

玉米根系特征的基因型差异及与氮吸收效率的关系

屈佳伟, 高聚林, 王志刚, 于晓芳, 胡树平, 孙继颖

(内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019)

摘 要: 在4个硝酸盐浓度下进行2个玉米品种盆栽砂培试验, 研究玉米根系特征的基因型差异对硝酸盐浓度的响应及与氮素吸收效率的关系。结果表明, 氮高效品种郑单958在硝酸盐浓度为0.08、0.8、4.0 mmol/L时, 根重、根幅、根长、根表面积、根体积、分枝数、分形维数、根系活力均显著高于氮低效玉米品种内单314。各根系形态指标随硝酸盐浓度的增加逐渐增加, 当硝酸盐浓度从4.0 mmol/L增加至8.0 mmol/L时, 不同基因型品种间差异不显著。在低氮胁迫条件下, 玉米主要通过增加细根比例、增加根表面积吸收更多的氮素; 在氮素供应充足条件下, 通过增加根系平均直径, 形成高密度的分枝系统吸收氮素。进一步通径分析表明, 根长与根体积对氮吸收效率直接影响最大, 是氮吸收效率差异的主要原因。

关键词: 玉米; 根系; 基因型; 氮素吸收效率

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Genotype Differences in Root Characteristics by Maize and Its Relations to Nitrogen Uptake Efficiency

QU Jia-wei, GAO Ju-lin, WANG Zhi-gang, YU Xiao-fang, HU Shu-ping, SUN Ji-ying
(Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: Two maize hybrids cultivated in pots experiment to reveal genotype differences in root characteristics by maize for the response of nitrate concentration and its relations to nitrogen uptake efficiency at four nitrate levels. The result showed that ZD958, a N efficient variety significantly higher than ND314, a N inefficient variety in root dry weight, root extent, root length, root surface, root volume, NO. of branches, fractal dimension and root vigour at three nitrate concentrations(0.08, 0.8, 4.0 mmol/L). Each index of root morphology gradually increased with the increase of nitrate concentration, when nitrate concentrate from 4.0 mmol/L increased to 8.0 mmol/L, the difference was not significant. Under the condition of nitrogen supply, maize in order to uptake more nitrogen by increasing root mean diameter and forming density branches system. Path analysis showed that root length and root volume had the largest influence on nitrogen uptake efficiency. Thus, Nitrogen efficient varieties of total root length, root volume was significantly higher than that of nitrogen inefficient varieties, that was a major cause of nitrogen uptake efficiency differences.

Key words: Maize; Root; Genotype; Nitrogen uptake efficiency

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 国家粮食丰产科技工程(2011BAD16B13, 2012BAD04B04, 2013BAD07B04, 2011BAD16B14)、国家自然科学基金项目(31260300)、国家玉米产业技术体系(CARS-02-63)

作者简介: 屈佳伟(1988-), 女, 博士, 主要从事玉米生理生态的研究。E-mail: nmqujiawei@163.com

高聚林为本文通讯作者。E-mail: nmgaojulin@163.com

世界上大量的氮肥投入, 大大提高了禾谷类作物的产量, 然而氮肥的平均利用率仅为33%^[1]。提高氮肥利用率是减少农田氮肥损失的重要途径。近年来, 关于氮肥利用效率的研究主要集中在氮效率与根系吸收的单一过程^[2, 3]。由于田间根系的不可观察性所带来的困难, 对根系形态和功能的研究不够深入, 根系的形态特征对于氮效率的作用不能得到更好地揭示。然而, 不论植株生长在低氮量还是高氮量供应条件下, 氮效率的差异都有相应的变化^[4~6]。

明确根系形态特征与氮效率的关系,不仅可以在生产上提高产量和氮肥利用率,减少氮素淋溶,还可以为氮高效玉米品种的选育提供理论依据。

玉米根系构型存在明显的基因型差异^[7],吸氮量与根系大小密切相关,根系形态的基因型差异与氮效率也具有密切联系^[8]。根系形态决定玉米获取资源(水和营养物质)的能力,根长密度和根系直径是最常见的评价参数^[9]。姜琳琳^[10]采用水培试验,在一定氮素范围内,供氮量的增加能够促进玉米地上部的生长,也促进根系干重的增加,而高量供氮会抑制根系的生长,导致根冠比下降。目前关于不同基因型玉米品种的根系生长和构型的研究很多,氮高效品种根系具有较高的根系活力和分枝系统^[11]。彭云峰^[12]以玉米自交系478(氮高效)与Wu312(氮低效)为材料进行研究,结果表明,氮高效自交系(478)的种子根和每一轮节根长度、根系形态以及根系在土壤空间中的分布均优于氮低效自交系(Wu312)。春亮^[13]等以氮效率不同的4个玉米杂交种(组合)为材料,研究在两个氮水平下根系大小与氮素累积及产量形成方面的相互关系。王敬锋^[14]研究表明,开花后氮高效玉米品种根系干重、根冠比、根系活力显著高于氮低效玉米品种,与氮素累积显著相关,施氮条件下优势更明显。

前人研究主要集中在不同基因型玉米品种根系形态的差异,在与氮素吸收、产量的关系上只做了简单的相关分析,对于根系形态指标与氮素吸收并没有明确主次关系。玉米苗期是感受外界刺激最敏感的时期,因此,本研究通过盆栽试验,对两个玉米品种进行不同硝酸盐浓度处理,揭示两个玉米品种苗期根系特征对氮素响应的基因型差异,并将根系特征指标与氮吸收效率做逐步回归分析,建立氮素吸收效率与根系各指标的线性回归方程。苗期吸收效率可能是决定氮效率的主要因子,因此,通过苗期根系形态和生理指标预测根系氮素吸收效率,为氮高效品种的选育及预测苗期氮肥吸收量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

玉米品种为郑单958(ZD958)和内单314(ND314),这两个品种自2010年以来,经过田间验证,品种表现氮吸收效率差异较明显,前者为氮高效品种,后者为氮低效品种^[15,16]。

1.2 试验设计

试验于2013年在内蒙古农业大学科技园区蒙

西试验站温室大棚内进行。挑选饱满并且大小一致的玉米种子在10%的H₂O₂表面消毒20 min,然后在饱和CaSO₄溶液中浸泡6 h,再将种子放在饱和CaSO₄浸透的纱布上,覆以黑色塑料膜并于25℃下催芽2 d,种子“露白”后便可将种子移至盛有4 kg石英砂的塑料盆(盆口直径19.5 cm、盆底直径15.5 cm、盆高20.0 cm)中。每个盆中均在盆底有小孔,并用黑塑料膜包在盆的外壁和盖在石英砂表面,以便遮光。每盆种4粒发芽的种子,在生长至3叶时将病、弱苗去除,每盆2株。每2~3 d加1次营养液。开始时为全营养液,植株2叶1心时用不同浓度的硝酸盐营养液处理,设4个硝酸盐浓度梯度,分别为0.08、0.8、4.0、8.0 mmol/L NO₃⁻。所缺的Ca用CaCl₂补齐。每个处理5次重复,各处理持续20 d,至4叶1心时收获整株。营养液pH值为6.0(用1 mol/L的NaOH溶液调节)。营养液组成(mmol/L):Ca(NO₃)₂ 2.0, K₂SO₄ 0.75, MgSO₄ 0.65, KCl 0.1, KH₂PO₄ 0.25, H₃BO₃ 1×10⁻³, MnSO₄ 1×10⁻³, CuSO₄ 1×10⁻³, ZnSO₄ 1×10⁻³, (NH₄)₆Mo₇O₂₄ 5×10⁻⁶, Fe-EDTA 0.15。

1.3 测定项目与方法

取样方法:将植株分为茎叶和根。茎叶部分直接在70℃下烘48 h,后称重。将植株的根系连同石英砂砾(土壤)全部浸入水中,使大部分石英砂(土壤)与根系分离,剩余的沙砾再用水冲洗,保持完整的根系,洗净后,-18℃下保存。根系部分先进行根系性状测定,然后烘干、称重。

根系活力测定:采用TTC还原法。

根系测定方法:将整株根系放在扫描仪盘上,平铺扫描根系二维图像,利用基于图像处理方法开发出的程序系统(万深LA-S系列图像分析系统)进行分析,根长等形态指标可以将其分成小部分后,分别扫描,直至将全部根系扫描完毕。扫描后获得的图像经分析程序处理得到总根长、根表面积、根体积、分枝数、根系平均直径等数据。

植株全氮含量测定:采用凯氏定氮法。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS统计软件对数据进行方差分析、LSD多重比较检验、逐步回归分析以及通径分析。

2 结果与分析

2.1 玉米植株生物量与根幅

两个玉米品种根干重和茎叶干重随硝酸盐浓度的增加逐渐增加,且品种间差异达到极显著水平($p=0.01$),均为氮高效品种ZD958显著高于氮低效品种ND314(表1),两个品种根冠比的变化随施氮量的增

加先增加后降低,均在4.0 mmol/L时达最大,说明两个品种随硝酸盐浓度的增加其根系增加的速度低于茎叶增加的速度,氮高效品种ZD958根冠比高于氮低效品种ND314,差异不显著。

根幅表示根系在地下横向扩展的幅度,ZD958

在低硝酸盐浓度下根幅最大,以吸收更多的氮素;增加硝酸盐浓度,根幅降低,且浓度在0.8~8.0 mmol/L时,根幅差异不显著。ND314根幅显著低于ZD958,且各硝酸盐浓度之间差异不显著,这是品种的基因型差异所致。

表 1 不同硝酸盐浓度下根干重、茎叶干重、根冠比和根幅的变化

Table 1 The change of root dry weight, shoot dry weight, root/shoot and root extent in different nitrate concentrations

硝酸盐浓度(mmol/L) Nitrate concentration	根干重(g) Root dry weight		茎叶干重(g) Shoot dry weight		根冠比 Root/shoot		根幅(cm) Root extent	
	ZD958	ND314	ZD958	ND314	ZD958	ND314	ZD958	ND314
0.08	0.13 d	0.11 c	0.14 c	0.12 d	0.90 a	0.87 a	7.33 a	4.67 a
0.8	0.17 c	0.15 b	0.17 b	0.15 c	1.02 a	1.00 a	6.00 b	4.83 a
4.0	0.20 b	0.18 a	0.19 b	0.18 b	1.05 a	1.04 a	5.33 b	5.17 a
8.0	0.23 a	0.21 a	0.26 a	0.24 a	0.89 a	0.88 a	5.50 b	5.00 a
变异来源								
品 种	26.732**		22.935**		0.361 ^{ns}		22.781**	
硝酸盐浓度	38.400**		30.855**		1.567		2.281	
品种×硝酸盐	2.289		0.073		0.044		5.531**	

注:每列不同字母表示差异显著($p<0.05$),**表示差异极显著($p<0.01$),*表示差异显著($p<0.05$)。下表同。

Note: Means within each column followed by different letters are declared to be different($p<0.05$) by the ANOVA protected least significant difference(LSD) test. ** means significant at $p<0.01$, * means significant at $p<0.05$. The same below.

2.2 玉米总根长和各径级根长及所占比例

由表2可知,ZD958总根长随硝酸盐浓度的增加呈指数增加的趋势,硝酸盐浓度从0.08 mmol/L增加到0.8 mmol/L时总根长迅速增加,增幅为48.22%,差异显著;硝酸盐浓度从0.8 mmol/L增加到4.0 mmol/L时总根长增幅为34.96%,差异显著;硝酸盐浓度从4.0 mmol/L增加到8.0 mmol/L时总根长增幅为3.36%,差异不显著。ND314总根长变化趋势和方

差分析结果与ZD958相似,从低浓度到高浓度,根长的增幅分别为59.95%、25.64%和7.85%,硝酸盐浓度从0.8 mmol/L增加到4.0 mmol/L时总根长增幅小于ZD958。两个品种在不同硝酸盐浓度供应下,根长均表现在0.1~0.2 mm径级内最大,其次是0.2~0.5 mm径级内的根长,在>1.5 mm径级内的根长最小,两个品种间的基因型差异主要体现在0~0.5 mm径级内的根长。

表 2 不同硝酸盐浓度下总根长和各径级根长的变化

Table 2 Total length and the root length of different root diameter in different nitrate concentrations

品 种 Hybrid	硝酸盐浓度 (mmol/L) Nitrate concentration	总根长(cm) Total root length	不同径级根长(cm) The root length of different root diameter					
			0~0.1 mm	0.1~0.2 mm	0.2~0.5 mm	0.5~1 mm	1~1.5 mm	>1.5 mm
ZD958	0.08	810.61 c	160.04 c	272.07 d	180.02 d	145.02 b	30.62 b	22.84 a
	0.8	1201.48 b	177.72 bc	528.29 c	281.06 c	215.99 a	33.87 b	11.22 a
	4.0	1621.46 a	274.07 a	753.31 a	368.86 b	178.69 b	29.32 b	17.21 a
	8.0	1675.98 a	203.07 b	686.09 b	482.73 a	229.96 a	55.03 a	19.10 a
ND314	0.08	630.24 c	113.56 b	222.28 c	166.90 b	102.50 c	15.45 b	9.55 ab
	0.8	1008.10 b	158.29 a	442.99 b	203.86 b	176.11 b	19.56 b	7.30 b
	4.0	1266.57 a	169.79 a	484.21 ab	350.86 a	210.27 a	31.40 a	20.08 a
	8.0	1365.97 a	168.91 a	514.48 a	429.15 a	197.89 ab	40.92 a	14.61 ab

注:通过方差分析LSD检测,每一列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。下表同。

Note: Means within a column followed by different letters are declared to be different ($p<0.05$) by the ANOVA protected least significant difference (LSD) test. The same below.

两个品种在0~0.2 mm 径级内根长分布比例最大,随硝酸盐浓度的增加均呈先升高后降低的趋势,ZD958的峰值为63.36%,出现在硝酸盐浓度为4.0 mmol/L;ND314的峰值为59.64%,出现在硝酸盐浓度为0.8 mmol/L。说明在适宜的硝酸盐浓度内,随浓度的增加细根分布比例增加;超过一定浓度,细根分布比例降低,氮高效品种高于氮低效品种。在

0.2~0.5 mm 径级内,根长分布比例随硝酸盐浓度的增加呈波浪式增加,ND314 高于ZD958。

2.3 根系形态指标

根系形态的分形维数直接反映根系在不同环境影响下发育程度的差异,分形维数越高,根系越发达,分枝越多;相对小的分形维数反映出根系的分生能力相对较弱。

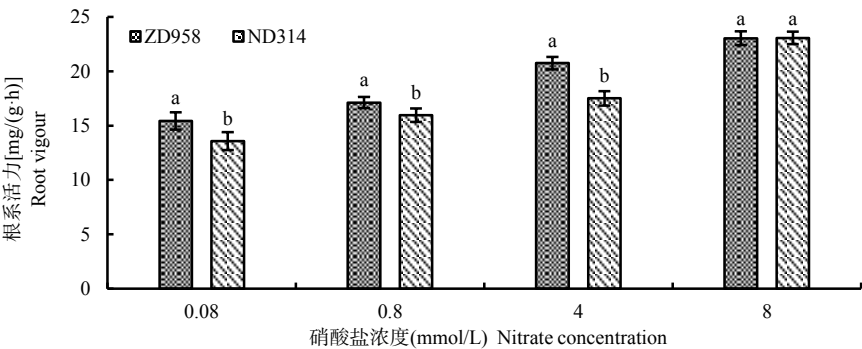
表3 不同硝酸盐浓度下的根系形态变化
Table 3 The change of root morphology in different nitrate concentrations

品 种	硝酸盐浓度(mmol/L)	根表面积(cm ²)	根体积(cm ³)	根平均直径(μm)	分枝数	分形维数
Hybrid	Nitrate concentration	Root surface	Root volume	Root mean diameter	NO. of branches	Fractal dimension
ZD958	0.08	102.70 c	5.37 c	290.27 c	348 c	1.62 c
	0.8	144.91 b	6.43 b	306.40 bc	502 b	1.65 b
	4.0	177.12 a	7.63 a	328.72 b	659 a	1.69 a
	8.0	188.86 a	7.91 a	353.80 a	682 a	1.72 a
ND314	0.08	92.76 c	4.03 c	348.29 cd	245 c	1.58 c
	0.8	111.57 b	5.21 b	360.37 bc	481 b	1.62 b
	4.0	142.41 a	6.41 a	375.89 ab	513 a	1.65 a
	8.0	166.42 a	7.00 a	393.22 a	532 a	1.67 a
变异来源						
品 种		183.422**	212.410**	93.251**	406.522*	73.335**
硝酸盐浓度		361.809**	239.217**	200.960**	739.112**	89.073**
品种×硝酸盐		9.638**	1.385 ^{ns}	10.629**	0.607	1.381

由表3可知,根表面积、根体积,分枝数和分形维数均表现为ZD958显著高于ND314,且各指标随硝酸盐浓度增加逐渐增加。ZD958在硝酸盐浓度从0.08 mmol/L 增加到4.0 mmol/L 时,根表面积、根体积、分枝数和分形维数显著增加;硝酸盐浓度从4.0 mmol/L 增加到8.0 mmol/L 时,差异不显著,说明硝酸盐浓度超过4.0 mmol/L,对于根表面积、根体积、分枝数和分形维数的增幅不显著。ND314随硝

酸盐的增加,其变化与ZD958 表现一致。根系平均直径随硝酸盐浓度的变化,两个品种变化一致,硝酸盐浓度在0.08 mmol/L 和0.8 mmol/L 时,差异不显著,硝酸盐浓度增加到4.0 mmol/L 时,差异显著,说明在低硝酸盐浓度时主要通过细根增加表面积来提高氮素吸收量,高浓度时通过增加根系直径快速吸收氮素,氮高效品种低于氮低效品种。

2.4 根系活力



注:通过方差分析LSD检测,不同字母表示差异显著(p<0.05)。下同。
Note: Means within different letters were declared to be different(p<0.05) by the ANOVA protected least significant difference(LSD) test. The same below.

图1 不同硝酸盐浓度下的根系活力变化
Fig.1 The change of root vigor in different nitrate concentrations

根系是活跃的吸收器官和合成器官,根的生长情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,根系活力是衡量根系功能的主要指标之一。两个品种的根系活力随硝酸盐浓度的增加逐渐增加,在浓度为0.08~4.0 mmol/L时,ZD958的根系活力显著高于ND314;当硝酸盐浓度大于

4.0 mmol/L,两个品种间差异逐渐减小;在0.08 mmol/L硝酸盐浓度的胁迫下,ZD958根系活力比ND314高13.71%;硝酸盐浓度为8.0 mmol/L时,两个品种根系活力几乎无差异,说明只有在氮素不足的条件下,氮高效品种根系活力的优势明显(图1)。

2.5 单株氮素吸收量

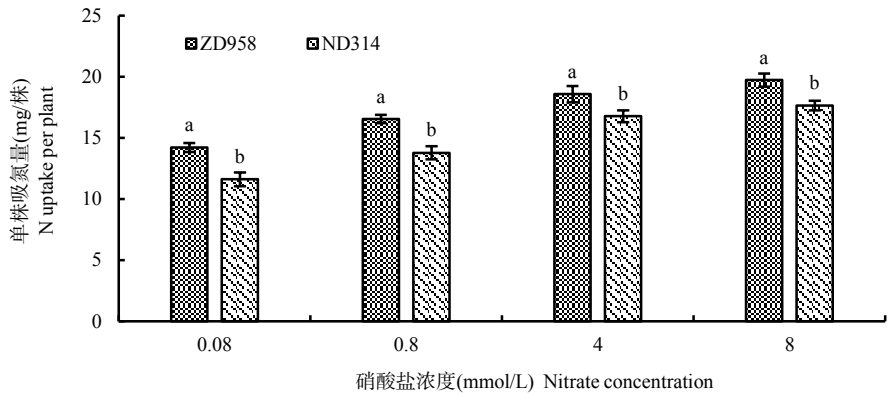


图2 不同硝酸盐浓度下单株氮素吸收量的变化

Fig.2 The change of nitrogen uptake per plant in different nitrate concentrations

由图2可知,随硝酸盐浓度的增加,两个玉米品种单株氮素吸收量显著增加,硝酸盐浓度为0.08~4.0 mmol/L,ZD958比ND314分别高22.42%、20.12%、10.78%,说明在低氮条件下,两个品种的单株氮素吸收量随硝酸盐浓度的增加,基因型差异逐渐减小。硝酸盐浓度从4.0 mmol/L增加到8.0 mmol/L时,氮素吸收量差异不显著,ZD958的单株氮素吸收量比ND314高11.81%,与硝酸盐浓度4.0 mmol/L时相

差不多。说明在高氮条件下,随硝酸盐浓度的增加,ND314单株氮素吸收速率高于ZD958,大于4.0 mmol/L时趋于稳定。

2.6 氮吸收效率与根系形态生理指标之间的关系

研究表明,植株氮素积累与根系生长密切相关。氮吸收量与根长、分形维数、根系活力、根表面积、根体积、分枝数、根重呈极显著相关,与根系平均直径相关性不显著(表4)。

表4 单株氮吸收量与根系指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis between single plant nitrogen uptake and index of root

指 标	氮吸收量	根 长	分形维数	根系活力	根表面积	根体积	根系直径	分枝数	根 重
Index	Nitrogen uptake	Root length	Fractal dimension	Root vigour	Root surface	Root volume	Root mean diameter	NO. of branches	Root weight
氮吸收量	1.000								
根长	0.936**	1.000							
分形维数	0.943**	0.953**	1.000						
根系活力	0.853**	0.882**	0.863**	1.000					
根表面积	0.940**	0.978**	0.944**	0.921**	1.000				
根体积	0.952**	0.956**	0.954**	0.873**	0.959**	1.000			
根系平均直径	0.174	0.232	0.215	0.362	0.254	0.169	1.000		
分枝数	0.898**	0.967**	0.933**	0.827**	0.926**	0.941**	0.207	1.000	
根重	0.904**	0.901**	0.925**	0.767**	0.882**	0.890**	0.201	0.918**	1.000

注:**表示相关性在0.01水平上显著。
Note: ** meant significant correlation at (p=0.01).

氮效率是植物对氮的吸收效率和利用效率的综合反映,苗期根系吸氮量可作为根系氮吸收效率的

指示^[17]。单株吸氮量表示氮素吸收效率,选取与氮素吸收有关的根长(X1)、分形维数(X2)、根系活力

(X3)、根表面积(X4)、根体积(X5)、平均直径(X6)、分枝数(X7)、根重(X8)等8项指标,氮吸收效率为因变量Y,通过逐步回归建立回归方程如下:

$$Y=-3.609+0.004X_1+5.420X_2+0.041X_3-0.008X_4+1.291X_5-0.002X_6-0.010X_7+23.554X_8$$

此回归方程Durbin-Watson统计量d=2.623。通过逐步回归结果,筛选出通径分析指标并将其做通径分析见表5。各变量直接作用排序为X5>X1>X7>X8>X2>X3,其中,X7是负值,说明根长、分形维数、

根系活力、根体积和根重对氮素的吸收效率影响最大,是正相关;X3直接作用很小,但是它通过X1和X5的间接作用很大;X7的直接作用是负作用,通过X1和X3的间接作用很大,且是正作用。说明这些根系指标与氮吸收量呈正相关,有的是直接正相关,有的是通过其他指标的间接作用实现,因此,根系活力、分枝数、分形维数与氮吸收量的显著正相关主要通过根长和根体积间接实现。

表5 氮吸收效率与根系指标的通径分析
Table 5 Path analysis on the relationship between nitrogen uptake efficiency and root index

因子 Factor	→X1	→X2	→X3	→X5	→X7	→X8
X1	0.547	0.081	0.047	0.581	-0.521	0.305
X2	0.521	0.085	0.046	0.580	-0.503	0.314
X3	0.482	0.073	0.053	0.531	-0.445	0.260
X5	0.523	0.081	0.046	0.608	-0.507	0.302
X7	0.529	0.079	0.044	0.572	-0.539	0.311
X8	0.493	0.079	0.041	0.541	-0.495	0.339

3 结论与讨论

氮高效品种在硝酸盐浓度为0.08、0.8、4.0 mmol/L时,根重、根幅、根长、根表面积、根体积、分枝数、分形维数、根系活力均显著高于氮低效玉米品种。各根系形态指标随硝酸盐浓度的增加逐渐增加,当硝酸盐浓度从4.0 mmol/L增加到8.0 mmol/L时,差异不显著,说明4.0 mmol/L是两个品种的最适硝酸盐浓度。在8.0 mmol/L的高浓度硝酸盐处理下,根系的平均直径较大,根系的分枝多,分形维数达最大。在0.08 mmol/L的硝酸盐胁迫条件下,根系生长受抑制,0~0.2 mm径级内细根比例较高浓度硝酸盐细根比例大,说明在低氮胁迫条件下,玉米主要通过增加细根比例,增加根表面积吸收更多的氮素;在氮素供应充足条件下,通过增加根系平均直径,形成高密度的分枝系统吸收氮素。

根系是作物氮素吸收的主要器官,在很多条件下控制和影响整个植株的生长发育^[18],氮素吸收依赖于两个方面,一是根系大小,二是根系吸收性能。短期氮素供应不足导致光合产物向根中分配比例增加,从而导致根冠比的增加^[19~23]。本研究表明,持续20 d氮素胁迫,根冠比不会增加,当增加氮素供应,根系和地上部干重均会增加,并且根冠比增加;当氮素供应过量时,根冠比下降。氮素供应对根系形态的影响远比生物量的变化要复杂^[24]。玉米根系形态

对氮素供应的反应主要表现在氮素供应不足条件下,玉米根的伸长受促进,根系变长,这一特性有利于扩展整体根系所占据的空间,从而提高土壤中氮素的空间有效性。介质中氮素浓度过高,会显著抑制根系的伸长。郭亚芬^[25]研究表明,当外界NO₃⁻浓度超过5 mmol/L时,氮低效自交系Wu312胚根的侧根数量急剧下降。对于氮高效自交系478,当局部和整体NO₃⁻供应超过15 mmol/L时,胚根上的侧根数量才开始下降。本研究中的氮高效品种ZD958,在硝酸盐浓度高于4.0 mmol/L时,0~0.2 mm径级内的根系所占比例下降,侧根生长受到抑制;氮低效品种ND314在氮浓度高于0.8 mmol/L时,0~0.2 mm径级内的根系所占比例下降,说明氮高效品种对于NO₃⁻刺激的反应能力要强于氮低效品种。王艳研究表明,总氮量与根干重和根长的相关分析,在低氮水平下,总氮量与根系干重和根长表现为极显著线性相关;在高氮下,相关性较差。本研究将根系形态指标和生理指标等8项指标与氮素吸收效率做通径分析,结果表明,根长、根体积对氮吸收效率的直接作用较大,其他指标通过根长、根体积的间接作用较强。

参考文献:

[1] William R R, John B S, Gordon V J, et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(6): 815-820.

- [2] Fageria N K, Baligar V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 89: 97–185.
- [3] Hirel B, Le Gouis J, Ney B. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58: 2369–2387.
- [4] Bertin P, Gallais A. Genetic variation for nitrogen use efficiency in a set of recombinant maize inbred lines I. agrophysiological results[J]. *Maydica*, 2000, 45: 53–66.
- [5] Bertin P, Gallais A. Genetic variation for nitrogen use efficiency in a set of recombinant inbred lines II – QTL detection and coincidences [J]. *Maydica*, 2001, 46: 53–68.
- [6] Coque M, Gallais A. Genomic regions involved in response to grain yield selection at high and low nitrogen fertilization in maize[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2006, 112: 1205–1220.
- [7] Wiesler F, Horst W J. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions[J]. *Plant Soil*, 1994, 163: 267–277.
- [8] 王 艳, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J]. *生态学报*, 2003, 23(2): 297–302.
Wang Y, Mi G H, Chen F J, et al. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 297–302. (in Chinese)
- [9] Clarke J M, Townley-Smith T F. Drying rates of spring triticale compared to wheat[J]. *Agron. J.*, 1984, 76: 454–456.
- [10] 姜琳琳, 韩丽思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 247–253.
Jiang L L, Han L S, Han X R, et al. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedling[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2011, 17(1): 247–253. (in Chinese)
- [11] Lynch J P, Van B J. Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes[J]. *Crop Sci.*, 1993, 33: 1253–1257.
- [12] 彭云峰, 张吴平, 李春俭. 不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异的比较: 模拟与应用[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 843–853.
Peng Y F, Zhang W P, Li C J. Relationship between nitrogen efficiency and root architecture of maize plants: simulation and application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 843–853. (in Chinese)
- [13] 春 亮, 陈范骏, 张福锁, 等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 615–619.
Chun L, Chen F J, Zhang F S, et al. Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(5): 615–619. (in Chinese)
- [14] 王敬锋, 刘 鹏, 赵炳强, 等. 不同基因型玉米根系特征与氮素吸收利用的差异[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(4): 699–707.
Wang J F, Liu P, Zhao B Q, et al. Comparison of root characteristics and nitrogen uptake and use efficiency in different corn genotypes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(4): 699–707. (in Chinese)
- [15] 崔 超, 高聚林, 于晓芳, 等. 不同氮效率基因型高产春玉米花粒期干物质与氮素运移特性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1337–1345.
Cui C, Gao J L, Yu X F, et al. Dry matter accumulation and nitrogen migration of high-yielding spring maize for different nitrogen efficiency in the flowering and milking stages[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2013, 19(6): 1337–1345. (in Chinese)
- [16] 崔文芳, 王俊超, 高书晶, 等. 不同氮水平下超高产玉米品种的产量性状分析[J]. *河南农业科学*, 2012, 4(9): 35–38.
Cui W F, Wang J C, Gao S J, et al. Correlation analyses on yield traits of maize hybrids with high yield potential at different nitrogen levels[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 4(9): 35–38. (in Chinese)
- [17] 李素梅, 施卫明. 不同氮形态对两种基因型水稻根系形态及氮吸收效率的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 589–593.
Li S M, Shi W M. Different nitrogen forms on the two genotypes of rice root morphology and the influence of nitrogen uptake efficiency [J]. *Soils*, 2007, 39(4): 589–593. (in Chinese)
- [18] Fageria N K, Baligar V C, Clark R, B. Physiology of crop production [J]. Binghamton: Haworth Press Inc., 2006: 23–59.
- [19] Pan W L, Jackson W A, Moll R H. Nitrate uptake and partitioning by corn (*Zea mays* L.) root systems and associated morphological differences among genotypes and stages of root development[J]. *J. Exp. Bot.*, 1985, 36: 1341–1351.
- [20] Feil B, Thiraporn R, Geisler G, et al. Root traits of maize seedlings—indicators of nitrogen efficiency[J]. *Plant Soil*, 1990, 123: 155–159.
- [21] Eghball B, Maranville J W. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and nitrogen stresses[J]. *Agron J.*, 1993, 85: 147–152.
- [22] Barber S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach [M]. New York: Wiley, 1995, 2: 414–415.
- [23] Gaudin A C M, McClymont S A, Holmes B M, et al. Novel temporal, fine-scale and growth variation phenotypes in roots of adult-stage maize (*Zea mays* L.) in response to low nitrogen stress[J]. *Plant Cell Environ*, 2011, 34: 2122–2137.
- [24] 米国华, 陈范骏, 吴秋平, 等. 玉米高效吸收氮素的理想根构型[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(12): 1112–1116.
Mi G H, Chen F J, Wu Q P, et al. Ideal root architecture of maize on nitrogen uptake efficiency[J]. *Chinese Science: Life Sciences*, 2010, 40(12): 1112–1116. (in Chinese)
- [25] 郭亚芬, 米国华, 陈范骏, 等. 局部供应硝酸盐诱导玉米侧根生长的基因型差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(2): 155–159.
Guo Y F, Mi G H, Chen F J, et al. Genotypic difference of maize lateral roots in response to local nitrate supply[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(2): 155–159. (in Chinese)

(责任编辑: 姜媛媛)