

不同基因型小麦苗期和成熟期耐低氮性的比较

徐红卫^{1,2,*}, 陆瑞菊^{1,2,*}, 刘成洪^{1,2}, 高润红^{1,2}, 郭桂梅^{1,2}, 黄亦辰^{1,2,3}, 杨沙沙^{1,2,3}, 陈志伟^{1,2}, 何婷^{1,2}, 李颖波^{1,2}, 黄剑华^{1,2,**}

¹上海市农业科学院生物技术研究所, 上海201106; ²上海市农业遗传育种重点实验室, 上海201106; ³上海海洋大学水产与生命学院, 上海201306

摘要: 采用苗期营养液水培与全生育期田间种植的方法, 以相关形态、产量、生理指标作为评价依据, 对5份不同基因型小麦的耐低氮性进行了比较。结果表明: 相对于正常供氮, 低氮胁迫条件下, 小麦苗期株高降幅12%~29%、叶片干重降幅11%~57%、根冠比增幅4%~52%、叶片氮素含量增幅62.6%~91.7%, 叶片氮素累积量降幅47%~71%。成熟期小麦的株高降幅21%~26%、每株有效穗数降幅20%~41%、小麦产量降幅26%~69%。这表明, 小麦苗期株高、叶片干重和氮素累积量的下降可限制小麦产量的形成。可以认为, 不同基因型小麦苗期与成熟期的耐低氮性存在一定联系, 各基因型小麦在耐低氮性上存在差异, 可以在苗期进行耐低氮性初步鉴定。通过比较、鉴定小麦苗期和成熟期的不同性状, 能够挖掘出耐低氮种质材料。依据供试材料的特征, 结合各自的形态和产量生理指标上的差异, 对耐低氮的可能机理进行了讨论。

关键词: 小麦; 基因型; 氮水平; 产量; 生理指标

Comparison of Low Nitrogen Tolerance of Wheat Genotypes at Seedling and Maturity Stages

XU Hong-Wei^{1,2,*}, LU Rui-Ju^{1,2,*}, LIU Cheng-Hong^{1,2}, GAO Run-Hong^{1,2}, GUO Gui-Mei^{1,2}, HUANG Yi-Chen^{1,2,3}, YANG Sha-Sha^{1,2,3}, CHEN Zhi-Wei^{1,2}, HE Ting^{1,2}, LI Ying-Bo^{1,2}, HUANG Jian-Hua^{1,2,**}

¹Biotech Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106, China; ²Shanghai Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding, Shanghai 201106, China; ³College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The tolerance of five wheat genotypes under low nitrogen stress was evaluated based on the morphological, yields and physiological characters by both hydroponic and filed investigations. The results showed that the plant heights and leaf dry biomass at seedling stage declined by 12%–29% and 11%–57% respectively, while the root-shoot ratios increased by 4%–52% in low nitrogen treatments comparing to those in the normal nitrogen treatments. The leaf nitrogen contents increased by 62.6%–91.7%, while leaf nitrogen accumulative amounts reduced by 47%–71% in low nitrogen treatments comparing to that in the normal nitrogen treatments. At maturity stage, the plant heights, numbers of grain per plant and yields in low nitrogen treatments were 21%–26%, 20%–41% and 26%–69% lower than those in the normal nitrogen treatments, respectively. Our results revealed that the decrease of plant heights, leaf dry biomass and nitrogen accumulative amounts in low nitrogen treatments at seedling stage limited wheat yield at maturation. There is a clear relationship on the tolerance to low nitrogen stress for the tested wheat genotypes between seedling and maturity stages, although there present variation for different genotypes. The possible mechanisms of tolerance differences of wheat genotypes to low nitrogen stress were discussed.

Key words: wheat; genotypes; low nitrogen stress; yield; physiological parameters

氮是小麦生长发育所必需的大量元素, 在作物生产系统中具有极其重要的作用(Li 等2012)。合理施用氮肥是提高小麦产量和品质的重要途径, 施肥对小麦增产的贡献率达50%以上(Crawford 和 Glass 1998)。氮肥过量施用不仅增加农业生产成本, 还会产生环境污染, 造成小麦品质下降(Sayer

和Cassman 2013; 朱兆良和金继运2013)。近年来,

收稿 2014-10-15 修定 2014-11-28

资助 上海市种业发展项目[沪农科种字(2012)第7号]和上海市农业科学院学科建设专项(LY11)。

* 并列第一作者。

** 通讯作者(E-mail: sw1@saas.sh.cn; Tel: 021-62201032)。

氮肥施用量逐年增加,但肥料效益却逐年降低,世界氮肥的平均利用率为40%~60%,而我国仅为30%~35% (张福锁和马文奇2000;张福锁等2008)。科学、合理、高效利用氮肥资源,对提高小麦产量和氮素利用效率、改善小麦品质,减少环境污染负荷具有重要意义(Foulkes等2009; Xu等2012)。

筛选和培育耐低氮小麦种质是降低氮肥用量、提高肥料资源利用率、从源头上降低生产成本、减少环境污染的有效举措(裴雪霞等2007; 孙传范等2004; 童汉华等2007; 徐红卫等2013)。耐低氮种质的挖掘和鉴定对于选育氮高效小麦品种、提高氮素利用效率尤为重要(Reynolds等2012)。童依平等(1999)认为,同一基因型作物品种在不同供氮水平下的氮素利用效率也有较大差异。当前研究主要集中在不同小麦基因型品种的氮素累积量、氮素转移率、氮素生产效率、氮素利用效率和收获指数等方面(Duan等2007; Li等2006; Richard-Molard等2008),有关不同基因型小麦的耐低氮特性的研究较少。小麦的耐低氮优良遗传性状的分析、鉴定,可以充分挖掘优异种质资源,揭示作物耐低氮性与品种表现型之间的关系,对提高小麦在低氮胁迫条件下的氮利用率具有重要意义(李宝珍等2007; 李丹丹等2009)。

本文采用苗期营养液水培与全生育期田间种植的方法,研究5份不同基因型小麦在不同供氮水平下的表现型差异及其与氮素累积及产量构成的关系,分析不同基因型小麦耐低氮性的差异。本研究旨在对适应当地种植不同基因型小麦的耐低氮性进行鉴定,为小麦耐低氮优良种质挖掘和改良、选育耐低氮小麦种质资源提供理论依据。

材料与方 法

1 试验材料

从河南、江苏、上海等地收集了一批小麦(*Triticum aestivum* L.)种质材料,经过本地适期播种鉴定,从中筛选15份适宜于上海种植的材料,再通过田间低氮胁迫种植鉴定,筛选出5份材料,分别为来源于上海的‘基62’、‘基44’,来源于江苏的‘生14’、‘生11’,来源于河南的‘驻74’,作为本研究供试材料。

2 试验方法

2.1 溶液培养方法

试验于2013年3月至2013年5月在上海市农业科学院生物技术研究所植物细胞工程研究室进行,本试验为两因素(基因型×氮水平)试验,选用5个不同基因型小麦,设置两个氮水平(9.4和0.94 mmol·L⁻¹),每个处理设3次重复。试验采用循环营养液水培方式培养,营养液选用Hoagland-Anon复合营养液配制,正常供氮营养液组分: KNO₃ 505 mg·L⁻¹、KH₂PO₄ 138 mg·L⁻¹和CaCl₂ 444 mg·L⁻¹;低氮营养液组分: Ca(NO₃)₂·4H₂O 945 mg·L⁻¹、KNO₃ 607 mg·L⁻¹、NH₄H₂PO₄ 115 mg·L⁻¹和NH₄NO₃ 1200 mg·L⁻¹。营养液中微量营养元素组分为: MgSO₄·7H₂O 493 mg·L⁻¹、NaFe-EDTA 40 mg·L⁻¹、H₃BO₃ 2.86 mg·L⁻¹、MnSO₄·4H₂O 2.13 mg·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 0.22 mg·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 0.08 mg·L⁻¹和(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.02 mg·L⁻¹。

首先将种子利用1% NaClO 消毒30 min后,清水冲洗干净,浸泡6~8 h,25 °C催芽过夜。然后选取露白一致的种子,播于培养箱(47 cm×35 cm×11 cm)中水培。水培试验在光照培养箱中完成,按昼夜16 h/8 h给予光照,设置温度为(20±2) °C,湿度为75%。分别以正常供氮和低氮营养液处理,培养28 d后,取材测定。

2.2 田间试验方法

田间试验在上海青浦重固试验基地进行,试验所在地为稻、麦轮作地,土质为壤土,表层20 cm厚土壤有机质含量34.5 g·kg⁻¹,全氮2.42 g·kg⁻¹,速效氮37.35 mg·kg⁻¹。

试验采用裂区设计,主区为氮水平,副区为不同基因型小麦,随机排列,3次重复,每个小区面积为7.5 m,种植密度约保持基本苗为300株·m⁻²,行距为20 cm。正常供氮水平的氮(N)磷(P₂O₅)钾(K₂O)的施用水平分别为14、8和8 kg·ha⁻¹。低氮胁迫处理的氮(N)磷(P₂O₅)钾(K₂O)的施用水平分别为7、8和8 kg·ha⁻¹。小麦生长期病虫害防治同大田管理一致,并确保正常水分供应。小麦2012年10月上旬播种,2013年5月下旬收获,室内考种,分析产量组成和氮素含量。

2.3 分析与测试方法

采自营养液培养和田间试验的小麦植株样品

先后自来水和蒸馏水冲洗干净表面灰尘后, 放在105 °C杀青30 min后, 在70 °C烘干至衡重, 粉碎后, 凯氏法分析氮素含量, 计算氮素累积量。小麦苗期氮素吸收效率以小麦植株氮累积量与培养介质中氮含量的比值进行计算; 生理利用率以小麦植株生物量与氮素累积量的比值进行计算(Shi 等2010)。相对性状值为低氮胁迫性状值与正常供氮性状值的比值。

2.4 数据分析方法

采用Excel 2003和SPSS 软件进行数据统计分析; 采用 t 检验(双侧)进行显著水平($P<0.05$)和极显著水平($P<0.01$)分析。

实验结果

1 低氮溶液培养条件下小麦苗期株高和根长变化特征

正常供氮条件下, 5个不同基因型小麦苗期株高在26.00~31.40 cm之间, 平均为27.68 cm, 株高依次为‘驻74’>‘基44’>‘生14’>‘生11’>‘基62’; 低氮胁迫后, 5个不同基因型小麦苗期株高在18.80~27.13 cm, 平均为22.54 cm, 分别比正常供氮减少12%~29%。其中以‘生11’品种苗期株高低氮胁迫响应相对值最低, 仅为71%, 而以‘生14’苗期株高低氮胁迫响应值相对最高, 达88%。正常供氮条件下, 不

同基因型小麦苗期根长在30.83~39.86 cm之间, 平均为37.81 cm, 依次为‘生11’>‘基62’>‘基44’>‘生14’>‘驻74’; 低氮胁迫后, ‘基62’、‘基44’和‘生14’的根长分别增加23%、4%和3%, 而‘生11’和‘驻74’的根长则减少24%和9%。其中以‘生11’苗期根高低氮胁迫响应相对值最低, 仅为76%, 而以‘基62’株高的低氮胁迫响应值相对最高, 达123%。正常供氮条件下, 不同基因型小麦的苗期根冠比以‘生11’的最高, 达1.68, 而以‘驻74’的最低, 仅为0.98; 低氮胁迫处理后, 5个基因型小麦苗期根冠比均有一定程度的增加, 在1.02~2.31之间, 平均为1.72, 相对根冠比依次为‘基62’>‘基44’>‘生14’>‘生11’>‘驻74’(表1), 分别比正常供氮条件下增加52%、8%、4%、30%和16%, 其中以‘基62’的根冠比低氮胁迫响应相对值最大(152%)。

2 小麦苗期氮素累积量对氮素水平的响应

从表2可以得出, 无论是正常供氮还是低氮胁迫, 5个基因型小麦苗期根的生物量都小于叶。在氮素胁迫条件下, 小麦根的相对干重呈现为‘基62’>‘基44’>‘驻74’>‘生11’>‘生14’的规律; 而叶的相对干重则表现为‘基62’>‘驻74’>‘基44’>‘生14’>‘生11’的规律。低氮胁迫使‘基62’、‘驻74’和‘基44’根的干重分别增加37%、12%和24%, 而使‘生12’和‘生14’根的干重分别降低25%和28%。而

表1 小麦苗期形态指标对低氮胁迫的响应

Table 1 Responses of wheat morphologic parameters to low nitrogen levels stress at seedling stage

指标	种质材料	正常供氮	低氮胁迫	响应相对值/%
株高/cm	‘基62’	26.00±3.04	21.33±1.61	82
	‘生11’	26.37±2.05	18.80±1.23	71
	‘驻74’	31.40±0.53	27.13±2.40	86
	‘基44’	27.93±2.90	21.93±3.16	79
	‘生14’	26.70±2.52	23.50±0.87	88
根长/cm	‘基62’	39.83±3.56	48.83±4.54	123
	‘生11’	44.10±3.80	33.67±4.64	76
	‘驻74’	30.83±1.89	28.00±3.26	91
	‘基44’	38.63±3.63	40.27±2.25	104
	‘生14’	35.67±1.89	36.67±4.62	103
根冠比	‘基62’	1.53±0.22	2.31±0.38	152
	‘生11’	1.68±0.44	1.82±0.14	108
	‘驻74’	0.98±0.07	1.02±0.25	104
	‘基44’	1.44±0.30	1.87±0.39	130
	‘生14’	1.34±0.11	1.56±0.17	116

正常供氮浓度为 $9.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 低氮胁迫浓度为 $0.94 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 响应相对值(%)为小麦不同指标在低氮胁迫和正常供氮条件下百分比。表2和3同此。

表2 水培条件下不同基因型小麦苗期生物量和含氮量对氮水平的响应

Table 2 Responses of biomass and nitrogen contents to low nitrogen stress in different wheat genotypes under hydroponics

参数	种质材料	样品种类	正常供氮	低氮胁迫	响应相对值/%	
生物量/g	‘基62’	根	0.11±0.03	0.14±0.05	137	
		叶	0.30±0.07	0.26±0.09	89	
	‘生11’	根	0.15±0.02	0.11±0.03	75	
		叶	0.41±0.06	0.18±0.04	43	
	‘驻74’	根	0.13±0.05	0.13±0.03	112	
		叶	0.33±0.13	0.22±0.06	75	
	‘基44’	根	0.12±0.04	0.14±0.03	124	
		叶	0.31±0.11	0.21±0.03	74	
	‘生14’	根	0.16±0.03	0.11±0.02	72	
		叶	0.43±0.09	0.23±0.05	56	
	含氮量/g·kg ⁻¹	‘基62’	根	24.84±1.12	42.24±0.18	59
			叶	29.72±6.09	48.33±3.89	61
‘生11’		根	25.59±2.91	39.89±1.71	64	
		叶	28.26±3.23	46.30±2.12	61	
‘驻74’		根	23.47±1.27	41.06±2.16	57	
		叶	27.29±2.50	48.89±2.68	56	
‘基44’		根	24.29±0.92	43.05±1.07	56	
		叶	29.20±2.02	49.87±3.04	59	
‘生14’		根	22.86±0.91	39.99±0.98	57	
		叶	23.51±1.48	45.07±0.98	52	

叶干重的降幅则在11%~57%，低氮胁迫显著降低小麦叶部干物质的积累。正常供氮条件下，小麦叶片氮素平均含量为27.60 g·kg⁻¹，其中以‘基62’的氮素含量最高，达29.72 g·kg⁻¹；以‘生14’氮素含量最低，仅为23.51 g·kg⁻¹。小麦根部氮素平均含量为24.21 g·kg⁻¹，其中以‘生11’根部氮素含量最高，达25.59 g·kg⁻¹；以‘生14’氮素含量最低，仅为22.86 g·kg⁻¹。低氮胁迫后，不同基因型小麦叶片氮素平均含量为47.69 g·kg⁻¹，其中以‘基44’的氮素含量最高，为49.87 g·kg⁻¹，以‘生14’的氮素含量最低，为45.07 g·kg⁻¹；不同基因型小麦根部氮素平均含量为41.25%，其中以‘基44’根部氮素含量最高，为43.05 g·kg⁻¹，而‘生11’的根部氮素含量最低，为39.89 g·kg⁻¹。

不同基因型小麦叶片氮素累积量在正常供氮条件下在14.34~19.02 mg之间，平均为16.68 mg；低氮胁迫处理时，不同基因型小麦叶片氮素累积量在5.04~7.40 mg，平均为6.00 mg，比正常供氮处理时降低了47%~71%。正常供氮条件下，不同基因型小麦根部氮素累积量在4.70~5.79 mg之间，平均为5.50 mg；低氮胁迫处理时，不同基因型小麦叶片氮素累积量在2.58~3.50 mg之间，平均为3.07 mg，比正常供氮处理时降低了20%~58%。

从图1可以看出，不同基因型小麦的氮吸收效率在正常供氮条件下在14%~19%之间，低氮胁迫处理时，氮吸收效率在60%~82%之间，分别是正常供氮水平的5.86、3.16、4.19、4.56和3.21倍。其中以‘基62’的氮素吸收效率增加最大，而‘生14’的氮素吸收效率增加最少。正常供氮条件下，不同基因型小麦的氮素生理利用率在20.9%~23.21%之间，低氮胁迫处理时，氮素生理利用效率显著提高，在36.27%~42.08%之间，分别是正常供氮处理的

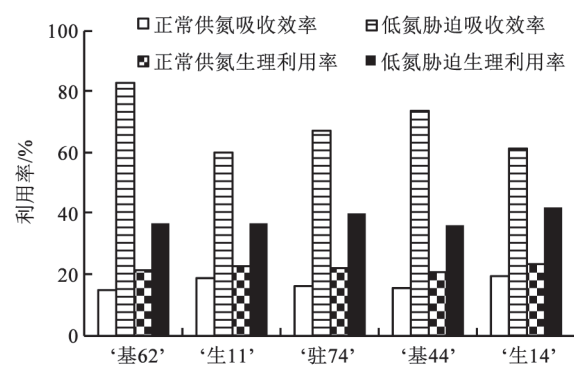


图1 不同基因型小麦的氮吸收效率和生理利用率
Fig.1 Nitrogen absorption efficiency and physiological efficiency in different wheat genotypes

1.63、1.61、1.84、1.74和1.81倍。即低氮胁迫处理显著提高不同基因型小麦的氮素吸收效率和生理利用效率。

3 小麦成熟期株高和产量构成

由表3可知, 不同基因型小麦成熟期株高在81.6~119.0 cm之间, 均值为100.2 cm, 依次为‘驻74’>‘基62’>‘基44’>‘生11’>‘生14’; 低氮胁迫时, 5个不同基因型小麦的株高在64.1~93.0 cm之间, 均值为77.0 cm, 比正常供氮条件下降低23%, 低氮胁迫响应相对值在74%~79%之间。正常供氮条件下, 不同基因型小麦的每株穗数在3.5~6.8之间, 平均为5.5穗·株⁻¹; 低氮胁迫时, 不同基因型小麦的每株有效穗在2.6~4.4之间, 平均为3.5穗·株⁻¹, 比正常供氮时的每株有效穗平均减少36%, 其中以‘基44’的响应相对值最低, 仅为55%, 而以‘驻74’的响应相对值最高, 为80%。正常供氮条件下, 不同基因型小麦的穗长在9.8~14.0 cm之间, 平均为11.6 cm。低氮胁迫处理时, 不同基因型小麦的穗长数在9.4~

13.5 cm之间, 分别比正常供氮时降低了0.8%~7.4%之间, 其中‘生11’和‘驻74’的响应相对值较低, 为71%和74%; 而‘基44’和‘生14’的穗长的响应相对值达116%和138%。正常供氮条件下, 不同基因型小麦的每穗粒数在65.8~87.4之间, 平均为74.3。低氮胁迫处理时, 不同基因型小麦的每穗粒数在63.6~77.6之间, 平均为73.0, 平均比正常供氮条件下降低1.75%。正常供氮条件下, 不同基因型小麦的产量在6.05~7.80 t·ha⁻¹之间, 平均产量为6.60 t·ha⁻¹。低氮胁迫处理时, 不同基因型小麦的产量在1.92~4.92 t·ha⁻¹之间, 均产量为3.23 t·ha⁻¹, 均值比正常供氮条件下降低51.1%。

讨 论

选育低氮条件下具有较高产量潜能和高效利用氮素的作物新品种是降低氮肥使用量提高氮素利用效率, 减少氮素损失的重要途径(Li 等 2012; Masclaux-Daubresse等2010; Richard-Molard等

表3 小麦成熟期株高和产量构成对低氮胁迫的响应

Table 3 Responses of wheat height and yield composition to low nitrogen stress at mature stage

指标	种质材料	正常供氮	低氮胁迫	响应相对值/%
株高/cm	‘基62’	106.2±6.2	82.6±1.1	78
	‘生11’	89.0±6.3	67.2±2.0	75
	‘驻74’	119.0±6.5	93.0±2.3	78
	‘基44’	105.2±6.2	77.9±0.7	74
	‘生14’	81.6±3.7	64.1±1.4	79
有效穗/穗·株 ⁻¹	‘基62’	5.2±2.5	3.2±0.2	63
	‘生11’	3.5±1.2	2.6±0.5	75
	‘驻74’	5.5±2.0	4.4±0.5	80
	‘基44’	6.3±3.2	3.5±0.4	55
	‘生14’	6.8±2.6	4.0±0.5	59
穗长/cm	‘基62’	10.8±1.1	10.6±1.0	98
	‘生11’	14.0±0.7	10.0±0.5	71
	‘驻74’	12.6±0.5	9.4±0.8	74
	‘基44’	10.8±0.8	12.5±0.9	116
	‘生14’	9.8±1.3	13.5±1.2	138
穗粒数/粒·穗 ⁻¹	‘基62’	87.4±2.8	74.8±5.6	86
	‘生11’	73.2±4.3	76.0±4.2	104
	‘驻74’	70.2±6.9	77.6±10.1	111
	‘基44’	75.2±5.4	73.4±13.2	98
	‘生14’	65.8±4.1	63.6±7.4	97
产量/t·ha ⁻¹	‘基62’	6.30±0.37	1.92±0.17	31
	‘生11’	7.80±0.65	3.60±0.26	46
	‘驻74’	6.05±0.40	3.00±0.28	50
	‘基44’	6.22±0.46	2.70±0.21	43
	‘生14’	6.62±0.51	4.92±0.35	74

2008)。小麦苗期生物量(干重)、株高、根冠比等形态指标是影响其产量形成的重要因素。生物量是作物干物质积累的结果,可反映作物的生长发育潜势(陆瑞菊等2014;姚启伦2008)。低氮条件下,水稻苗期生物量显著下降(Shi等2010)。不同氮效率组的株高和单株叶面积等形态学性状均随氮效率值的降低而减小(郭程瑾等2011)。本文的研究结果表明,低氮胁迫处理条件下的小麦的株高降幅12%~29%、叶片干重降幅11%~57%、根冠比增幅4%~52%。这可能与缺氮直接影响植物光合产物的形成和干物质积累有关。低氮胁迫在一定程度上也抑制了小麦地上部及植株整体的生长,但促进了根部生长,提高了根冠比(赵化田等2011),增加其对土壤养分和水分的吸收和干物质积累,有利于产量形成。

作物营养生长阶段氮素含量和氮素积累量是影响籽粒灌浆和产量的重要因素(Shi等2010)。低氮胁迫抑制糯玉米植株的氮素代谢,影响代谢产物的合成,植株吸氮量和可溶性蛋白质含量均下降(姚启伦2008)。低氮胁迫条件下,小麦植株氮含量降低,单株吸氮量在不同品种之间有较大差异(李丹丹等2009)。本文的研究结果表明,低氮胁迫处理后,不同基因型小麦的叶部氮素含量增加,这与植株生物量降低,造成氮素在叶片浓缩有关,但氮素积累量比正常供氮处理时降低了47%~71%,主要与其生物量下降有关。低氮胁迫条件下氮素的吸收效率和生理利用效率均较正常供氮时增加,以‘基62’的氮素吸收效率增加最大,而‘生14’的氮素吸收效率增加最少。这可能与低氮胁迫条件下‘基62’的氮素积累量最高(7.40 mg),而‘生14’的氮素积累量较低有关(5.50 mg)。普晓英等(2011)的研究表明,在低氮胁迫下,大麦苗期氮素利用率的基因型差异确实比较大。这可能与低氮胁迫条件下,植物吸收氮素量下降,硝酸还原酶,谷氨酰胺合成酶等酶的活性降低,氮素同化能力下降,氮素生理利用率降低,减少了氮素累积有关。

作物产量是评价其经济性状的重要参数,而单位面积的穗数,每穗粒数和千粒重等是决定小麦产量的关键因素(李淑文等2006)。向春阳等(2002)的结果表明,与正常施氮处理相比,大部分供试玉米品种在缺氮条件下的籽粒产量均明显下

降,敏感品种下降的幅度大,耐低氮品种下降的幅度小。本文的研究结果显示,相同低氮胁迫处理,‘基62’的产量下降幅度最大,达69%;而‘生14’的产量下降幅度最小,仅为26%。这说明,‘基62’对低氮胁迫比较敏感,而‘生14’对低氮胁迫的耐受性较强。这可能与低氮胁迫条件下,作物生长发育所需的氮素得不到满足,造成生长发育受阻,限制了生殖器官发育和形态建成,最终影响产量形成有关(Li等2012; Shi等2010)。同时,在低氮条件下,作物氮素吸收量减少,氮素积累量降低,植株体内没有充足的氮素累积,进而影响籽粒灌浆和体内物质的转移运输(李宝珍等2007)。在低氮条件下,‘生14’具有较高的相对产量和氮素生理利用率,可作为耐低氮小麦种质,进行氮高效利用相关的生理生化与分子生物学机理研究。

参考文献

- 郭程瑾, 张立军, 崔喜荣, 李淑文, 肖凯(2011). 氮胁迫条件下中国春-代换系小麦苗期耐低氮特征研究. 植物营养与肥料学报, 17 (1): 29~37
- 李宝珍, 辛伟杰, 徐国华(2007). 氮饥饿水稻利用不同形态氮素的差异及其生理机制. 土壤学报, 44 (2): 273~282
- 李丹丹, 田梦雨, 崔昊, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 曹卫星(2009). 小麦苗期耐低氮胁迫的基因型差异. 麦类作物学报, 29 (2): 222~227
- 李淑文, 文宏达, 周彦珍, 李雁鸣, 肖凯(2006). 不同氮效率小麦品种氮素吸收和物质生产特性. 中国农业科学, 39 (10): 1992~2000
- 陆瑞菊, 刘成洪, 何婷, 陈志伟, 徐红卫, 杜志钊, 高润红, 王亦菲, 邹磊, 郭桂梅等(2014). 源于大麦小孢子诱变-氮胁迫培养的DH株系田间耐低氮性表现. 核农学报, 28 (3): 412~417
- 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 张定一(2007). 耐低氮小麦基因型筛选指标的研究. 植物营养与肥料学报, 13 (1): 93~98
- 普晓英, 曾亚文, 杨涛, 杜娟, 杨树明, 赵春艳, 刘国丽(2011). 低氮胁迫对大麦抽穗期的影响. 浙江农业学报, 23 (1): 52~55
- 孙传范, 戴廷波, 荆奇, 姜东, 曹卫星(2004). 小麦品种氮利用效率的评价指标及其氮营养特性的研究. 应用生态学报, 15 (6): 983~987
- 童汉华, 余新桥, 梅捍卫, 曹一平, 章善庆, 罗利军(2007). 水稻苗期氮素营养高效基因型的筛选. 浙江农业科学, 5: 537~541
- 童依平, 李继云, 李振声(1999). 农作物N素利用效率基因型差异及机理. 生态农业研究, 7 (2): 23~27
- 向春阳, 常强, 马兴林, 关义新, 凌碧莹, 张宝石(2002). 玉米不同基因型对氮营养胁迫的反应. 黑龙江八一农垦大学学报, 14 (4): 5~7
- 徐红卫, 王亦菲, 刘成洪, 陈志伟, 杜志钊, 高润红, 郭桂梅, 何婷, 邹磊, 卜妹明等(2013). 大麦氮敏感基因型苗期对氮饥饿的生理响应. 植物生理学报, 49 (11): 1197~1204
- 姚启伦(2008). 糯玉米耐低氮胁迫的苗期生理效应. 安徽农业科学, 36 (19): 7987~7989
- 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣凤(2008). 中

- 国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 45 (5): 915~924
- 张福锁, 马文奇(2000). 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系. 土壤与环境, 9 (2): 154~157
- 赵化田, 王瑞芳, 许云峰, 安调过(2011). 小麦苗期耐低氮基因型的筛选与评价. 中国生态农业学报, 19 (5): 1199~1204
- 朱兆良, 金继运(2013). 保障我国粮食安全的肥料问题. 植物营养与肥料学报, 19 (2): 259~273
- Crawford NM, Glass ADM (1998). Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. Trends Plant Sci, 3 (10): 389~395
- Duan YH, Zhang YL, Ye LT, Fan XR, Xu GH, Shen QR (2007). Responses of rice cultivars with different nitrogen use efficiency to partial nitrate nutrition. Ann Bot, 99: 1153~1160
- Foulkes MJ, Hawkesford MJ, Barraclough PB, Holdsworth MJ, Kerr S, Kightley S, Shewry PR (2009). Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. Field Crops Res, 114: 329~342
- Li BZ, Xin WJ, Sun SB, Shen QR, Xu GH (2006). Physiological and molecular responses of nitrogen-starved rice plants to re-supply of different nitrogen sources. Plant Soil, 287: 145~159
- Li WJ, He P, Jin JY (2012). Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for spring maize in north-east China. J Plant Nutr, 35 (11): 1747~1761
- Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, Chardon F, Gaufichon L, Suzuki A (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. Ann Bot, 105: 1141~1157
- Reynolds M, Foulkes J, Furbank R, Griffiths S, King J, Murchie E, Parry M, Slafer G (2012). Achieving yield gains in wheat. Plant Cell Environ, 35: 1799~1823
- Richard-Molard C, Krapp A, Brun F, Ney B, Daniel-Vedele F, Chailou S (2008). Plant response to nitrate starvation is determined by N storage capacity matched by nitrate uptake capacity in two *Arabidopsis* genotypes. J Exp Bot, 59 (4): 779~791
- Sayer J, Cassman KG (2013). Agricultural innovation to protect the environment. Proc Natl Acad Sci USA, 10 (21): 8345~8348
- Shi WM, Xu WF, Li SM, Zhao XQ, Dong GQ (2010). Responses of two rice cultivars differing in seedling-stage nitrogen use efficiency to growth under low-nitrogen conditions. Plant Soil, 326: 291~302
- Xu GH, Fan XR, Miller AJ (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. Annu Rev Plant Biol, 63: 1~30