

# 水培硝态氮浓度对冬小麦幼苗氮代谢的影响

门中华<sup>1,2</sup>, 李生秀<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 包头师范学院, 内蒙古 包头 014030)

**摘要:** 以 Hoagland 营养液为培养基质, 以冬小麦为试材, 动态测定高(含  $\text{NO}_3^-$ -N 15  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )、中(含  $\text{NO}_3^-$ -N 7.5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )、低(含  $\text{NO}_3^-$ -N 2.5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )三种氮水平处理条件下硝态氮的吸收和累积、硝酸还原酶活性、铵态氮含量、小麦吸氮量及根系活力, 分析不同供氮水平对冬小麦硝态氮吸收、还原、转运的影响, 探讨不同供氮条件下, 植物地上、地下部分硝态氮代谢的变化。结果表明: 水培条件下, 营养液  $\text{NO}_3^-$  的消耗量、pH 变化、植株全氮以及根系活力均能较好地反映不同氮水平对植株硝态氮代谢的影响; 高氮条件下植物体内  $\text{NO}_3^-$  进一步同化较弱, 冬小麦植株积累了较多的  $\text{NO}_3^-$ , 而非过多的吸收营养液中的  $\text{NO}_3^-$ 。不同氮浓度处理下,  $\text{NO}_3^-$  的供应与植株 NRA 间无相关关系, 根系与地上部的变化曲线不同;  $\text{NO}_3^-$  供应浓度高时, 植物地上部是主要同化部位; 低浓度时根部是主要同化部位。虽然  $\text{NO}_3^-$  是一种安全的氮源, 但供应过高则抑制体内硝态氮进一步同化, 而供应过低, 植物吸收  $\text{NO}_3^-$  量不足、根系活力下降, 不利于小麦幼苗氮素营养。

**关键词:**  $\text{NO}_3^-$ -N; 冬小麦; 水培; 氮代谢

**中图分类号:** Q945.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2010)04-0544-07

## Effect of $\text{NO}_3^-$ -N concentration on nitrate nitrogen metabolism of winter wheat seedlings under water culture

MEN Zhong-Hua<sup>1,2</sup>, LI Sheng-Xiu<sup>1</sup>

(1. Resource & Environment Science College, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Baotou Teacher's College, Baotou 014030, China)

**Abstract:** In cultural liquid Hoagland, with winter wheat set as testing object, this research tested dynamically the absorption and accumulation of nitrate nitrogen, the activities of nitrate reductase, the content of ammonium nitrogen, the nitrogen absorption of the wheat and root activity under the three levels of nitrogen content-high, medium and low. This research completely analyzed the influence over the absorption, reduction and transferability of nitrate nitrogen of winter wheat being treated with different nitrogen levels, and investigates the change of nitrate nitrogen metabolism on above-ground and under-ground parts of plant, under different nitrogen levels. The research indicated that, in water culture, the consumption of nutrient solution  $\text{NO}_3^-$ , the change of pH values, complete nitrogen of plant and root activity reflected the effect on metabolism of plant nitrate nitrogen well under different nitrogen levels; Under high nitrogen level, assimilation of  $\text{NO}_3^-$  in plant was weaker than that of medium nitrogen level as winter wheat accumulates adequate  $\text{NO}_3^-$  itself rather than absorbing more from nutritional liquid. Under different nitrogen levels, no relation-

收稿日期: 2008-10-17 修回日期: 2009-04-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30230230); 国家自然科学基金农业倾斜项目(30070429); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY07120)[Supported by Key Project of the National Natural Science Foundation of China(30230230); General Project of the National Natural Science Foundation of China(30070429); the Scientific Research Program for Universities in Inner Mongolia Autonomous Region(NJZY07120)]

作者简介: 门中华(1975-), 男(蒙古族), 内蒙古包头市人, 博士, 副教授, 主要从事植物营养方面的研究, (E-mail)zhonghuamen75@yahoo.com.cn.

ship between  $\text{NO}_3^-$  supply and plant NRA was found, the curve for the roots and above-ground part varied, under high  $\text{NO}_3^-$  level, the above-ground part of the plant was the main assimilated part; on the contrary, under low  $\text{NO}_3^-$  level, the root part of the plant was the main assimilated part. Even  $\text{NO}_3^-$  was a safe nitrogen resource, it could restrain the further assimilation of nitrate nitrogen in plants under too much higher level, on the other side, it could lead to an insufficiency absorption of  $\text{NO}_3^-$  and the decrease of root activity, which was not good to the absorption of nitrogen nutrition of young wheat seedling.

**Key words:**  $\text{NO}_3^-$ -N; winter wheat; water culture; nitrogen metabolism

硝态氮是旱地农业中最重要氮源,植物在高浓度硝态氮的生长条件下可对其奢侈吸收(Martinioia, 2001; 高青海等, 2008)。生理学家虽已证明  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 具同样营养价值,但农业生产中往往  $\text{NO}_3^-$ -N 更优,营养液培养时更是如此(连兆煌, 1994; 刘拥海, 2007)。有关植物硝态氮的研究主要围绕硝态氮累积、利用与 NR 的关系进行,主要从硝态氮可能造成的蔬菜、环境污染方面考虑(Haygarth, 2002; 刘杏认等, 2003)。随着分子生物学的深入发展,目前从相关基因对硝态氮代谢调控角度研究成为氮素研究领域的一个热点(孙菲菲等, 2008; Cabello 等, 2004)。然而,从植物体内硝态氮整体代谢角度研究高等植物氮代谢报道极少。研究高等植物全硝态氮条件下的代谢过程,对于完善传统研究与分子水平研究之间的中间环节具有重要理论意义。

硝态氮进入植物体后要经过一系列反应才能转变为植物可直接利用的形态。作物利用硝态氮的能力受供氮水平、光照强度、根系吸收能力等多种因素影响(布坎南等, 2004; 董彩霞等, 2002)。近年来国内外关于  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 对植物生育效益研究多采用蔬菜和豆科作物,对其它作物涉及不多(樊明寿等, 2005); 研究重点是氮水平对体内硝态氮浓度及氮素同化关键酶——NR 活性的关系。得到的结果有的相同,有的不同,有的甚至完全相反(Yang 等, 2005; 王月福等, 2005)。这些结果显示了硝态氮供应水平对植物硝态氮代谢影响的复杂性,也说明进行有关供氮水平对植物硝态氮代谢影响的研究时,不能仅仅考虑供氮水平与体内硝态氮浓度及 NRA,也不能仅仅考虑地上部分而忽略地下部分(柴小清等, 1996; 薛璟花等, 2007)。

本试验以 Hoagland 营养液为培养基质,以冬小麦为材料,动态测定了高、中、低三种氮水平处理条件下硝态氮的吸收、累积,硝酸还原酶活性,铵态氮含量,小麦吸氮量及根系活力,全面分析不同硝态

氮供应水平对冬小麦硝态氮吸收、还原、转运的影响,探讨了在供给不同硝态氮浓度的条件下,植物地上、地下部分硝态氮代谢的变化。试验中,各处理植株外观上均未发现明显的缺氮或氮过量症状。由于自然条件下,营养元素的隐性缺乏或过量是更常见的情况,在这种条件下探讨不同硝态氮水平与植物硝态氮代谢的关系更具实际意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

供试冬小麦品种为小偃 22。将种子用无离子水清洗后置于铺有滤纸的培养皿中培养,三叶期时转至塑料盆中液培,盆高 15 cm,盆口直径 23 cm,体积 4 L。培养时加入营养液 4 L,幼苗定植于泡沫板上,每板 13 孔,每孔定植 1 株。初培液为 1/2 浓度全硝态氮霍格兰营养液,小麦生长到平均单株干重 2~3 g 时,选长势一致的 15 盆进行正式试验,每 5 盆为 1 组,共 3 组,同时将初培液分别更换为高氮(含  $\text{NO}_3^-$ -N 15 mmol · L<sup>-1</sup>)、适氮(含  $\text{NO}_3^-$ -N 7.5 mmol · L<sup>-1</sup>)和低氮(含  $\text{NO}_3^-$ -N 2.5 mmol · L<sup>-1</sup>)的 1/2 强度的全硝态氮霍格兰营养液后继续培养。培养时间设为 12 d,将试验中营养液的初始 pH 值调为 3.98(殷宏章, 1984; 门中华等, 2005)。更换营养液前初培液中的硝态氮浓度为 1.1 mmol · L<sup>-1</sup>,更换后的营养液在培养材料前用 NaOH 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 将 pH 调至 3.98,并设置无植株的营养液作对照,用以测定培养期间营养液氮素的反硝化损失。营养液用无离子水配制,每日通气 1.5 h。进行不同氮浓度营养液处理后,每隔 3 d 取样测定植物体内的  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 含量及硝酸还原酶活性(NRA)。植物收获时,测定溶液中硝态氮量及植物全氮。

### 1.2 测定方法

NRA 采用活体法测定(中国科学院上海植物生理研究所等, 2004);  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 采用研磨浸

提,浸提液用连续流动分析仪测定(陈宝明等, 2002);植株从营养液中吸收的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  量由营养液中起始  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量与培养后  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量之差计算,并用对照对溶液中硝态氮的衰减进行校正;植株全氮采用凯氏法测定;根系活力用 TTC 法测定。硝酸还原酶测定设定重复 5 次,其它项目测定重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物体内硝态氮变化

测定结果显示(图 1、图 2),培养初期,植株地上部硝态氮含量较低。转入正式培养后,植物硝态氮含量变化与营养液氮浓度有关。硝态氮中、高培养液中植株硝态氮含量急剧升高,到达一定浓度后趋于稳定;低浓度培养液中植株硝态氮含量 3 d 后略有升高,以后稳定在低浓度水平。小麦根部硝态氮含量变化与地上部趋势相似(图 2),但初期增加低于地上部。从总的趋势来看,高氮培养液中植株根部硝态氮含量一直较高,且随时间有上升趋势;低、中氮水平下培养植株根部硝态氮含量比较稳定。以上结果表明:冬小麦体内硝态氮含量既和培养液硝态氮浓度有关,也和部位有关。地上部的硝态氮浓度始终高于根部,说明小麦幼苗期硝态氮主要的贮存场所是地上部分。

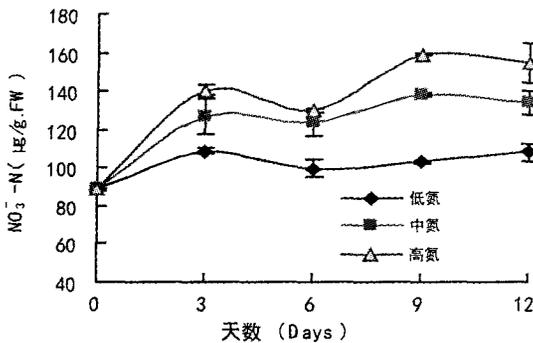


图 1 不同氮水平对地上部硝态氮浓度的影响  
Fig. 1 Effect of N levels on the  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content of shoots

### 2.2 植物体内铵态氮变化

植物体内铵态氮一般来源于植物吸收和体内硝态氮的还原,本试验在完全硝态氮的 Hoagland 营养液中培养,植物只能吸收  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ,植株内源铵态氮完全来自硝态氮还原。测定表明(图 3),中、高浓度硝态氮培养液中,植株铵态氮含量初期明显下降、后期有上升趋势;高氮水平培养后期铵态氮含量远

远高于中、低氮水平。低氮处理,植株铵态氮虽有波动,但总体保持在一个较低含量,培养前后差异不大。不同硝态氮浓度下小麦根部铵态氮的变化曲线非常相似(图 4),后期均显著上升,但各处理间的测定值差异不显著。

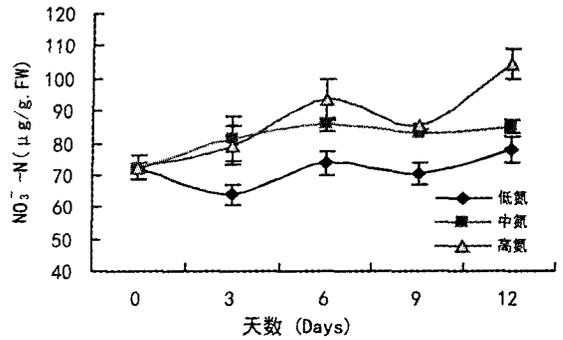


图 2 不同氮水平冬小麦根部硝态氮含量  
Fig. 2 Effect of N levels on the  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content of roots

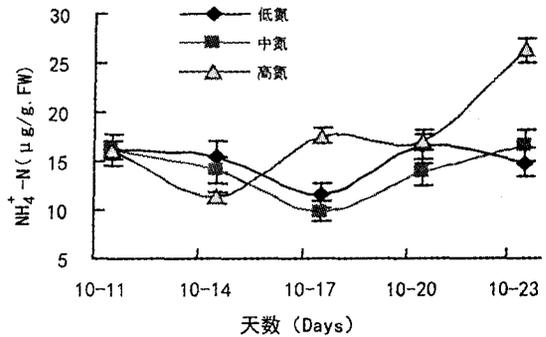


图 3 不同氮水平冬小麦植株铵态氮含量  
Fig. 3 Effect of N levels on the  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  content of shoots

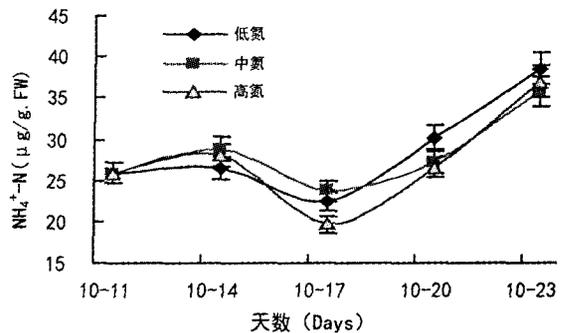


图 4 不同氮水平冬小麦根部铵态氮含量  
Fig. 4 Effect of N levels on the  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  content of roots

### 2.3 植株吸氮量

硝态氮进入植株后,通过一系列酶的催化作用最终形成氨基酸和蛋白质而被植物利用,测定作物

吸氮量可确定硝态氮浓度对其吸收的影响, 最终确定其效果; 植物由培养液中吸收硝态氮用于生长, 培养结束后, 测定培养液中硝态氮的变化情况可以更进一步确定硝态氮浓度对其吸收的影响。将处理结束后的营养液定容到原来体积, 测定其  $\text{NO}_3^-$ -N 含量; 未栽培植物的溶液也作同样处理。植物根系反硝化作用影响因素复杂(欧阳学军等, 2007), 测定结果表明, 本试验未栽培植物营养液的硝态氮浓度与起始浓度无差异, 表明在培养期间反硝化损失量没有或甚微而难以检测; 而栽培植物的营养液在培养后显著降低。据此可以认为硝态氮的减少是由作物吸收造成的, 营养液中硝态氮的减少量全部用于植物有机体的建造或贮存在有机体内。因此, 小麦从营养液中吸收的  $\text{NO}_3^-$ -N 量可以根据培养前与培养后营养液中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的差值计算。植物吸氮量

测定结果显示(表 1): 适氮处理的吸氮量明显高于高氮、低氮处理, 高氮处理也显著高于低氮处理。方差分析表明, 各处理之间的吸氮量有显著差异( $P \leq 0.05$ )。培养液冬小麦吸氮量测定结果表明(表 2), 低氮培养植株吸收的氮素最少, 中氮培养最高, 高氮居中。方差分析结果显示, 各氮水平间植株吸氮量均有显著差异( $P < 0.05$ ), 而低、中氮差异极显著。这表明, 适当的硝态氮水平有利于提高冬小麦幼苗对硝态氮的利用效率, 过高的硝态氮浓度不利于植物对其吸收。根据培养前与培养后植物吸氮量计算(表 1), 培养期间作物地上部及根部吸收的总硝态氮量与营养液中硝态氮减少量有着很好的一致性, 吸氮量改变大的植株其营养液中硝态氮的减少量也大。这有力地说明, 中等浓度的氮素处理有利于硝态氮的吸收转化, 太低和太高浓度的氮素水平对冬

表 1 不同氮水平水培冬小麦不同部位干重、含氮量及吸氮量

Table 1 Effect of  $\text{NO}_3^-$ -N concentration on dry weight, nitrogen content and N uptake of winter wheat

处理 Treatment	硝态氮水平 Nitrate nitrogen level ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
	2.5	7.5	15
地上部分测定结果 Testing result of shoots			
含氮量 Content of nitrogen (%)	2.67	2.88	2.78
单株干重 Shoot dry weight (g)	0.5	0.64	0.58
吸氮量 N uptake (mg/plant)	13.35±0.52	18.43±0.13	16.12±0.81
原来含氮量 Original content of nitrogen (%)	2.85	2.85	2.85
原来单株干重 Original shoot dry weight (g)	0.32	0.32	0.32
原来吸氮量 Original N uptake (mg/plant)	9.12	9.12	9.12
培养前后吸氮量差值 Difference before and after plant culture	4.23	9.31	6.17
地下部分测定结果 Testing result of roots			
含氮量 Content of nitrogen (%)	4.99	4.81	4.55
根系干重 Root dry weight (g)	0.10	0.13	0.13
吸氮量 N uptake (mg/plant)	4.99±0.07	6.25±0.08	5.92±0.15
原来吸氮量 Original content of nitrogen (%)	4.46	4.46	4.46
原来根系干重 Original root dry weight (g)	0.06	0.06	0.06
原来吸氮量 Original N uptake (mg/plant)	2.68	2.68	2.68
培养前后吸氮量差值 Difference before and after plant culture	2.31	3.58	2.78
整株吸氮量 N uptake of whole plant			
整株原来吸氮量 Original N uptake of whole plant (mg/plant)	11.8	11.8	11.8
整株吸氮量 N uptake of whole plant (mg/plant)	18.34	24.68	22.04
整株吸氮增加量 Increase of N uptake of whole plant (mg/plant)	6.54	12.89	10.24

小麦根系及地上部硝态氮吸收利用均不利。

#### 2.4 硝酸还原酶活性

测定结果(图 5)表明, 不同氮水平处理前, 冬小麦地上部硝酸还原酶活性(NRA)甚低, 但转移到营养液培养中培养 2 d, NRA 急剧上升, 随后下降, 之后保持在一定水平。不同氮水平处理对硝酸还原酶活性的影响因培养时间长短而不同。开始 2 d 内, 高氮处理者活性最高, 中氮次之, 低氮最低。以后随

着硝酸还原酶活性下降, 不同处理间的活性差别也显著减小。培养结束时, 中氮处理的硝酸还原酶活性反而升到最高, 而高氮和低氮处理较低。方差分析显示, 不同氮水平处理植株的 NRA 在培养初期具显著差异( $P < 0.05$ ), 但培养中期(第 5 天), 各处理之间差异变得不显著( $P > 0.05$ ), 培养结束时中氮处理的酶活性又显著升高。

根部硝酸还原酶活性与地上部不同(图 6), 处

理之初,所有处理的酶活性均降低,随后的变化因处理而不同,低氮处理的酶活性一直下降,而高、中氮处理的酶活性有一个升高、降低的过程,处理后期,酶活性的高低与硝态氮处理的浓度有较好的一致性,氮水平高的处理其酶活性也较高。

表 2 不同氮水平培养液冬小麦吸氮量

Table 2 Plant uptake N by winter wheat cultured at different nitrogen levels

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 浓度 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N concentration (mmol · L <sup>-1</sup> )	营养液中的含氮量 Content of nitrogen of nutrition solution (mg · L <sup>-1</sup> )		总吸收量 Total N uptake (mg/pot)	单株 吸收量 Uptake N (mg · plant <sup>-1</sup> )
	10月11日 (October 11)	10月23日 (October 23)		
2.5	35	20.76	56.97Aa	6.70
7.5	105	77.58	112.25 Bb	13.21
15.0	210	186.73	93.07Bc	10.95

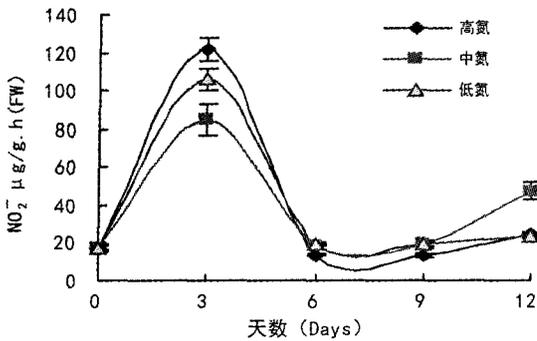


图 5 不同氮水平冬小麦植株地上部 NRA

Fig. 5 Effect of different N levels on NRA of shoots

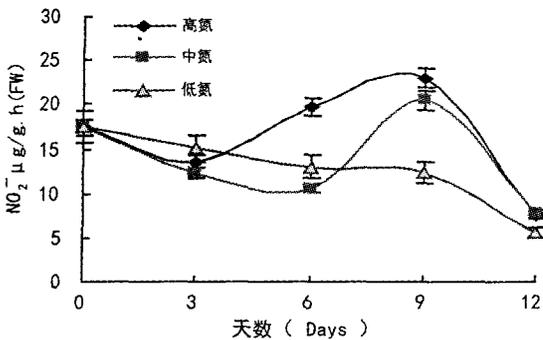


图 6 不同氮水平冬小麦根部 NRA

Fig. 6 Effect of different N levels on NRA of roots

2.5 根系活力

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官,根的生长状况和活力水平直接影响地上部的生长和营养状况及产量水平。根系活力大小在一定程度上反映

了作物吸收养分能力的强弱,一般情况下,根系活力越高,吸收养分的能力越强。根系活力的测定表明(图 7),不同氮水平下,冬小麦根系活力始终以中氮水平最高,高、中氮水平变化相似,而低氮水平始终保持在一个较低水平。除第 9 天外,高、低氮水平间各测定时期根系活力无显著差异。

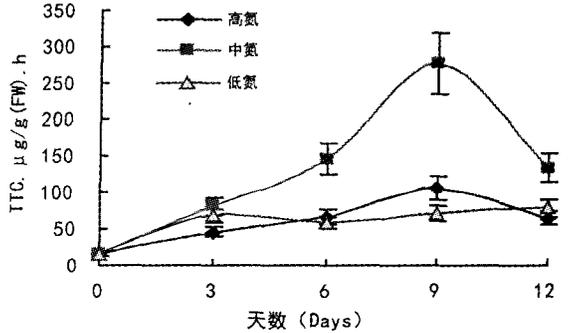


图 7 不同氮水平条件下冬小麦根系活力

Fig. 7 Effect of different N levels on root activities

2.6 培养前后营养液 pH 变化

植物在吸收营养物质时摄取的阴阳离子数量不同,根系向营养液中分泌的 OH<sup>-</sup> 和 H<sup>+</sup> 数量也不同。植物根系吸收一分子 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 相应地释放一分子的 OH<sup>-</sup> 到生长介质中,从而引起营养液 pH 值变化。营养液 pH 变化对于根系吸收利用营养物质有重要影响。表 3 表明,培养结束时,不同氮水平营养液 pH 都显著升高;中氮水平升高幅度最大,高氮其次,低氮最小;升高幅度不同处理间有极显著差异 (P<0.01)。氮是植物生长需要量最大的必需矿物质元素,营养液 pH 升高幅度主要是由吸收 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 多少决定的,因而 pH 升高与植物吸氮量完全吻合。

表 3 不同氮水平营养液 pH 变化结果

Table 3 The pH changes of nutrition solution at different nitrogen levels

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 浓度 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N concentration (mmol L <sup>-1</sup> )	培养前后 pH 变化 Changes of pH before and after cultivation		pH 升高值 Rise of pH
	10月11日 (October 11)	10月23日 (October 23)	
2.5	3.98	5.64	1.66±0.17
7.5	3.98	7.44	3.46±0.17
15.0	3.98	6.89	2.91±0.06

3 讨论

植物吸收的硝态氮会进一步在 NR 作用下还原

成铵态氮, NRA 表达受多种因素影响。光、温等条件一致时, 硝态氮浓度起决定作用(布坎南等, 2004)。但 NRA 改变也会引起体内游离硝态氮含量不断发生变动。因此, 研究硝态氮代谢既要从硝酸还原酶活性本身着手, 也要从植物体内氮素形态的转化、培养介质变化考虑。本研究在这方面进行了探讨。

从硝态氮浓度为  $1.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的初培液中转移到正式培养后, 无论根系还是地上部, 高、中氮水平培养的植株硝态氮含量均显示升高趋势, 升高幅度与供氮水平一致; 而低氮处理植物由于培养液中硝态氮浓度低于初培液, 无论地上部分还是根系部分硝态氮含量始终保持一个较低水平。表明无论地上部还是根部, 体内硝态氮含量主要受根系供氮水平影响。植物体内  $\text{NO}_3^-$  同化首先在 NR 催化下还原产生  $\text{NH}_4^+$ , 与硝态氮在植物体内安全贮存不同, 较低浓度的  $\text{NH}_4^+$  就会对植物细胞膜造成毒害, 而  $\text{NH}_4^+$  的进一步同化主要在谷氨酰胺合成酶(GS)催化下进行, GS 的活性处于氮同化的中心地位, 植物体内  $\text{NH}_4^+$  含量受到 NR 和 GS 活性的综合影响(熊明彪, 2005)。在植物硝态氮代谢研究中, 研究者往往重视 NR 的限速作用, 而忽略了 GS 在氮代谢中的重要影响。王月福等(2002)研究发现, 在田间条件下, 施氮肥可显著提高小麦叶中 GS 活性。本试验结果显示: 更换新鲜培养液之后, 各处理植物铵态氮含量初期较低, 培养后期随培养液中硝态氮的消耗又继续升高, 这可能是由于 GS 活性的变化造成的。从植株吸氮量可知, 高氮水平对硝态氮同化有抑制作用, 由高氮植株地上部铵态氮含量在 NRA 峰值之后的培养时期一直升高这一结果来看, 这种抑制很可能是由于培养时间延长后高氮水平抑制植株对铵进一步同化。根部铵态氮含量变化与中、低氮水平的植株地上部铵态氮含量变化趋势相似, 在 NRA 峰值后出现最大值, 除个别时期外, 各处理间无显著差异。

有关硝酸还原酶活性与植物体内硝态氮含量的关系是硝态氮代谢研究领域长期有争议的话题。有的研究者认为, NR 是诱导酶, 硝态氮含量高, NRA 活性也高, 二者是正相关(高祖明等, 1989)。有的研究者认为, NRA 高则硝酸盐还原强烈, 二者为负相关(Datta & Sharma, 1999)。另外一些研究者认为, 二者关系复杂, 不能用简单的正相关或负相关来表示, 甚至认为 NR 不被氮代谢所调节(柴小清等,

1996)。本试验的结果显示: 植物体内硝态氮含量与 NRA 不能用简单的相关或负相关来表示, 植物体内 NRA 不仅受到硝态氮的含量的影响, 也受到其它因素如根部 pH、根部硝态氮供应浓度的影响。当培养液 pH 较低, 硝态氮供应浓度较高时, 地上部 NRA 较高, 硝态氮还原以地上部为主; 当培养液 pH 较高, 硝态氮供应浓度较低时根部 NRA 较高, 硝态氮还原以根部为主。

植物由溶液中吸收的硝态氮表明, 在中等硝态氮供应条件下, 植物吸收的硝态氮最多, 低氮最低, 高氮处于其间; 植物吸氮量的分析与由溶液吸收的硝态氮有很好的-一致性, 更确证了植物吸收的大部分氮已转变为其他形态的氮素。由此可见, 合适浓度的氮素供应能促进植物吸收更多的氮素, 增加植物体内有机氮含量。高氮处理与中氮处理相比, 虽然从营养液中吸收的硝态氮量比低氮高, 却显著低于中氮水平, 说明过高的硝态氮供应会造成其在植株体内累积, 不利于进一步代谢。

根系活力是指根系新陈代谢活动的强弱, 是反映根系吸收功能的一项综合指标(陆卫平等, 1999)。中、高氮条件下, NR 最高酶活性的出现时间与根系活力最大值出现时间吻合, 低氮处理的根系活力则一直在一个较低的水平变化, 总体呈现不断下降趋势。由此可知根系活力与 NR 酶活性之间密切相关, 根系活力达最高时, NRA 也最高。

## 4 结论

本研究结果表明: 不同氮浓度处理下, 植株 NRA 表现出一定的差异, 但硝态氮的供应与植株 NRA 之间没有相关关系, 根系与地上部的变化曲线也不同, 在高浓度硝态氮供应时, 植物地上部是主要的硝态氮同化部位, 而在低浓度硝态氮供应时根部是主要的硝态氮同化部位。水培条件下, 营养液硝态氮的消耗量、pH 变化、植株全氮以及根系活力均能较好地体现不同氮水平对植株硝态氮代谢的影响; 高氮条件下冬小麦植株积累了较多的硝态氮, 这是由于其体内硝态氮的进一步同化较中氮处理弱造成的, 而非过多的吸收营养液中的硝态氮。冬小麦幼苗水培, 使用 1/2 强度( $7.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )的全硝态氮 Hoagland 营养液较适合, 虽然对于植物来说硝态氮是一种安全的氮素来源, 但供应过高则抑制体内硝态氮的进一步同化, 而过低植物吸收硝态氮量不足、

根系活力下降,均不利于小麦幼苗的氮素营养。

### 参考文献:

- 马斯纳著. 李春俭译. 2001. 高等植物的矿质营养[M]. 北京: 科学出版社:160-163
- 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 2004. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社:89-94
- 布坎南 BB, 格鲁依森姆 W, 琼斯 RL. 瞿礼嘉, 顾红雅, 白书农, 等(译). 2004. 植物生物化学与分子生物学[M]. 北京: 科学出版社:662-669 连兆煌. 1994. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社:9-11
- 殷宏章. 1988. 罗宗洛文集[C]. 北京: 科学出版社:33-46
- Cabello P, Roldán MD, Vivián CM. 2004. Nitrate reduction and the nitrogen cycle in archaea[J]. *Microbiology*, **150**(11):3 527-3 546
- Chai XQ(柴小清), Yin LP(印莉萍), Liu XL(刘祥林), et al. 1996. Influence of different concentrations of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  on the activity of glutamine synthetase and other relevant enzymes of nitrogen metabolism in wheat roots(不同浓度的  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  对小麦根谷氨酰胺合成酶及其相关酶的影响)[J]. *Acta Bot Sin*(植物学报), **38**(10):803-808
- Chen BM(陈宝明), Wang ZH(王朝辉), Li SX(李生秀). 2002. Determination of nitrate metabolic pool in spinach leaves(菠菜叶片中硝态氮代谢库的测定)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯), **38**(2):124-126
- Datta R, Sharma R. 1999. Temporal and spatial regulation of nitrate reductase and nitrite reductase in greening maize leaves[J]. *Plant Sci*, **144**:77-83
- Dong CX(董彩霞), Zhao SJ(赵世杰), Tian JC(田纪春), et al. 2002. Effects of different concentration of  $\text{NO}_3^-$  on the chlorophyll fluorescence parameters in seedling leaves of high protein wheat cultivars(不同浓度的硝酸盐对高蛋白小麦幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), **28**(1):59-64
- Fan MS(樊明寿), Sun YQ(孙亚卿), Shao JW(邵金旺), et al. 2005. Influence of nitrogen forms on oat growth and phosphorus uptake(不同形态氮素对燕麦营养生长和磷素利用的影响)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), **3**(1):114-118
- Gao QH(高青海), Wei M(魏珉), Yang FJ(杨凤娟), et al. 2008. The response of dry matter accumulation, turgor pressure and photosynthetic rate in cucumber seedlings to nitrate and ammonium nitrogen(黄瓜幼苗干物质积累、膨压及光合速率对铵态氮和硝态氮的响应)[J]. *Plant Nut Fert Sci*(植物营养与肥料学报), **14**(1):145-149
- Gao ZM(高祖明), Zhang YD(张耀栋), Zhang DY(张道勇). 1989. Effects of N,P,K treatment on the cumulation of nitrate and the activities of nitrate reductase and superoxidase in two leafy vegetables(氮磷钾对叶菜硝酸盐累积和硝酸还原酶、过氧化物酶活性的影响)[J]. *Acta Hort Sin*(园艺学报), **16**(4):293-297
- Haygarth PM. 2002. Agriculture, fertilizers and the environment [J]. *J Environ Quality*. **31**(5):17-57
- Heffner LR, Teichberg M, Fox S, et al. 2004. Nitrate reductase and glutamine synthetase activity and growth in *ulva lactuca* in Waquoit Bay: A time sequence of responses to differences in nitrogen supply[J]. *Biol Bull*, **207**:175-177
- Lu WP(陆卫平), Zhang QL(张其龙), Lu JD(卢家栋), et al. 1999. Relationship of root activity to dry matter accumulation and grain yield in maize(*Zea mays*)(玉米群体根系活力与物质积累及产量的关系)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), **25**(6):718-722
- Liu XR(刘杏认), Liu JL(刘建玲), Ren JQ(任建强). 2003. Study on influence factors on nitrate accumulation in vegetables and its control measures(影响蔬菜体内硝酸盐累积的因素及调控研究)[J]. *Soil fertilizer*(土壤肥料), (4):3-7
- Liu YH(刘拥海), Yu L(俞乐), Peng XX(彭新湘). 2007. Changes on leaf oxalate content in buckwheat growing under different nitrogen forms(不同氮素形态培养下荞麦叶片中草酸积累的变化)[J]. *Guihaia*(广西植物), **27**(4):616-621
- Men ZH(门中华), Li SX(李生秀). 2005. Effect of  $\text{CO}_2$  concentration on nitrogen metabolism of winter wheat( $\text{CO}_2$  浓度对冬小麦氮代谢的影响)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), **4**(8):601-608
- Ouyang XJ(欧阳学军), Zhou GY(周国逸), Hong ZL(黄忠良), et al. 2007. Effects of seedlings in pots on soil greenhouse gases emission during incubation(盆栽苜蓿、肖蒲桃和黄果厚壳桂幼苗对土壤温室气体排放影响的培育实验研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **27**(1):100-105
- Sun FF(孙菲菲), Li Y(李英), Hou XL(侯喜林), et al. 2008. Effect of different  $\text{NO}_3^-$ -N concentration on yield, nutrient quality and nitrate content of *Brassica campestris* ssp. *chinensis* Makin(硝态氮对不结球白菜产量与主要营养品质及硝酸盐含量的影响)[J]. *J Nanjing Agric Univ*(南京农业大学学报), **31**(2):154-158
- Wang YF(王月福), Yu ZW(于振文), Li SX(李尚霞), et al. 2002. Effect of nitrogen nutrition on the change of key enzyme activity during the nitrogen metabolism and kernel protein content in winter wheat(氮素营养水平对冬小麦氮代谢关键酶活性变化和籽粒蛋白质含量的影响)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), **28**(6):743-748
- Xue JH(薛璟花), Mo JM(莫江明), Li J(李炯), et al. 2007. The short-term response of soil microorganism number to simulated nitrogen deposition(土壤微生物数量对模拟氮沉降增加的早期响应)[J]. *Guihaia*(广西植物), **27**(2):174-179
- Xiong MB(熊明彪), Hu H(胡恒), Tian YB(田应兵), et al. 2005. Dynamics of soil nutrition and wheat root activities during wheat growth(小麦生长期土壤养分与根系活力变化及其相关性研究)[J]. *J Soil Sci*(土壤通报), **36**(5):700-703
- Yang ZJ, Midmore DJ. 2005. A model for the circadian oscillations in expression and activity of nitrate reductase in higher plants [J]. *Annals Bot*, **96**(6):1 019-1 026