

不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应

张定一^{1,3} 张永清² 杨武德³ 苗果园³

(¹ 山西省农业科学院小麦研究所, 山西临汾 041000; ² 山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041004; ³ 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801)

摘要: 采用溶液培养法, 研究了不同基因型春小麦(加春 1、2、4 号)根系对低氮胁迫的生物学响应、苗期氮素吸收、分配的基因型差异以及与根系形态之间的相关关系。结果表明, 在低氮胁迫下, 小麦的根重、根长、根条数、根系总吸收面积与活性吸收面积、根系活力均明显降低, 但不同基因型间差异明显, 加春 2 号根系具有较好的形态学与生理学性状, 根重、根长、根总吸收面积与活性吸收面积、根系活力的下降幅度明显低于其他 2 个基因型, 地上部氮累积量占总氮量的百分率比其他 2 个基因型分别高 7.6% 和 8.2%, 氮的利用率也分别高 8.0% 和 9.9%, 差异达显著水平。加春 2 号比其他 2 个基因型更能适应低氮环境胁迫。在低氮胁迫下, 春小麦根重、根总长度、根系活力、根系总吸收面积及活性吸收面积与总吸氮量呈显著线性相关, 而在高氮水平下无相关关系, 表明在氮素胁迫条件下, 根系形态对氮吸收率起重要作用。

关键词: 春小麦; 低氮胁迫; 根系; 生物学响应

中图分类号: S512

Biological Response of Roots in Different Spring Wheat Genotypes to Low Nitrogen Stress

ZHANG Ding-Yi^{1,3}, ZHANG Yong-Qing², YANG Wu-De³ and MIAO Guo-Yun³

(¹ Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen 041000, Shanxi; ² College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi; ³ College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

Abstract: Three spring wheat cultivars, Robin, Gzandin and Quantum, were used to compare the different responses of root systems in total N uptake, N partition between shoot and root, and its relationship with morphological and physiological characters of root system to low nitrogen stress with solution culture. The results showed that compared with the control group, the spring wheat seedlings under low nitrogen stress were lower in root dry weight and shorter in root length. And the root number, total absorbing area and efficient absorbing area, and root activity were decreased drastically. But the responses of different genotypes varied greatly. Under low nitrogen stress, Gzandin's root system had better morphological and physiological characters, its root weight, root length, root activity, root total absorbing area and efficient absorbing area were lower than those of other 2 cultivars, meanwhile, its nitrogen percentage of shoots to whole plant was increased by 7.6% and 8.2%, and its utilization ratio of nitrogen was also increased by 8.0% and 9.9% compared with the other two genotypes. Therefore, Gzandin was more suitable to growing under low nitrogen stress. The total nitrogen uptake was correlated linearly with dry weight, length, activity, total absorbing area and efficient absorbing area in roots under low nitrogen. On the contrary, the correlation between them was not so obvious under high nitrogen. It shows that the morphological form of roots plays a very important role in nitrogen uptake under nitrogen stress.

Key words: Spring wheat (*Triticum aestivum* L.); Low nitrogen stress; Root system; Biological response

土壤氮匮乏、氮肥利用率低是限制作物产量进一步提高的重要因素。提高氮素吸收效率不仅有利于增加产量和降低成本, 而且可以减少因大量施肥

而带来的环境污染等负面影响。对于磷等在土壤中不易移动的元素而言, 根系形态对其吸收的影响远大于作物吸收系统的作用; 而对于氮等在土壤中比较容

易移动的元素而言,其吸收系统对于养分的获取可能是一个关键的因素。但在氮浓度极低的情况下,根系的形态特征对作物吸收氮素起决定作用^[1-4]。因此选用根系发达、吸氮力强的作物种类和品种,利用作物固有的生物学特性,挖掘作物自身对土壤氮素的高效利用潜力具有重要的实际意义。有研究表明,在逆境条件下,植物能够感应外界胁迫,并通过自身调节系统使之在生理和形态上发生适应反应,以增强在胁迫条件下的生存机会^[4-10],而且不同作物及同一作物的不同品种对逆境的适应性有很大的差异^[9]。关于小麦根系对缺氮胁迫的反应以及不同类型的小麦根系对氮肥形态及缺磷胁迫的反应已有不少报道^[4,6,11],但将不同基因型与缺氮胁迫联系在一起的研究尚不多见。本试验研究了不同基因型小麦根系对缺氮胁迫的生物学响应,旨在探索耐低氮小麦品种基因型与小麦根系形态及生理、生化指标的相关性,为耐低氮小麦品种的选育及栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验在山西农业大学农学院黄土高原作物研究所温室内进行,供试春小麦品种为加拿大春麦,在当地试种3年后筛选出的3个品种,分别为加春1号(Robin)、加春2号(Gzandin)和加春4号(Quantum)。选取饱满、均匀的小麦种子,经0.1%升汞消毒10 min,去离子水冲洗并浸泡24 h后,均匀摆放在铺有滤纸的培养皿中,于(25±2)℃光照培养箱中培养,每天用去离子水浇灌。5 d后选择生长势一致的健壮

幼苗,去胚乳后移入pH 6.5左右的营养液培养。水培容器为30 cm×40 cm长方形聚乙烯塑料盘,每盘装水6 L,每品种每盘20株,定时通气,每周更换一次营养液。基本培养液为Hoagland营养液,低氮胁迫处理(N-)氮浓度为0.04 mmol/L,对照(高氮,N+)处理氮浓度为4 mmol/L。每处理重复10次。胁迫30 d后收获。

1.2 测试指标与方法

收获的样品用蒸馏水冲洗干净后,各重复随机取样,每项目取2株,其余样品用于形态指标调查及干重和养分含量的测定。根长的测定采用水盘网格法^[6],将待测根放在铺有网格坐标纸并盛有少量水的长方形平盘中,用镊子小心地将根分开,仔细量取每条根的长度。根系活力、根系丙二醛(MDA)含量、植物氮含量、根系表面积与活性表面积测定分别采用TTC法^[12]、硫代巴比妥酸法^[13]、凯氏定氮法和甲烯蓝吸附法^[12]。试验数据采用DPS数据分析软件统计分析并进行新复极差多重比较。

2 结果与分析

2.1 低氮胁迫对不同基因型春小麦幼苗生长的影响

表1结果表明,低氮胁迫下小麦的株高、叶面积、地上干重及含氮量均明显降低,但不同基因型的下降幅度不同,以加春2号的下降幅度最小,叶面积及地上干重分别下降了48.3%和43.6%。加春4号的下降幅度最大,分别为58.3%和61.1%。说明加春2号比其他2个基因型更能忍耐低氮环境,而加春4号则对缺氮反应更为敏感。

表1 不同氮水平下各小麦基因型株高、叶面积、地上干重及氮含量

Table 1 Plant height, leaf area, dry weight of shoot and N content of wheat genotypes under different N levels

处理 Treatment	品种 Cultivar	株高 Plant height(cm)	叶面积 Leaf area(cm ² /plant)	茎叶干重 Shoot DW(mg/plant)	含氮量 N content(%)
N+(CK)	加春1号 Robin	35.12±1.12 B	33.72±0.78 B	161.2±1.82 B	4.17±0.12 B
	加春2号 Gzandin	37.73±1.33 A	34.37±1.03 AB	159.7±1.92 B	4.32±0.10 D
	加春4号 Quantum	34.03±1.12 B	34.88±0.92 A	167.3±2.06 A	4.01±0.20 A
N-	加春1号 Robin	25.19±1.99 D	15.08±0.95 D	68.36±3.82 D	1.74±0.08 D
	加春2号 Gzandin	28.32±1.83 C	17.78±0.89 C	89.96±5.10 C	1.70±0.07 C
	加春4号 Quantum	26.84±1.37 CD	14.55±0.94 D	65.01±3.15 D	1.72±0.06 D
(N+)-(N-)	加春1号 Robin	9.93±2.67 A	18.64±1.28 B	92.84±3.30 B	2.43±0.18 A
	加春2号 Gzandin	9.41±2.46 AB	16.59±1.27 C	69.78±5.39 C	2.63±0.14 A
	加春4号 Quantum	7.19±1.89 B	20.33±0.95 A	102.30±3.86 A	2.29±0.23 B

注:N+和N-分别代表培养液中氮浓度为4 mmol/L和0.04 mmol/L;表内数据以平均值±标准误表示;同一处理栏中不同字母表示差异达1%显著水平。下同。

Notes: N+ and N- indicate nitrogen contents of 4 mmol/L and 0.04 mmol/L in Hoagland's solution respectively. Data are mean±SE. Values followed by a different capital letter with in the same column are significantly different at 1% probability level. The same below.

2.2 低氮胁迫对不同基因型春小麦根系形态的影响

由表2可以看出,供氮水平对小麦根系的生长有明显的影。与对照相比,小麦的根冠比在低氮胁迫

下明显升高,而根重、总根长及根数均明显降低,但不同基因型增减的幅度不同,加春2号小麦的根重及总根长下降幅度极显著地高于其他基因型。比较不同

氮水平下不同基因型小麦的根系形态变化特征,可见高氮水平下不同品种间的差异不如低氮水平下明显,说明虽然小麦根系的形态学特征是由基因型与环境因素共同决定的,但小麦品种间氮效率的差异在氮的

供应受到限制时更能表现出来。尤其值得注意的是加春2号的根重、总根数、总根长、最大根长及根冠比在正常情况下并不是最高,但在低氮胁迫下却表现最好,表明加春2号根系对低氮胁迫的适应性最强。

表2 不同氮水平下各小麦品种单株根系形态指标及根冠比
Table 2 Root morphological indices and root to shoot ratio of wheat genotype under different N levels

处理 Treatment	品种 Cultivar	根干重 Root DW (mg/plant)	总根长 Total root length (cm/plant)	最大根长 Max. length of root (cm)	总根数 Root number	根冠比 Root/shoot ratio
N+ (CK)	加春1号 Robin	66.7 ± 2.9 A	280.3 ± 20 A	37.77 ± 2.89 C	12.8 ± 1.32 A	0.41 ± 0.01 B
	加春2号 Gzandin	54.6 ± 2.0 B	248.9 ± 19 B	42.81 ± 3.89 B	10.6 ± 1.26 B	0.34 ± 0.01 C
	加春4号 Quantum	64.0 ± 2.2 A	262.8 ± 21 AB	36.92 ± 2.23 BC	13.4 ± 1.90 A	0.38 ± 0.01 BC
N-	加春1号 Robin	38.8 ± 4.02 D	177.9 ± 16 D	48.14 ± 3.85 A	8.9 ± 0.99 B	0.57 ± 0.09 A
	加春2号 Gzandin	47.9 ± 3.68 C	221.9 ± 12 C	50.72 ± 2.65 A	9.8 ± 1.32 B	0.53 ± 0.04 A
	加春4号 Quantum	34.5 ± 3.25 E	147.6 ± 12 E	32.16 ± 3.31 D	9.6 ± 1.43 B	0.53 ± 0.06 A
(N+) - (N-)	加春1号 Robin	27.9 ± 5.25 A	102.4 ± 23 A	-10.4 ± 4.84 B	3.9 ± 1.60 A	-0.16 ± 0.09 A
	加春2号 Gzandin	6.64 ± 2.79 B	27.0 ± 14 B	-7.91 ± 2.28 B	0.8 ± 0.79 B	-0.19 ± 0.04 A
	加春4号 Quantum	29.4 ± 4.25 A	115.2 ± 23 A	4.76 ± 3.26 A	3.8 ± 5.9 A	-0.15 ± 0.07 A

2.3 低氮胁迫对不同基因型春小麦根系生理特征的影响

表3结果表明,低氮胁迫下小麦根系的总吸收面积、活性吸收面积及根活力均明显降低,但不同基因型之间的下降幅度差异明显。正常情况下,加春

2号的总吸收面积和活性吸收面积与加春4号相差不大,但明显低于加春1号;在低氮胁迫下,加春2号却极显著高于其他2个基因型,并且其根系活性吸收面积及根系活力的下降幅度也显著低于其他品种,表现出对低氮胁迫的较强适应性。

表3 不同氮水平下各小麦品种的根系活力及根系吸收面积
Table 3 Root activity and uptake area of wheat genotypes under different N levels

处理 Treatment	品种 Cultivar	总吸收面积 Total uptake area (m ² /plant)	活性吸收面积 Active uptake area (m ² /plant)	活性面积百分数 Active/total (%)	根系活力 Root activity (μg/g)
N+ (CK)	加春1号 Robin	0.21 ± 0.006 A	0.09 ± 0.004 A	43.50 ± 2.29 A	129.4 ± 2.66 A
	加春2号 Gzandin	0.20 ± 0.004 B	0.07 ± 0.006 B	33.95 ± 2.99 B	117.6 ± 4.95 B
	加春4号 Quantum	0.20 ± 0.006 AB	0.07 ± 0.003 B	34.46 ± 1.41 B	120.2 ± 2.71 B
N-	加春1号 Robin	0.16 ± 0.008 D	0.06 ± 0.004 C	36.34 ± 1.86 B	86.1 ± 3.96 D
	加春2号 Gzandin	0.18 ± 0.009 C	0.06 ± 0.004 BC	35.82 ± 1.47 B	97.1 ± 2.47 C
	加春4号 Quantum	0.14 ± 0.008 E	0.05 ± 0.006 D	33.94 ± 3.99 B	77.9 ± 4.83 E
(N+) - (N-)	加春1号 Robin	0.054 ± 0.004 A	0.035 ± 0.006 A	7.16 ± 2.72 A	43.32 ± 5.69 A
	加春2号 Gzandin	0.015 ± 0.002 B	0.012 ± 0.005 B	-1.88 ± 0.94 B	20.50 ± 6.78 B
	加春4号 Quantum	0.060 ± 0.009 A	0.022 ± 0.008 A	0.52 ± 2.86 AB	42.34 ± 3.71 A

大量研究表明,逆境胁迫下植物细胞的膜脂过氧化程度加重,MDA含量是其重要指标^[14]。由图1可以看出,低氮胁迫下小麦根系的MDA含量均明显增加,但存在基因型差异,加春2号的升幅显著低于其他2个品种,再次表明其在低氮胁迫下根系细胞膜脂过氧化程度较轻,具有较强耐低氮胁迫的性能。

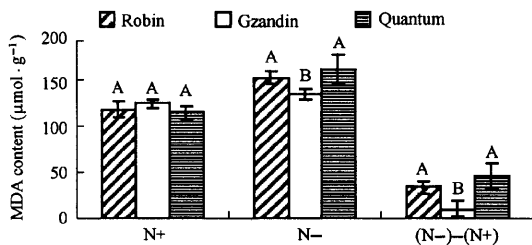


图1 不同氮水平下各小麦基因型根系MDA含量
Fig.1 Differences in MDA content of wheat genotypes under different N levels

2.4 不同基因型小麦氮吸收率与运转率

由表4可知,加春2号植株在供试的2种氮浓度下都具有较高的吸氮能力,在正常供氮条件下其植株总吸氮量比加春1号和4号增加幅度较小,差异没有达到显著水平;在低氮胁迫下,则分别比加春1号和4号高出19.3%和25.9%,差异达极显著水平,表明其对低氮环境有更强的适应性。

表4结果表明,在低氮胁迫下,各供试品种氮的运转率普遍下降且不同基因型间降幅不同。加春2号的运转率仍有56%,分别比加春1号和4号高出7.6%和8.2%,差异达显著水平。与正常供氮相比,其降幅仅为27%,而加春1号和4号地上运转率分别为52%和51%,降幅分别高达31%和30.5%。

表4 不同氮水平下各小麦基因型氮吸收率与转运率
Table 4 Uptake and transfer efficiency of N of wheat genotypes under different N levels

处理 Treatment	品种 Cultivar	地上部吸 N 量 Shoot N uptake (mg/plant)	根系吸 N 量 Root N uptake (mg/plant)	总吸 N 量 Plant N uptake (mg/plant)	地上部吸 N 百分数 Shoot N/plant N (%)
N + (CK)	加春 1 号 Robin	6.72 ± 0.15 A	2.18 ± 0.05 A	8.90 ± 0.15 A	75.52 ± 0.65 A
	加春 2 号 Gzandin	6.91 ± 0.16 A	2.03 ± 0.14 B	8.93 ± 0.28 A	77.32 ± 0.97 A
	加春 4 号 Quantum	6.71 ± 0.31 A	2.17 ± 0.10 A	8.88 ± 0.37 A	75.55 ± 0.83 A
N -	加春 1 号 Robin	1.19 ± 0.10 C	1.09 ± 0.02 D	2.28 ± 0.11 C	52.16 ± 2.04 C
	加春 2 号 Gzandin	1.53 ± 0.12 B	1.19 ± 0.04 C	2.72 ± 0.14 B	56.13 ± 1.76 B
	加春 4 号 Quantum	1.12 ± 0.08 C	1.04 ± 0.05 D	2.16 ± 0.10 C	51.87 ± 1.79 C
(N +) - (N -)	加春 1 号 Robin	5.53 ± 0.21 A	1.09 ± 0.05 A	6.62 ± 0.20 A	23.36 ± 0.40 A
	加春 2 号 Gzandin	5.38 ± 0.17 A	0.84 ± 0.12 B	6.22 ± 0.24 B	21.19 ± 0.91 B
	加春 4 号 Quantum	5.59 ± 0.33 A	1.13 ± 0.09 A	6.76 ± 0.37 A	23.69 ± 0.39 A

2.5 不同基因型小麦的氮利用效率

由表 5 可以看出,低氮胁迫下氮的利用效率均显著增加,但不同品种的增加程度明显不同,加春 2 号的增加幅度最大,其根系及整个植株的氮利用效率的增加量均显著高于另 2 个品种。在正常供氮情况下,不同基因型间氮吸收利用效率相差不大,但在低氮胁迫下,差异明显,尤其是根系氮吸收效率,差

异达极显著水平。加春 2 号的氮利用效率在正常处理情况下并不是最高,但在低氮胁迫下却明显高于其他 2 个基因型。由表 5 还可以看出,在正常情况下氮吸收效率和运转效率较高的加春 2 号,其氮利用效率却不是最高,表现出了吸收与利用的不一致性。但在低氮胁迫下,氮的吸收效率、运转效率与利用效率表现出了明显的一致性。

表5 不同氮水平下各小麦基因型氮利用效率
Table 5 N utilization efficiency of wheat genotypes under different N levels (mg/mg N)

处理 Treatment	品种 Cultivar	地上部氮利用效率 Shoot N utilization efficiency	根系氮利用效率 Root N utilization efficiency	植株氮利用效率 Plant N utilization efficiency
N + (CK)	加春 1 号 Robin	23.99 ± 0.66 B	30.62 ± 1.39 CD	25.61 ± 0.77 CD
	加春 2 号 Gzandin	23.14 ± 0.51 B	27.06 ± 2.46 E	24.01 ± 0.86 D
	加春 4 号 Quantum	24.98 ± 1.27 B	29.55 ± 2.11 DE	26.09 ± 1.37 C
N -	加春 1 号 Robin	57.51 ± 2.57 A	35.60 ± 3.98 B	47.02 ± 1.85 B
	加春 2 号 Gzandin	59.05 ± 2.42 A	40.27 ± 2.60 A	50.76 ± 1.05 A
	加春 4 号 Quantum	58.15 ± 2.27 A	33.31 ± 3.19 BC	46.19 ± 1.68 B
(N -) - (N +)	加春 1 号 Robin	33.52 ± 3.04 A	4.98 ± 3.71 B	21.41 ± 2.21 B
	加春 2 号 Gzandin	33.95 ± 2.65 A	13.22 ± 3.14 A	26.75 ± 1.58 A
	加春 4 号 Quantum	33.17 ± 3.01 A	3.76 ± 2.16 B	20.10 ± 2.26 B

2.6 总吸氮量与根系形态指标的相关性

为了探明春小麦根系形态指标对其吸氮量的影响,进行了相关分析,由图 2 ~ 图 6 可以看出,在低氮胁迫条件下,小麦根重、总根长、根活力、总吸收面积及活性吸收面积与小麦总吸氮量间呈正相关,相关系数分别为 0.783、0.809、0.831、0.713 和 0.799 ($r_{0.05} = 0.456$),均达显著水平,而在高氮条件下呈负相关,相关系数分别为 0.202、0.110、0.097、0.057 和

0.131,均未达显著水平,说明当介质中氮素供应充足时,小麦根系的大小并不是氮素吸收的限制因子,而在低氮情况下小麦幼苗氮的吸收直接与根系的大小相关。这一方面揭示了根系对环境的适应与平衡调节能力,同时也表明并不是投能越多越有利于器官的合理建成。适时适量地控制能量投入,人为制造适度胁迫,既有利于促进根系自我调节能力的增加,也有利于肥料利用率的提高。

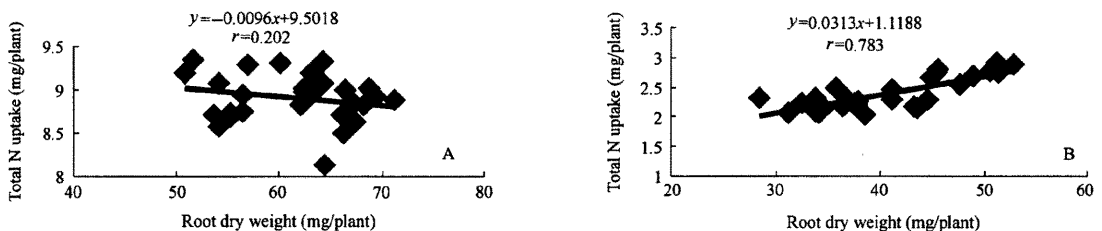


图2 高氮(A)与低氮(B)条件下小麦总氮量与根系干重相关性
Fig. 2 Correlation between total N uptake and root dry weight under high(A) and low(B) N applications

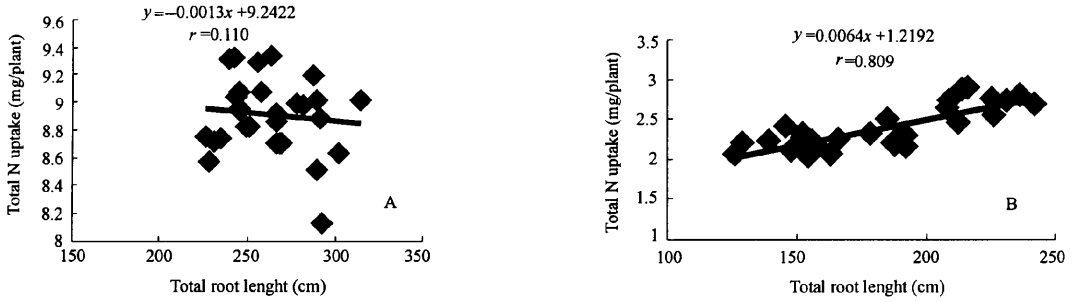


图3 高氮(A)与低氮(B)条件下小麦总氮量与总根长的相关性
Fig.3 Correlation between total N uptake and root total length under high(A) and low(B) N applications

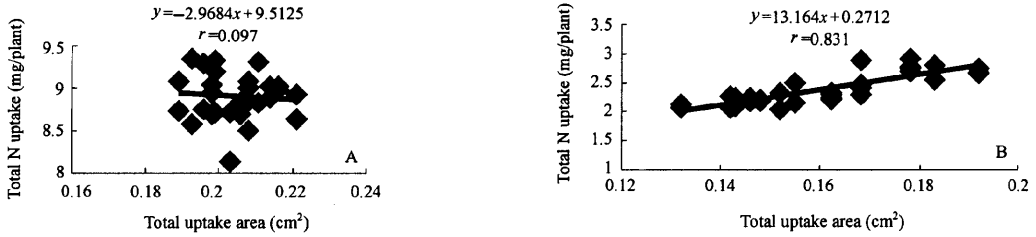


图4 高氮(A)与低氮(B)条件下小麦总氮量与总吸收面积的相关性
Fig.4 Correlation between total N uptake and total uptake area under high(A) and low(B) N applications

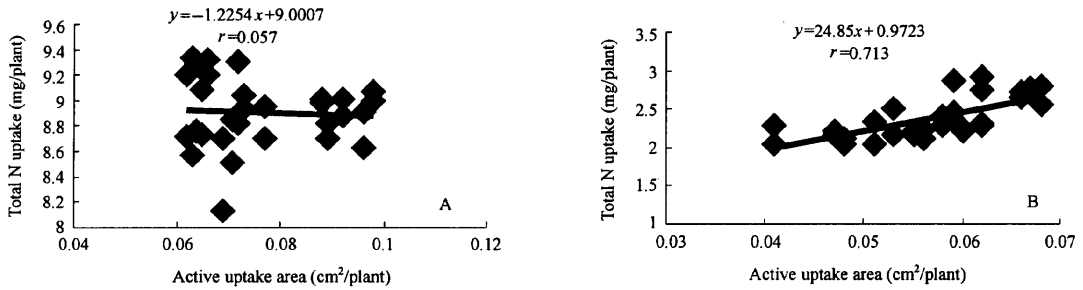


图5 高氮(A)与低氮(B)条件下小麦总氮量与活性吸收面积的相关性
Fig.5 Correlation between total N uptake and active uptake area under high(A) and low(B) N applications

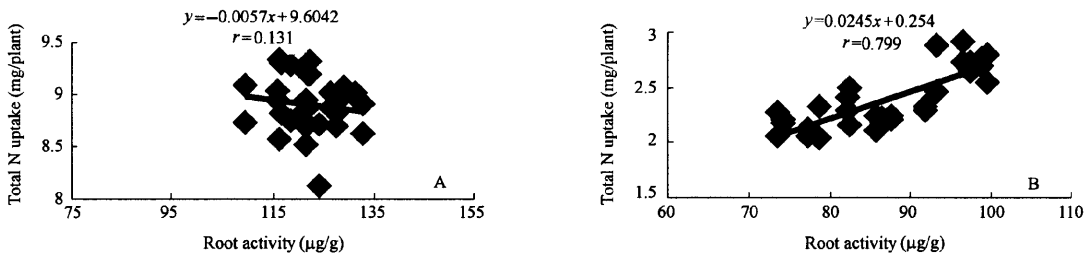


图6 高氮(A)与低氮(B)条件下小麦总氮量与根系活力的相关性
Fig.6 Correlation between total N uptake and root activity under high(A) and low(B) N applications

3 讨论

3.1 增加氮素供应对根系生长影响的研究结果不尽相同,其效果取决于多种因素^[6],但一般认为提高氮素水平对地上部生长的促进作用远大于根系^[5]。因此,在低氮环境下生长的作物总量表现为根冠比

增加^[5,15],这是作物对缺氮的一种适应性反应。在农作物整个生长周期中氮不可能始终保持较高的浓度^[1],尤其是在表层土壤中硝态氮被耗尽的情况下,亚表层中高的根长密度对作物后期的生长变的尤为重要,这种情况下,氮的吸收取决于根系在该土层中的分布和通过扩散移动到根表的硝酸盐数量^[4,15]。

本试验表明,加春2号小麦在低氮胁迫下根重、根长、根活力、根吸收面积均明显高于其他2个品种,因此,其吸氮量高,生物量也高,对低氮胁迫的适应性最强,属耐低氮基因型。

3.2 孙海国等对低磷胁迫下小麦根系的研究结果表明,在高磷水平下不同基因型小麦的根系形态与生理变化特征差异较小,而在低磷胁迫下差异明显加大,说明小麦根系的形态学特征是由基因型与环境因素共同决定的^[16]。本试验结果表明小麦根系对氮的反应也有类似特点,小麦品种间氮效率的差异在氮的供应受到限制时更能表现出来。低氮胁迫下小麦根系的干重、数量、总根长、总吸收面积及活性吸收面积均明显降低,但不同小麦基因型对低氮胁迫的敏感性不同。低氮胁迫下根重、总根长、根系总吸收面积、根系活性吸收面积及根系MDA含量的下降幅度均可用作小麦早期筛选氮高效品种的参考指标。

3.3 氮素吸收与根系形态指标相关性的研究表明,低氮胁迫下,根系干重、总根长与总吸氮量表现为显著的正相关关系,而在高氮条件下没有相关性^[4]。本研究也表明,在高氮条件下,众多根系生长指标呈弱化和不敏感状态,并以此来调节和降低氮素的过量吸收,而在氮胁迫条件下,小麦苗期根系的形态与生理活性直接与氮效率相关,对氮素的高效吸收具有重要的作用。此3个小麦基因型在氮效率上的差异,很大程度上取决于根系形态的差异及其对低氮胁迫的不同生理生化反应。此结果暗示,适当的氮素胁迫有利于小麦苗期根系形态的建成,也有利于氮素的高效利用,这对实施节能化与节约化栽培具有一定的理论指导意义。

References

- [1] Sattelmacher B, Gerendas J, Thoms K. Interaction between root growth and mineral nutrition. *Environ Exp Bot*, 1993, 33(1): 63-73
- [2] Sattelmacher B, Walwer J H, Heiko C B. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. *Z Pflanzenernahr Bodenkd*, 1994, 157: 215-244
- [3] Mengel K. Response of various crop species and cultivars to fertilizer. *Plant Soil*, 1983, 72: 305-319
- [4] Wang Y(王艳), Mi G-H(米国华), Chen F-J(陈范骏), Zhang F-S(张福锁). Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 2003, 23(2): 297-302(in Chinese with English abstract)
- [5] Ren S-J(任书杰), Zhang L-M(张雷明), Zhang S-Q(张岁岐), Shangguan Z-P(上官周平). The effect of nitrogen nutrition on coordinate growth of root and shoot of winter wheat. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*(西北植物学报), 2003, 23(3): 395-400(in Chinese with English abstract)
- [6] Zhai B-N(翟丙年), Sun C-M(孙春梅), Wang J-R(王俊儒), Li S-X(李生秀). Effects of nitrogen deficiency on the growth and development of winter wheat roots. *Acta Agron Sin*(作物学报), 2003, 29(6): 913-918(in Chinese with English abstract)
- [7] Zou C-Q(邹春琴), Li Z-S(李振声), Li J-Y(李继云). Study on difference in morphological and physiological characters of wheat varieties to potassium. *Plant Nutr Fert Sci*(植物营养与肥料学报), 2001, 7(1): 36-43(in Chinese with English abstract)
- [8] Wang J-A(王姣爱), Zhang D-Y(张定一), Jia W-L(贾文兰), Liang Q-Y(梁青燕). Variation in response of wheat genotypes to potassium. *J Triticeae Crops*(麦类作物学报), 2000, 20(3): 35-39(in Chinese with English abstract)
- [9] Itoh S, Barber S A. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agron J*, 1983, 75: 457-461
- [10] Li Y-Y(李秧秧), Shao M-A(邵明安). Physio-ecological response of spring wheat root to water and nitrogen. *Plant Nutr Fert Sci*(植物营养与肥料学报), 2000, 6(4): 383-388(in Chinese with English abstract)
- [11] Ma X-M(马新明), Wang Z-Q(王志强), Wang X-C(王小纯), Wang S-L(王书丽). Effects of nitrogen forms on roots and N fertilizer efficiency of different wheat cultivars with specialized end-uses. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 2004, 15(4): 655-658(in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang Z-L(张志良). Laboratory Guides of Plant Physiology(植物生理学实验指导). Beijing: Higher Education Press, 1992. pp 88-93(in Chinese)
- [13] Wang A-G(王爱国), Luo G-H(罗广华), Shao C-B(邵从本). Research on superoxide dismutase of soybean seed. *Acta Phytophysiol Sin*(植物生理学报), 1983, 9(1): 77-84(in Chinese with English abstract)
- [14] Yang Q(杨晴), Li Y-M(李雁鸣), Xiao K(肖凯). Effect of different amount of nitrogen on flag leaf senescence and yield components of wheat. *J Hebei Agric Univ*(河北农业大学学报), 2002, 25(4): 20-24(in Chinese with English abstract)
- [15] Bettina S, Marschner E H. Effect of varied soil nitrogen supply on Norway spruce. *Plant Soil*, 1996, 184: 291-298
- [16] Sun H-G(孙海国), Zhang F-S(张福锁), Yang J-F(杨军芳). Characteristics of root system of wheat seedlings and their relative grain yield *Acta Agric Boreali-Sin*(华北农学报), 2001, 16(3): 98-104(in Chinese with English abstract)