

## 铵态氮和硝态氮对旱稻、水稻生长及铁营养状况的影响

邹春琴 范晓云 石荣丽 张福锁

(农业部植物营养学重点实验室/教育部植物-土壤相互作用重点实验室/中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094)

**摘要** 利用砂培试验,研究了铵态氮和硝态氮,以及不同铁供应水平对旱稻和水稻生长与铁营养状况的影响。结果表明:供铁显著促进了水稻和旱稻的生长,提高了铁吸收量;与铵态氮相比,不供铁时硝态氮加重了缺铁旱稻和水稻的铁缺乏状况。就氮素形态的影响而言,铵态氮明显促进了旱稻和水稻的生长,表现在株高、地上部干重的显著增加,植株铁营养状况的显著改善,叶片 SPAD 值和植株铁含量、铁吸收量的显著增加,尤其是不供铁条件下,这种促进作用更加明显。同时,铵态氮还促进了植物体内铁的转移。硝态氮的作用则与此相反,特别是在铁供应不足的情况下,硝态氮的供应降低了叶片 SPAD 值和植株铁含量,加重了铁缺乏症状。以上结果表明,铵态氮有利于旱稻摄取更多的铁营养,并改善生长状况;土壤中氮素以硝态氮为主可能是水作转为旱作后旱稻缺铁黄化的主要原因之一。

**关键词** 氮素形态;旱稻;水稻;生长;铁营养

中图分类号 Q 945.12

文章编号 1007-4333(2007)04-0045-05

文献标识码 A

## Effect of ammonium and nitrate nitrogen on the growth and iron nutrition of up- and lowland rice

Zou Chunqin, Fan Xiaoyun, Shi Rongli, Zhang Fusuo

(Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture/ Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education/ College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract** The change in rice production system is becoming essential due to water constraints. The traditional flooded cultivation has shifted to upland cultivation. Up to now, the area of cultivation of upland rice is only 2% of total rice cultivation area. However, iron deficiency in upland rice production is widespread, which limits improvement of the yield and quality of upland rice. The reasons leading to the Fe deficiency in upland rice remain unclear. One hypothesis is that the shift from ammonium to nitrate nitrogen (N) in soil induces Fe deficiency. The aim of this study was to elucidate the effect of ammonium and nitrate supply on rice growth and Fe nutrition and to make some comparisons on response to nitrogen form between upland and lowland rice. The results showed that Fe application enhanced the growth and Fe uptake of both rice types. Compared with ammonium N, nitrate N caused Fe chlorosis plants under Fe deficiency. Ammonium N better improved plant height and shoot dry weight and Fe uptake than nitrate N. The leaf SPAD reading, Fe concentration in shoots and roots and uptake were significantly higher in rice treated with ammonium N, especially when Fe was not supplied. The translocation of Fe was different between two nitrogen forms, especially for lowland rice. Ammonium N application induced more Fe translocation to shoots of lowland rice. Nitrate N accelerated Fe deficiency in plants, including decreasing leaf SPAD reading and Fe concentration when Fe was not supplied. All these results indicated that ammonium N was a better N source for the growth and Fe nutrition of upland and lowland rice. The dominance of nitrate N in upland soils was one of the reasons for Fe deficiency in rice production.

**Key words** nitrogen form; upland rice; lowland rice; growth; iron nutrition

收稿日期: 2007-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30571106);农业部 948 项目(2003 - Z53)

作者简介: 邹春琴,教授,博士生导师,主要从事微量元素营养与人体健康的研究, E-mail: zcq0206@cau.edu.cn

旱稻耐旱性强、需水量少,目前已成为推行节水农业、旱作农业的最佳粮食作物<sup>[1]</sup>。然而,旱作时土壤水分通常只有田间持水量的80%左右,与淹水情况相比土壤环境有很大变化,如水田土壤的氮素以铵态氮为主,旱地土壤则以硝态氮为主<sup>[2~3]</sup>。以硝态氮为主的土壤环境是否会影响旱稻的生长和营养状况,尤其是对微量营养元素的吸收,目前还未见相关报道。

许多研究结果表明,氮素形态会在很大程度上影响植物的生长和对矿质营养的吸收<sup>[4]</sup>。主要是因为供应铵态氮时,植物释放 $H^+$ 进入根际使根际pH降低;而供应硝态氮时,植物吸收的阴离子大于阳离子,植物释放 $HCO_3^-$ 或者 $OH^-$ 进入根际使根际pH升高<sup>[4]</sup>。这种pH的变化,会在很大程度上影响土壤中微量元素的化学有效性和生物有效性,从而影响植物的微量元素营养,尤其是铁营养。如供应铵态氮会显著改善缺铁植物的铁营养状况,而供应硝态氮时会加重植物的缺铁黄化状况<sup>[5~6]</sup>。

旱稻生产中常常发生的缺铁现象,很大程度上限制了旱稻产量和品质的提高及大面积推广<sup>[7]</sup>。这种现象是与旱作条件下土壤铁的化学有效性和生物有效性下降有关,还是与氮素形态的改变有关,尚还未见相关报道。本研究旨在研究铵态氮和硝态氮对旱稻生长和铁营养的影响,以期探明旱稻缺铁黄化的可能原因,为旱稻生产中氮肥和微量元素肥料管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 植物培养

1) 供试作物。旱稻297(*Oryza sativa* L., c. v. Han 297)和水稻越富(*O. sativa* L., c. v. Yuefu)。

2) 营养液<sup>[5]</sup>基本组成。(单位为mmol/L):  $KH_2PO_4$ , 0.25;  $K_2SO_4$ , 0.75;  $KCl$  0.1;  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , 0.65;  $MnSO_4 \cdot H_2O$ ,  $10^{-3}$ ;  $(NH_4)_6MO_7O_{24} \cdot 2H_2O$ ,  $5 \times 10^{-6}$ ;  $H_3BO_3$ ,  $10^{-3}$ ;  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $10^{-3}$ ;  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ,  $10^{-4}$ 。营养液起始pH6.0。其中供铁处理的铁源为0.1 mmol/L FeEDTA,不供铁处理的营养液中不加入任何铁源。 $NH_4^+-N$ 处理氮源为 $(NH_4)_2SO_4$ ,浓度1 mmol/L; $NO_3^- -N$ 处理氮源为 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ,浓度1 mmol/L。

3) 试验处理。种子用体积分数为10%的 $H_2O_2$ 消毒30 min后,在饱和 $CaSO_4$ 溶液中吸胀8 h,然后

在湿润的滤纸上催芽至种子露白后播入石英砂中。昼夜光照分别为14和10 h,温度分别为30和25℃,光子量照度为 $250 \sim 300 \mu mol/m^2 \cdot s$ 。出苗2 d后定苗并开始浇灌入营养液,同时进行氮素形态和铁供应处理,共4个处理:铵态氮供铁( $NH_4^+ -N + Fe$ )、铵态氮不供铁( $NH_4^+ -N - Fe$ )、硝态氮供铁( $NO_3^- -N + Fe$ )、硝态氮不供铁( $NO_3^- -N - Fe$ ),每个处理设4个重复。前6 d每2 d浇1次营养液,每盆每次50 mL,以后每天上午浇30 mL营养液,为了避免盐分累积对根系造成伤害,每天晚上浇去离子水80 mL。出苗22 d后不供铁处理植株叶片出现缺铁黄化现象,当其生长开始受到抑制时,将地上部和根系分开收获,用蒸馏水洗净后105℃杀青30 min,然后70℃烘48 h以上,记录干物质质量,样品用不锈钢磨粉碎后用于养分测定。

### 1.2 测定项目及测定方法

1) 叶片SPAD读数。在收获当天用SPAD-502仪直接进行测定。每盆测10株,每株测倒数第1片完全展开叶的中上部。

2) 植株铁含量测定。用 $HNO_3 + HClO_4$ 联合消煮方法制备样品,原子吸收分光光度计进行测定。

3) 根长测定。用根系扫描仪扫描每一处理的所有根系,然后用WinRHIZO软件处理图像计算根长。

4) 株高。用直尺测量每株的最高株高,取平均值。

5) 数据统计分析。所得数据采用SAS统计软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶片SPAD读数

旱稻生长22 d后, $NO_3^- -N - Fe$ 处理旱稻和水稻均出现了明显的新叶黄化。图1表明,氮素形态对旱稻和水稻叶片SPAD读数有很大影响,无论供铁与否, $NH_4^+ -N$ 处理旱稻和水稻叶片SPAD读数显著高于 $NO_3^- -N$ 处理。供应 $NH_4^+ -N$ 时,铁的供应对旱稻和水稻叶片SPAD读数没有显著影响;而供应 $NO_3^- -N$ 时,供铁显著提高了旱稻和水稻叶片SPAD读数。4个处理旱稻和水稻叶片SPAD读数没有显著差异。

### 2.2 生物量

氮素形态对旱稻和水稻株高有显著影响,这种

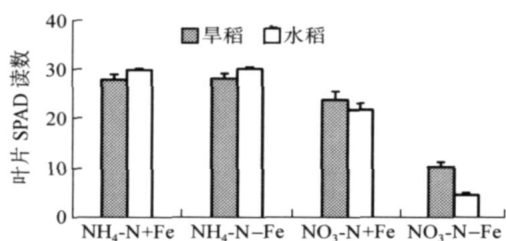


图 1 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及供铁状况对旱稻和水稻叶片 SPAD 读数的影响

Fig. 1 Leaf SPAD reading of rice as affected by NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and Fe supply in sand culture

差异与铁的供应状况有关(表 1)。供应 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 时,铁的供应对旱稻和水稻的株高没有影响;供应 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 时,供铁显著促进了旱稻和水稻的生长,其株高显著高于不供铁处理。供铁时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻株高与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理之间没有差异,水稻株高却显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理;缺铁时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻和水稻株高都高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理。氮素形态对根系生长的影响有所不同。供铁时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻和水稻根长都低于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理;而不供铁时,2 种氮素形态处理旱稻和水稻根长之间没有差异。只有在供应 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 时,供铁旱稻和水稻根长均显著高于不供铁处理。相同条件下,旱稻和水稻株高没有差异,但旱稻根长显著高于水稻。

铁供应状况和氮素形态对旱稻干物质的累积有明显影响(表 1)。不论供铁与否,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻和水稻地上部干重显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理。供应 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 时,供铁与不供铁处理旱稻地上部、根干重没有显著差异,而供铁水稻地上部干重显著高于不供铁处理。供应 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 时,供铁处理水稻、旱稻地上部和根系干重都显著高于不供铁处理。旱稻和水稻根冠比基本不受氮素形态影响,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理间没有显著差异。在相同处理下,旱稻地上部和根系干重均显著高于水稻。

### 2.3 植株铁含量和铁吸收量

氮素形态和供铁状况也显著影响旱稻和水稻体内铁含量(表 2)。无论供铁与否,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻和水稻地上部和根系铁含量均显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理。供应 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 时,供铁处理旱稻和水稻植株地上部和根系铁含量显著高于不供铁处理;供应 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 时,供铁显著提高了水稻地上部铁含量,而对旱稻地上部和根系铁含量、水稻根系铁含量均没

有显著影响。相同条件下,旱稻和水稻铁含量没有显著差异。

表 1 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及供铁状况对旱稻和水稻株高、根长、地上部和根干重以及根冠比的影响

Table 1 Plant height, root length, shoot and root dry weight and ratio of root/shoot of rice as affected by NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and Fe supply

测定项目	作物名称	处 理			
		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N + Fe	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N - Fe	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N + Fe	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N - Fe
		株高/cm	旱稻 19.9 a *	20.1 a	20.5 a
	水稻 20.4 a	20.0 ab	18.5 b	10.2 c	
根长*/m	旱稻 22.6 b	18.8 bc	30.9 a	15.7 c	
	水稻 17.4 b	16.4 bc	25.1 a	14.0 c	
地上部干重*/g	旱稻 0.52 a	0.47 ab	0.45 b	0.24 c	
	水稻 0.43 a	0.39 b	0.32 c	0.17 d	
根干重*/g	旱稻 0.14 a	0.13 a	0.12 a	0.06 b	
	水稻 0.08 a	0.07 a	0.07 a	0.04 b	
根冠比	旱稻 0.27 a	0.28 a	0.28 a	0.23 b	
	水稻 0.19 a	0.19 a	0.22 a	0.21 a	

注:同一行有相同字母表示不同处理间差异不显著(P=0.05)。\*均为每盆干重。

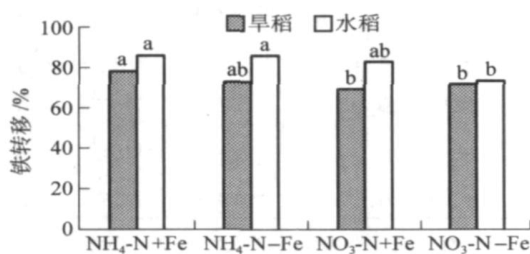
铁在植株体内的累积也显著受氮素形态和铁供应状况的影响(表 2)。无论供铁与否,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻和水稻地上部和根系铁吸收量显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。无论供应 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 还是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,供铁处理旱稻和水稻地上部和根系铁吸收量也显著高于不供铁处理。从植株铁吸收来看,无论供应 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 还是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,供铁显著提高了水稻和旱稻铁吸收量。无论缺铁还是供铁,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻和水稻铁吸收显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻地上部铁吸收量、根系铁吸收量和植株铁吸收量显著高于水稻,其他处理则没有差异。

从铁向植株地上部的转移来看,其在植株体内的分配主要受氮素形态的影响,而受铁供应状况的影响较小(图 2)。供铁时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻铁转移显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理,对水稻体内铁的转移影响不大;而不供铁时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理旱稻铁转移与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理间没有显著差异,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理水稻铁转移显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理。旱稻和水稻铁转移没有显著差异。

表2  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N及供铁状况对旱稻和水稻地上部和根系铁质量分数、铁吸收量的影响Table 2 Fe concentration and content in shoot and root of rice as affected by  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N and Fe supply

测定项目	作物名称	处 理			
		$\text{NH}_4^+$ -N + Fe	$\text{NH}_4^+$ -N - Fe	$\text{NO}_3^-$ -N + Fe	$\text{NO}_3^-$ -N - Fe
地上部铁质量分数/(mg/kg)	旱稻	228.5 a *	131.9 b	69.6 c	48.3 c
	水稻	214.4 a	171.9 b	97.9 c	45.8 d
根系铁质量分数/(mg/kg)	旱稻	235.0 a	176.6 b	113.5 c	82.2 c
	水稻	193.9 a	156.1 b	90.7 c	79.6 c
地上部铁吸收量 / $\mu\text{g}$	旱稻	118 a	62 b	32 c	12 d
	水稻	93 a	67 b	32 c	8 d
根系铁吸收量 / $\mu\text{g}$	旱稻	34 a	23 b	14 c	5 d
	水稻	16 a	11 b	7 c	3 d
植株铁吸收量** / $\mu\text{g}$	旱稻	152 a	85 b	46 c	17 d
	水稻	109 a	78 b	39 c	11 d

注: \*同行字母相同表示不同处理间差异不显著( $P=0.05$ ); \*\*植株铁吸收量=地上部铁吸收量+根系铁吸收量; 为每盆吸收量。



铁转移 = (地上部铁吸收量 / 植株铁吸收量)  $\times 100\%$

图2  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N和铁供应状况对旱稻和水稻体内铁转移的影响Fig. 2 Fe translocation in rice plants as affected by  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N and Fe supply

### 3 讨 论

1) 关于铵态氮对植物生长影响的研究较多, 一般认为, 大量供应铵态氮时, 植物的生长会受到抑制, 供应硝态氮时会有促进作用<sup>[8-11]</sup>; 但是也有不一致, 甚至是相反的结果, 即认为铵态氮的供应促进了玉米、甜椒、子、黄雏菊等的生长, 而硝态氮对其生长反而有抑制作用<sup>[6, 12-13]</sup>。出现这种差异的原因主要与植物基因型以及试验条件, 如供应浓度、培养介质、供应时间等有非常密切的关系。在本试验条件下, 与硝态氮供应相比, 供应铵态氮对旱稻和水稻的生长有显著的促进作用(表1)。这一研究结果说明, 尽管在自然条件下, 旱稻生长在一个处于氧化状态、以硝态氮为主的土壤环境中, 但是与水稻类似, 铵态氮同样是促进其生长发育的良好氮源, 不同的是, 供应硝态氮时, 旱稻的生长略好于水稻, 说明在长期的进化过程中, 旱稻较好地适应了其生长环境。

2) 铵态氮和硝态氮不仅使植物生长有很大差异, 而且对植物铁营养状况也有显著影响。大量研究表明: 铵态氮能显著改善植物的铁营养状况, 是因为铵态氮能使植物根际和质外体 pH 降低, 从而使铁的有效性提高<sup>[5-6]</sup>; 而高浓度的硝态氮会导致植物(尤其是双子叶植物)的缺铁黄化, 严重时甚至导致植株的死亡, 主要是由于硝态氮使植物质外体 pH 升高, 降低了质外体铁的有效性, 抑制了 Fe ( ) 的还原, 使进入共质体的铁减少<sup>[14]</sup>。本研究结果与上述研究结果一致, 即与硝态氮供应相比, 铵态氮使旱稻、水稻地上部和根系的铁含量和铁吸收量显著增加(表2)。这一结果表明,  $\text{NH}_4^+$ -N 促进了旱稻和水稻对铁的吸收和利用, 尤其是铁供应不足时效果更加明显。在供铁条件下, 比较 2 种形态氮素对旱稻和水稻铁吸收量的影响可以发现, 铵态氮处理旱稻铁吸收量是硝态氮处理的 3.3 倍, 而水稻为 2.8 倍, 说明铵态氮对旱稻铁吸收的促进作用与对水稻的相当。这种差异是与 2 种氮素引起的根际 pH 的变化分不开的<sup>[4]</sup>。在试验中发现, 无论是水稻还是旱稻, 供应 2 种氮素使根际 pH 有明显差异, 供应铵态氮时根际 pH 为 3.36 ~ 3.79, 供应硝态氮时根际 pH 为 7.54 ~ 7.82; 而水稻和旱稻之间 pH 没有显著差异。值得注意的是, 氮素形态对铁在旱稻体内的分配比例有明显影响, 铵态氮供铁处理显著促进了其根系铁向地上部的转移; 而铵态氮不供铁处理显著促进了水稻体内铁的转移(图2)。

3) 淹水条件下, 硝化作用被强烈抑制, 土壤溶液

中的  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度会大大提高,  $\text{NH}_4^+$ -N 成为水田中土壤无机氮的主要存在形态<sup>[15-16]</sup>。旱作条件下, 土壤的通气条件有了很大的改善, 肥料 N 和土壤有机 N 矿化释放出的  $\text{NH}_4^+$ -N 易被转化为  $\text{NO}_3^-$ -N, 而使旱稻生长在土壤氮素形态以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主的环境中<sup>[17]</sup>。据冉炜<sup>[18]</sup>报道, 在旱作条件下, 尿素氮肥施入土壤 7 d 后将大部分被转化为  $\text{NO}_3^-$ -N, 土壤 pH 发生相应改变, 从而影响土壤中铁的有效性。因而在我国北方, 水田转化为旱作后, 土壤的氮素形态发生了很大变化, 主要以硝态氮为主, 这可能是旱稻容易出现缺铁黄化的主要原因之一。

### 参 考 文 献

- [1] 江巨鳌, 邬克彬. 旱稻生产现状分析及发展策略[J]. 作物研究, 2004(1): 48-51
- [2] 钱晓晴, 沈其荣, 王娟娟, 等. 不同水分供应及氮素形态对旱作水稻铁素营养特征的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(10): 1184-1190
- [3] 张杨珠, 王大娟, 黄顺红, 等. 湖南主要耕地土壤固定态铵含量与最大固铵容量的剖面变化特征[J]. 湖南农业大学学报, 2006, 32(5): 473-481
- [4] Beusichem M L, Vankirkby E A, Baas R. Influence of nitrate and ammonium nutrition on the uptake, assimilation and distribution of nutrients in *Ricinus communis* [J]. *Plant Physiology*, 1988, 86: 914-921
- [5] Zou Chunqin, Zhang Fusuo. Ammonium improves iron nutrition by decreasing leaf apoplastic pH of sunflower plants (*Helianthus annuus* L. cv. Frankasol) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(20): 2215-2220
- [6] Mengel K, Geurtzen G. Relationship between Fe chlorosis and alkalinity in *Zea mays*[J]. *Physiology Plantarum*, 1988, 72: 460-465
- [7] Wang Huaqi, Bouman B A M, Zhao Dule, et al. Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges[C]. In: Bouman, B. A M, Hengsdijk H, Hardy B, et al, eds. *Water-wise Rice Production*. Los Banos Philippines; International Rice Research Institute, 2002, 143-154
- [8] Raab T K, Terry N. Nitrogen-source regulation of growth and photosynthesis in *Beta vulgaris* L [J]. *Plant Physiology*, 1994, 105: 1159-1166
- [9] Walchr-Liu P, Neuman G, Bangerth F, et al. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(343): 227-237
- [10] Wang Guoyin, Li Chunjian, Zhang Fusuo. Effects of different nitrogen forms and combination with foliar spraying with 6-benzylaminopurine on growth, transpiration, and water and potassium uptake and flow in tobacco[J]. *Plant Soil*, 2003, 256: 169-178
- [11] 邹春琴, 王晓凤, 张福锁. 铵态氮抑制向日葵生长的作用机制初步探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 82-85
- [12] Xu Guohua, Wolf S, Kafkafi U. Ammonium on potassium interaction in sweet pepper [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(4): 719-734
- [13] Kraus H T, Warren S L, Anderson C E. Nitrogen form affects growth, mineral nutrient content, and root anatomy of cotton and rudbeckia [J]. *Hortscience*, 2002, 37(1): 126-129
- [14] Lucena J J. Effects of bicarbonate, nitrate and other environmental factors on iron deficiency chlorosis. A review [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(11 & 12): 1591-1606
- [15] Arth P L G, Byrnes B H. The effect and loss of nitrification in the rhizosphere of rice [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 9: 131-147
- [16] Kronzucker H J, Kirk G J D, Siddiqi. Effects of hypoxia on  $^{13}\text{NH}_4^+$  flux in rice roots: Kinetics and compartmental analysis [J]. *Plant Physiology*, 1998, 116: 581-587
- [17] 张亚丽, 段英华, 沈其荣. 水稻对硝态氮响应的生理指标筛选[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 571-575
- [18] 冉炜. 农业土壤中化肥氮的形态转化机理及其调控研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2000