等. 不同养分缺乏对烤烟根系形态及营养生长的影响[J]. *中国烟草科学*, 2015, 36(2): 60-65.
- [22] 汪强, 樊小林, 刘芳, 等. 断根和覆草旱作条件下水稻的产量效应[J]. *中国水稻科学*, 2004, 18(5): 437-442.
- [23] 蔡昆争. 水稻栽培群体根系生长冗余和结构优化[D]. 广州: 华南农业大学, 2001.
- [24] 葛体达, 黄丹枫, 宋世威, 等. 不同氮素形态对番茄幼苗碳、氮积累的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3168-3176.