

## 小麦苗期性状与耐低氮性的遗传相关分析

胡成梅 连盈 程鹏飞 牛胤全 陈耀宇 闫慧姝 史雨刚  
王曙光 范华 孙黛珍\*

(山西农业大学 农学院,山西 太谷 030801)

**摘要** 为研究小麦苗期性状与耐低氮性的遗传相关性,利用24份小麦品种,采用水培的方法,在低氮(0.4 mol/L)和正常氮(4 mmol/L)条件下,测定四叶期株高(PH)、根长(RL)和根条数(RN)等23个氮效率相关指标,利用各指标耐低氮指数进行主成分分析,采用隶属函数法计算综合评价值( $D$ ),通过系统聚类筛选耐低氮品种;同时联合分析氮效率相关性状遗传相关系数与遗传力确定育种中间接选择性状指标。结果表明:1)24个小麦品种被分为耐低氮型、中间型和低氮敏感型三类;其中耐低氮型品种包括长武89(1)3-4、安85中124-1、单R8093、平阳348和昌乐5号;低氮敏感型包括早选12、白齐麦、烟农19号、陕225-9、晋麦33和中大91-品9;其余13个品种属于中间型。2)低氮胁迫条件下(分蘖数)TN、(叶宽)LW、(根鲜重)RFW、(茎叶鲜重)SFW、(植株总鲜重)PFW、(茎叶氮素积累量)SNA、(植株氮素积累量)PNA与耐低氮性综合评价值( $D$ )之间的遗传相关、环境相关及表型相关均达到显著或极显著水平,正常氮处理下(叶面积)LA和(茎叶干重)SDW与 $D$ 值之间的遗传相关、环境相关及表型相关均达到显著或极显著水平。3)在育种过程中,低氮条件下选择LW、RFW和PFW等性状;而正常供氮条件下选择LA、(植株总干重)PDW和(根氮素积累量)RNA等性状可以对小麦耐低氮性的选择取得较好的效果,选择效率较高。

**关键词** 小麦;耐低氮性;遗传相关;遗传力;综合评价值

中图分类号 S512.1

文章编号 1007-4333(2019)04-0011-12

文献标志码 A

## Genetic correlation analysis between characters and low nitrogen tolerance of wheat at seedling stage

HU Chengmei, LIAN Ying, CHENG Pengfei, NIU Yinquan, CHEN Yaoyu, YAN Huishu,  
SHI Yugang, WANG Shuguang, FAN Hua, SUN Daizhen\*

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract** In order to study the genetic correlation between the characteristics of wheat and its resistance to low nitrogen at seedling stage, 24 wheat varieties were cultured in water under the conditions of low nitrogen (0.4 mmol/L) and normal nitrogen (4 mmol/L), respectively. At four-leaf stage, twenty-three nitrogen efficiency indexes, such as plant height (PH), root length (RL) and root number (RN) were measured. The low nitrogen tolerance indexes were used for principal component analysis, and the comprehensive evaluation value ( $D$ ) was calculated by membership function method. Low nitrogen tolerance varieties were screened by systematic clustering. At the same time, the genetic correlation coefficient and heritability of nitrogen efficiency related traits were combined to determine the index of intermediate selection traits in breeding. The results showed that: 1) The 24 wheat varieties were divided into three types, e. g. low-nitrogen, middle and low-nitrogen-sensitive. The varieties with low nitrogen tolerance included Changwu89 (1) 3-4, an 85 zhong 124-1, ShanR8093, Pingyang348 and Changle5. Low nitrogen sensitive types included Hanxuan12, Baiqimai, Yannong19, Shan225, Jinmai33 and Zhongda91-pin9. And 13 other varieties belong to

收稿日期: 2019-07-16

基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX0800917B);山西省重点研发计划项目(201703D211007-6,201703D211007-4,201803D221018-1)

第一作者: 胡成梅, 硕士研究生, E-mail: 18392253101@163.com

通讯作者: 孙黛珍, 教授, 主要从事作物分子育种研究, E-mail: sdz64@126.com

intermediate type. 2) Under low nitrogen stress (Tiller number) TN, (Leaf width.) LW, (Root fresh weight) RFW, (Straw fresh weight) SFW, (Plant fresh weight) PFW, (Shoot nitrogen accumulation) SNA, (Plant nitrogen accumulation) PNA and low nitrogen tolerance comprehensive evaluation value ( $D$ ) genetic correlation, environmental correlation and phenotypic correlation reached significant or extremely significant level. The genetic correlation, environmental correlation and phenotypic correlation between (Leaf area) LA and (Straw dry weight) SDW and  $D$  value under normal nitrogen treatment were significant or extremely significant. 3) In the breeding process, LW, RFW and PFW traits were selected under low nitrogen condition; Under the condition of normal nitrogen supply, the selection of LA, (Plant dry weight) PDW and (Root nitrogen accumulation) RNA showed better effect on the selection of low nitrogen tolerance of wheat, and the selection efficiency was higher.

**Keywords** wheat; low nitrogen tolerance; genetic correlation; heritability; comprehensive evaluation value

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<sup>[1]</sup>。近年来,为了追求作物高产,氮肥的施用量越来越高,产量却增加缓慢。过量施用氮肥和利用率低下不仅造成了巨大的资源浪费,粮食生产成本增加,同时对环境造成巨大影响<sup>[2-3]</sup>,因此,挖掘作物自身氮素高效利用的潜力,选育具有氮高效利用的品种,是提高作物氮素高效利用的重要手段。

目前,关于氮高效利用品种评价指标的研究,不同研究者报道不同。裴雪霞等<sup>[4]</sup>通过变异系数的大小选择相对植株干重值作为小麦苗期氮高效评价指标;李丹丹等<sup>[5]</sup>利用温室水培方法,研究不同年代的32个小麦品种在低氮胁迫下,通过相关性分析,将植株氮积累量和地上干重的耐性指数作为小麦苗期氮效率评价指标;杜保见等<sup>[6]</sup>通过变异系数的大小将叶面积作为小麦苗期氮高效评价指标。显然,这些研究都是通过单一指标来评价品种对低氮胁迫的抗耐性。然而,小麦的耐低氮性是一个极其复杂的综合性状,任何单一的指标都无法全面准确反映低氮胁迫对小麦的影响,因此有学者提出综合评价指标<sup>[7]</sup>,即利用多个指标转化为一个能够反映综合耐低氮性的指标进行评价。

小麦育种中,利用间接选择指标性状可以提早选出目标个体,从而提高育种效率。关于间接选择指标,史华伟等<sup>[8]</sup>研究认为,在春小麦抗旱育种中通过遗传力与遗传相关系数联合分析,选择主穗小穗数、穗粒数和小区产量其选择效率较高;卢娟等<sup>[9]</sup>通过遗传力与遗传相关系数联合分析,发现穗粒数、每小穗粒数、千粒质量对小麦产量的选择效率较高;然而关于耐低氮性的间接选择指标性状的研究很少,这在很大程度上限制了耐低氮型品种的选育。因此,寻找容易识别、方便测量且遗传力和遗传相关性较高的形态指标或生理指

标是非常有必要的。

本研究采用苗期营养液水培的方法,以24份不同小麦品种为供试材料,利用综合评价研究不同基因型小麦耐低氮性的差异,同时对小麦氮素利用效率相关性状的遗传力与其综合评价进行遗传相关分析,并对有关性状作为耐低氮潜力的间接选择指标进行探讨,旨在筛选具有耐低氮潜力的基因型及有关性状,为小麦耐低氮利用机理研究奠定基础及耐低氮育种提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

本试验选用24份不同基因型的小麦品种,编号和名称见表1。

### 1.2 试验方法

本试验采用营养液水培的方法,营养液参考Hoagland营养液<sup>[10]</sup>。设置低氮LN(1/10×N)和正常氮CK(1×N)2个处理,每个处理重复3次。2018年9月26日—10月30日,试验在山西农业大学农学试验站温室中进行。营养液氮浓度处理为:低氮(0.4 mmol/L),正常氮(4 mmol/L),其他营养成分均为正常营养液浓度(表2)。

每个品种挑选100粒颗粒饱满的种子,经1% NaClO对其消毒灭菌10 min,用去离子水冲洗干净,30℃浸种9 h,25℃催芽过夜。挑选60粒露白的种子,整齐的摆放于铺有滤纸的培养皿中。7 d后挑选长势一致的幼苗,去除胚乳后移栽到育苗盘中,每处理设置6穴,每穴3株,2个处理3个重复共36株。然后放入盛有1/2浓度营养液的周转箱(71 cm×45 cm×18 cm)中,缓苗2 d后换上正常处理营养液,每隔5 d更换一次营养液,每天补充水分,用0.1 mmol/L HCl和NaOH调节pH至5.5左右。培养4周后,进行指标性状的测定。

表1 24份供试小麦材料

Table 1 Twenty-four wheat materials tested in this experiment

编号 Code	名称 Name	编号 Code	名称 Name
1	SALGEMMA	13	安85中124-1 An85zhong124-1
2	白齐麦 Baiqimai	14	北京10号 Beijing10
3	沧州小麦 Cangzhouxiaomai	15	昌乐5号 Changle5
4	长6878 Chang6878	16	长武131 changwu131
5	长武89(1)3-4 Changwu89(1)3-4	17	单R8043 ShanR8043
6	旱选12 Hanxuan12	18	旱选3号 Hanxuan3
7	红和尚 Hongheshang	19	红良4号 Hongliang4
8	晋麦33 Jinmai33	20	京选20 Jingxuan20
9	京选25 Jingxuan25	21	洛旱2号 Luohan2
10	平阳348 Pingyang348	22	陕225-9 Shan225-9
11	中大91-品9 Zhongda91-pin9	23	单R8093 ShanR8093
12	淮麦18 Huaimai18	24	烟农19号 Yannong19

表2 正常营养液组分

Table 2 Elemental components of normal nutrient solution

大量元素 Macroelement	浓度/(mmol/L) Concentration	微量元素 Microelement	浓度/( $\mu$ mol/L) Concentration
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.2	$\text{H}_3\text{BO}_3$	1
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.1
KCl	1.8	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.5
CaCl <sub>2</sub>	1.5	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1	Fe·EDTA	100

### 1.3 测定指标及方法

测定时,每个重复从两穴中随机选取5株,用日产 Chlorophyll Meter SPAD-502型叶绿素测定仪分别测定小麦植株最顶部第一片完全展开叶的SPAD值。然后,测定株高(Plant height, PH)、根长(Root length, RL)、叶长(Leaf length, LL)和叶宽(Leaf width, LW),统计分蘖数(Tiller number, TN)和根条数(Root number, RN)。再将植株分为茎叶和根系两部分,用万分之一天平称根鲜重(Root fresh weight, RFW)和茎叶鲜重(Straw fresh weight, SFW),然后分别在105℃下杀青30 min,70℃下烘至恒重,测定根干重(Root dry

weight, RDW)和茎叶干重(Straw dry weight, SDW)。将小麦根干重和茎叶干重研磨粉碎后,严格按照《土壤农化分析》<sup>[11]</sup>标准操作步骤,先用 $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮制备待测液,再通过半微量凯氏定氮法分别测定茎叶和根氮素含量(Shoot nitrogen concentration, SNC; root nitrogen concentration, RNC)。

### 1.4 相关指标计算方法<sup>[7,12]</sup>

植株总鲜重(Plant fresh weight, PFW)=根鲜重+茎叶鲜重

植株总干重(Plant dry weight, PDW)=根干重+茎叶干重

叶面积(Leaf area, LA)=叶长×叶宽×修正系数(0.75)测量叶片为植株顶端起第一片完全展开叶

根冠比(Root/shoot ratio, RSR)=根干重/茎叶干重

根氮素积累量(Root nitrogen accumulation, RNA)=根干重×根氮素含量

茎叶氮素积累量(Shoot nitrogen accumulation, SNA)=茎叶干重×茎叶氮素含量

植株氮素积累量(Plant nitrogen accumulation, PNA)=根氮素积累量+茎叶氮素积累量

根氮素利用效率(Root nitrogen utilization efficiency, RNUE)=根干重/植株氮素积累量

茎叶氮利用效率(Shoot nitrogen utilization efficiency, SNUE)=茎叶干重/植株氮素积累量

植株氮利用效率(Plant nitrogen utilization efficiency, PNUE)=植株干重/植株氮素积累量

## 1.5 数据分析

为消除不同小麦品种间特定的遗传学与生物学差异所带来的误差,本试验以耐低氮指数来表征某性状对氮素胁迫的敏感程度,从而衡量不同基因型间氮素利用效率的差异性<sup>[4]</sup>。其中,耐低氮指数计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\text{耐低氮指数} = \frac{\text{低氮水平下的测定值}}{\text{正常氮水平下的测定值}} \quad (1)$$

$$\text{隶属函数值 } U(X_i) = \frac{U(X_i - X_{\min})}{U(X_{\max} - X_{\min})} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: $X_i$ 为指标测定值; $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 为参试品种某一指标的最大值和最小值。

$$\text{权重 } W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中: $W_i$ 表示第 $i$ 个共因子在所有共因子中的主要程度, $P_i$ 为各品种第 $i$ 个指标与耐低氮系数间的相关系数,表示了各品种第 $i$ 个公因子的贡献率。

$$\text{综合评价值 } D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} [U(X_i) \times W_i] \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

式中: $D$ 值为材料在低氮胁迫下用综合指标评价所得的耐低氮综合评价值。 $U(X_i)$ 表示第 $i$ 个指标的隶属函数值

间接选择的相对效率( $CR_y/R_x$ )按以下公式计算:

$$CR_y/R_x = (i_x/i_y) \cdot r_g \cdot (H_x/H_y) \quad (5)$$

式中: $i_x$ 、 $i_y$ 分别为性状 $x$ 、 $y$ 的选择强度; $r_g$ 为性状 $x$ 、 $y$ 的遗传相关系数; $H_x$ 、 $H_y$ 为性状 $x$ 、 $y$ 的遗传力

的平方根<sup>[8,14]</sup>。 $CR_y$ 为通过选择 $x$ 性状而使 $y$ 性状产生的选择响应, $R_y$ 为对 $y$ 性状直接的选择响应。遗传相关系数的一个重要用途是在育种工作中对性状进行间接选择<sup>[15]</sup>。假定同时存在两个性状 $x$ 和 $y$ ,若两者间存在遗传相关,当选择 $x$ 性状时, $y$ 性状也会产生一定的影响。一般来说,这种通过选择 $x$ 性状而使 $y$ 性状产生选择响应称为相关响应。若2个性状的选择强度相同,其中一个性状能够同时满足性状遗传力高和遗传相关系数大的优点,那么这时进行间接选择的效果会更好<sup>[16]</sup>。

运用软件 Excel 2010、IBM SPSS Statistics 23.0 和 DPS 7.05 进行生物统计与方差分析,并在此基础上进行主成分分析、聚类分析及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮素水平下小麦苗期氮效率相关性状的基因型差异

由表3可见,除RSR、SPAD、RNC、SNC、RNA、SNA、PNA、RNUE、SNUE和PNUE 10个性状外,其他性状在基因型之间的差异均达显著或极显著水平;所有性状在2种氮肥水平之间的差异均达到极显著水平。23个氮效率相关性状的范围、平均值和变异系数在2种氮素水平下都存在较大差异,且随着氮肥施用量的增加,除RSR、RNUE、SNUE和PNUE之外,其他各性状指标值随之增加。例如,低氮条件下根氮素含量为4.19~16.06 mg/g,平均值为8.56 mg/g,而正常氮条件下则为9.11~26.58 mg/g,平均值为15.76 mg/g。此外,TN在两种氮肥条件下变异系数都是最高的,其中正常供氮变异系数为44.12%,低氮胁迫下为78.48%;另外,在2种氮肥水平下,除LW、SPAD和SNUE外,其他性状指标基因型间的变异系数均>15%。可见,这些性状在品种之间差异比较大。

### 2.2 不同品种小麦苗期耐低氮能力的综合分析

对上述20个氮效率相关性状指标( $CV>15\%$ )的耐低氮指数进行Bartlett球形检验,卡方值为1 087.514, $P=0.000 1<0.001$ ,达到0.1%极显著水平,表明各性状间具有较高相关性,因此本试验数据满足主成分分析的条件。主成分分析能够有效并全面地反映出小麦苗期各性状间起主导作用的指标,同时还可以综合评价小麦苗期耐低氮能力。以特征根>1作为划分标准,对上述23个氮效率相关性状指标的耐低氮指数进行因子分析(表4)。

表 3 两种氮素水平下小麦苗期氮效率相关性状的基因型差异

Table 3 Genotypic differences of nitrogen efficiency-related wheat traits in seedling stage under two nitrogen levels

性状 Trait	低氮 Low-N			正常氮 Normal-N			F 检验 F test	
	变幅 Variation	均值 Mean	变异系数/% CV	变幅 Variation	均值 Mean	变异系数/% CV	基因型 Genotype	氮肥水平 N level
PH	10.60~24.70	15.65	16.24	11.10~32.20	19.82	20.03	3.14*	46.94**
RL	12.60~63.10	34.71	25.05	12.60~65.20	30.76	28.49	3.88**	18.30**
RN	4.00~15.00	8.96	20.68	4.00~22.00	12.07	22.52	5.80**	141.00**
TN	0.00~8.00	1.64	78.48	0.00~9.00	3.79	44.12	3.59*	140.93**
LL	5.20~16.50	9.69	22.91	7.70~21.80	13.53	22.19	5.68**	142.99**
LW	0.20~0.70	0.44	17.08	0.35~0.80	0.57	14.51	2.12*	76.74**
LA	1.17~6.08	3.20	27.83	2.55~12.00	5.75	28.29	2.49*	167.23**
RFW	0.20~1.07	0.61	30.70	0.47~1.56	0.89	26.08	4.24**	59.67**
SFW	0.32~1.18	0.62	24.57	0.86~3.28	1.60	29.45	1.84*	141.33**
PFW	0.53~2.12	1.22	25.02	1.50~4.83	2.49	24.17	2.28*	185.09**
RDW	0.04~0.12	0.07	22.93	0.05~0.13	0.09	21.20	3.11*	17.60**
SDW	0.08~0.20	0.12	21.22	0.15~0.43	0.24	23.85	1.82*	168.34**
PDW	0.11~0.31	0.19	20.60	0.21~0.55	0.33	21.81	2.30*	134.13**
RSR	0.44~0.80	0.63	15.19	0.24~0.51	0.37	16.73	1.00	187.44**
SPAD	21.60~36.90	29.20	13.67	40.90~57.80	49.02	6.89	1.59	746.38**
RNC	4.19~16.06	8.56	21.52	9.11~26.58	15.76	20.17	0.98	142.00**
SNC	10.48~22.72	15.58	19.32	17.40~51.47	30.50	21.15	1.41	154.44**
RNA	0.32~1.39	0.61	31.16	0.60~2.92	1.38	33.06	1.71	104.49**
SNA	0.90~3.18	1.79	26.47	3.21~11.18	7.24	27.74	1.06	236.73**
PNA	1.22~3.91	2.40	24.70	4.46~13.36	8.61	26.09	1.11	227.39**
RNUE	62.27~238.47	122.38	22.95	37.62~109.79	66.05	20.56	1.08	176.26**
SNUE	44.01~95.45	66.45	18.50	19.43~57.48	57.48	12.41	1.20	196.27**
PNUE	50.18~113.62	79.83	16.34	23.14~59.57	38.90	17.93	1.01	193.47**

注：\*\* 表示达 1% 显著水平，\* 表示达 5% 显著水平。下同。

Note: \*\* indicates the significance at 1% level. \* indicates the significance at 5% level. The same below.

将 23 个指标转换成 5 个相互独立的综合指标，其累计贡献率为 90.311%，已基本包含了参试材料的大部分信息，能够较好地反映整体状况。

由表 4 可以看出，第一主成分中 RPH、RRL、RTN、RLW、RLA、RSFW、RPFW、RSDW、RPDW、RRNA、RSNA 和 RPNA 12 个性状对其影响较大，对应的特征值为 10.794，贡献率为 46.931%；第二主成分中 RLL、RRFW、RRDW 和 RRSR 4 个性状

对其影响较大，对应的特征值为 4.301，贡献率为 18.699%；第三主成分中 RSNC、RSNUE 和 RPNUUE 3 个性状对其影响较大，对应的特征值为 2.744，贡献率为 11.931%；第四主成分中 RRNC 和 RRNUE 2 个性状对其影响较大，对应的特征值为 1.731，贡献率为 7.527%；第五主成分中 RRN 和 RSPAD 2 个性状对其影响较大，对应的特征值为 1.202，方差贡献率为 5.224%。

表4 小麦苗期氮效率相关性状的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of nitrogen efficiency related wheat traits at seedling stage

性状 Trait	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2	因子3 Factor 3	因子4 Factor 4	因子5 Factor 5
相对株高 RPH	0.555	-0.536	0.196	0.352	-0.093
相对根长 RRL	0.815	0.307	0.163	0.140	-0.007
相对根条数 RRN	0.204	0.544	0.219	-0.322	-0.624
相对分蘖数 RTN	0.824	0.283	0.115	0.138	0.020
相对叶长 RLL	0.374	-0.649	0.441	0.188	0.195
相对叶面积 RLA	0.728	-0.338	0.376	0.230	0.080
相对根鲜重 RRFW	0.518	0.751	0.048	-0.104	0.163
相对茎叶鲜重 RSFW	0.911	-0.105	0.268	0.123	-0.171
相对植株鲜重 RPFW	0.898	0.283	0.182	0.075	-0.049
相对根干重 RRDW	0.577	0.731	-0.103	-0.169	0.161
相对茎叶干重 RSDW	0.950	0.105	0.149	0.028	-0.120
相对植株干重 RPDW	0.909	0.339	0.090	-0.021	-0.032
相对根冠比 RRSR	-0.321	0.741	-0.279	-0.264	0.333
相对根氮素含量 RRNC	0.481	-0.546	0.273	-0.582	0.176
相对茎叶氮素含量 RSNC	0.590	-0.269	-0.744	0.016	-0.010
相对根氮素积累量 RRNA	0.753	-0.002	0.192	-0.553	0.255
相对茎叶氮素积累量 RSNA	0.884	-0.116	-0.415	0.057	-0.122
相对植株氮素积累量 RPNA	0.921	-0.108	-0.343	-0.056	-0.075
相对根氮素利用效率 RRNUE	-0.437	0.571	-0.257	0.581	-0.158
相对植株氮素利用效率 RPNUE	-0.593	0.442	0.642	0.130	0.005
特征值 Eigenvalue	10.794	4.301	2.744	1.731	1.202
贡献率/% Contribution	46.931	18.699	11.931	7.527	5.224
累计贡献率/% Cumulative contribution	46.931	65.630	77.560	85.087	90.311

根据各主成分的因子值及各指标的耐低氮指数,得出各主成分(即公因子)的得分值  $C(x)$ 。然后根据公因子得分值,由式(2)计算出每个基因型的隶属函数值  $U(x)$ ,再根据各主成分贡献率的大小,由式(3)得出各因子的权重。5个公因子的权重分别为0.516、0.214、0.127、0.085和0.058;利用式(4)计算出每个基因型的耐低氮性综合评价值( $D$ ), $D$ 值越大表明其耐低氮能力越强(表5)。

利用  $D$  值数据,采用组间联接法,以欧氏距离对24份小麦基因型的综合评价进行系统聚类分

析,结果见图1。在欧氏距离为15时,将参试的24份小麦品种聚成3类,即耐低氮型、中间型和低氮敏感型。耐低氮型有5个品种(约20.83%),其中长武89(1)3-4综合评价值( $D$ )最高,达到0.708,其次为安85中124-1、单R8093、平阳348和昌乐5号,属耐低氮相对较好的品种;低氮敏感型有6个品种(25%),早选12综合评价值最低,为0.159,其次为白齐麦、烟农19号、陕225-9、晋麦33和中大91-品9,属耐低氮相对较差的品种;而其余的品种属于中间型(约54.17%)。

表5 24份小麦品种公因子得分值  $C(x)$ 、隶属函数  $U(x)$  和综合评价值  $D$   
 Table 5 Common factor score  $C(x)$ , membership function  $U(x)$  and comprehensive evaluation value  $D$  of 24 wheat varieties

编号 Code	$C(1)$	$C(2)$	$C(3)$	$C(4)$	$C(5)$	$U(1)$	$U(2)$	$U(3)$	$U(4)$	$U(5)$	$D$
1	-0.513	-0.082	-0.057	2.146	-0.854	0.323	0.347	0.395	1.000	0.345	0.399
2	-1.490	-0.458	-0.806	0.641	0.690	0.046	0.269	0.195	0.677	0.768	0.208
3	1.234	-1.132	-0.075	0.377	-1.945	0.817	0.300	0.391	0.620	0.047	0.552
4	0.132	-1.757	-0.354	0.358	-0.156	0.505	0.000	0.316	0.616	0.536	0.387
5	1.881	-0.202	0.508	-1.129	-0.085	1.000	0.322	0.546	0.296	0.556	0.708
6	-1.654	-1.056	0.548	-0.676	-0.651	0.000	0.145	0.557	0.394	0.401	0.159
7	-0.286	0.227	-0.003	-0.508	1.233	0.387	0.411	0.410	0.430	0.916	0.424
8	-1.569	0.473	0.913	0.465	-1.119	0.024	0.462	0.654	0.639	0.273	0.268
9	-0.730	1.541	-0.082	-0.897	-2.116	0.261	0.683	0.389	0.346	0.000	0.352
10	0.576	3.071	-0.765	0.196	-0.079	0.631	1.000	0.206	0.581	0.557	0.640
11	-0.733	-0.488	-0.701	0.970	1.540	0.260	0.263	0.223	0.747	1.000	0.348
12	-0.180	1.077	-1.466	-0.786	0.239	0.417	0.587	0.020	0.370	0.644	0.404
13	1.652	0.366	-0.661	-0.078	-0.942	0.935	0.440	0.234	0.522	0.321	0.671
14	0.091	-0.024	0.265	0.285	0.468	0.494	0.359	0.481	0.600	0.707	0.485
15	1.440	-0.378	-1.525	1.547	0.347	0.875	0.286	0.004	0.871	0.674	0.630
16	0.178	0.350	-0.068	1.419	0.962	0.518	0.436	0.392	0.844	0.842	0.539
17	0.809	-0.244	1.070	-0.356	0.778	0.697	0.313	0.696	0.462	0.792	0.604
18	0.669	-0.800	-0.734	-0.655	0.282	0.657	0.198	0.215	0.398	0.656	0.476
19	0.432	-0.897	1.289	-0.045	-0.391	0.590	0.178	0.754	0.529	0.472	0.512
20	-0.088	-0.629	0.789	-0.985	-0.511	0.443	0.234	0.621	0.327	0.439	0.413
21	-0.388	0.843	1.797	0.723	1.168	0.358	0.539	0.890	0.694	0.898	0.529
22	-0.721	-0.482	-1.539	-2.507	1.145	0.264	0.264	0.000	0.000	0.892	0.238
23	0.537	0.732	2.210	-0.527	0.984	0.620	0.516	1.000	0.425	0.848	0.642
24	-1.277	-0.053	-0.553	0.021	-0.989	0.107	0.353	0.263	0.543	0.308	0.227

### 2.3 小麦苗期氮效率主要性状与综合评价值的关联性分析

从表6可以看出,低氮胁迫条件下 TN、LW、RFW、SFW、PFW、SNA、PNA 与耐低氮性综合评价值( $D$ )之间的遗传相关及表型相关均达到显著或极显著水平,但表型相关性更强(除 TN 和 SNU)。其中 TN、LW、RFW、SFW、PFW、SNA、PNA 与综合评价值的环境相关性较大,均达到显著或极显著水平;而其

余的性状受环境的影响较小,均未达到显著水平。正常氮处理下 PH、RL、LA、SDW、PDW、RNC、RNA、SNA、PNA 与耐低氮性综合评价值( $D$ )之间的遗传相关及表型相关均达到显著或极显著水平,但遗传相关性更强。其中 LA 和 SDW 与综合评价值的环境相关性较大,均达到显著或极显著水平,而其余的性状受环境的影响较小,均没达到显著水平。可见,在不同供氮水平下,各性状变异程度也随之改变。

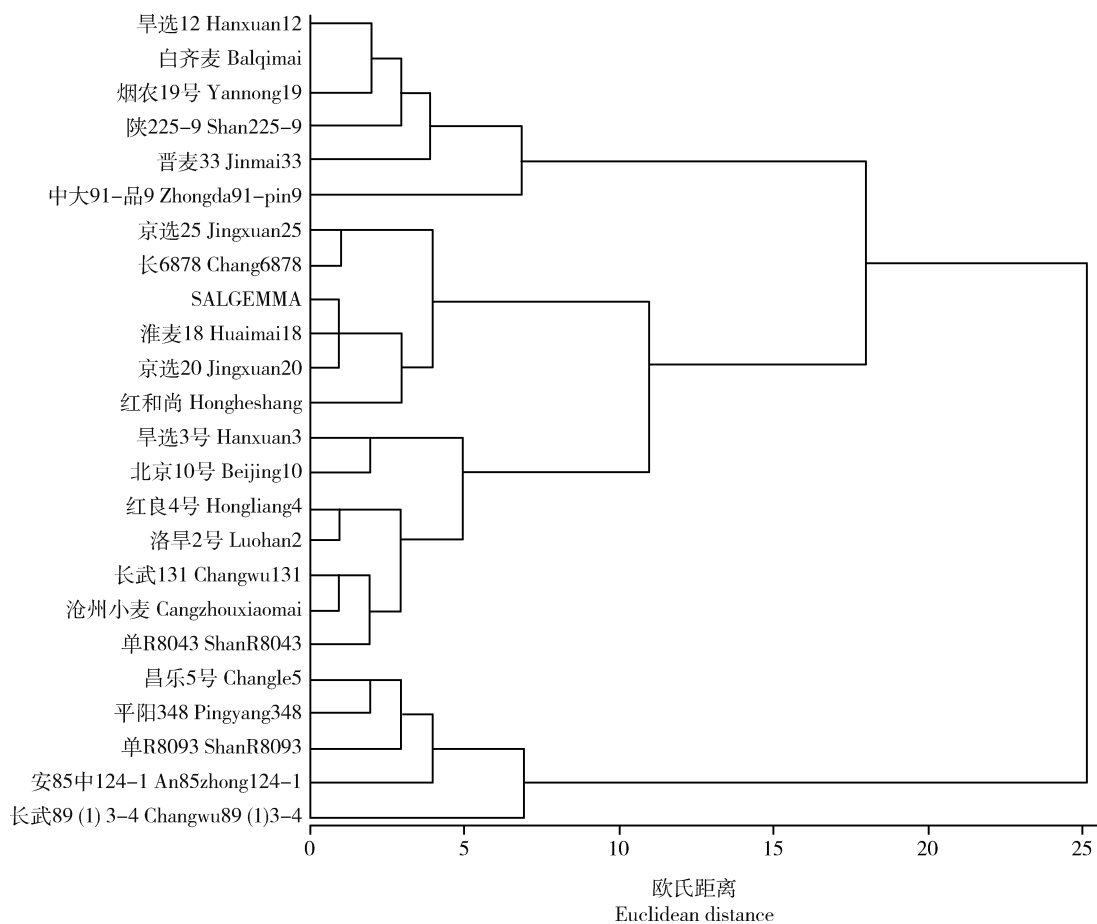


图1 24份不同基因型小麦D值的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of D value of 24 wheat genotypes

表6 小麦苗期氮效率主要性状与综合评价值的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between main characters of nitrogen efficiency and comprehensive evaluation value of wheat at seedling stage

性状 Trait	环境相关 Environmental correlation		遗传相关 Genetic correlation		表型相关 Phenotypic correlation	
	低氮 Low-N	正常氮 Normal-N	低氮 Low-N	正常氮 Normal-N	低氮 Low-N	正常氮 Normal-N
	PH	0.011	0.424*	-0.142	0.437*	-0.105
RL	0.341	0.352	0.399	0.436*	0.380	0.412*
TN	0.405*	0.277	0.863**	-0.217	0.742**	-0.119
LW	0.681**	0.550**	0.430*	0.119	0.460*	0.186
LA	0.620**	0.562**	-0.137	0.508*	0.046	0.500*
RFW	0.709**	0.248	0.499*	-0.003	0.509*	0.057
SFW	0.664**	0.559**	0.435*	0.329	0.497*	0.371
PFW	0.765**	0.525**	0.511**	0.262	0.549**	0.316
RDW	0.725**	0.110	0.303	0.372	0.371	0.308
SDW	0.625**	0.466*	0.223	0.501*	0.312	0.478*
PDW	0.734**	0.033	0.267	0.647**	0.352	0.525**



表 6(续)

性状 Trait	环境相关		遗传相关		表型相关	
	Environmental correlation		Genetic correlation		Phenotypic correlation	
	低氮 Low-N	正常氮 Normal-N	低氮 Low-N	正常氮 Normal-N	低氮 Low-N	正常氮 Normal-N
RNC	0.075	0.069	-0.227	0.606**	-0.084	0.450*
SNC	-0.034	0.084	0.460*	0.013	0.305	0.032
RNA	0.450*	0.096	0.204	0.569**	0.289	0.453*
SNA	0.423*	0.322	0.486*	0.476*	0.466*	0.434*
PNA	0.505*	0.314	0.431*	0.538**	0.453*	0.478*
SNUE	-0.009	-0.062	-0.474*	-0.165	-0.329	-0.135
PNUE	-0.041	-0.396	-0.380	0.157	-0.265	-0.046

2.4 遗传相关系数和遗传力的联合分析

从表 7 可以看出,低氮胁迫下选择 LW、RFW 和 PFW 等指标性状可以对小麦耐低氮性的选择取得较

好的效果;而正常供氮条件下可以选择 LA、PDW 和 RNA 等性状,这些性状对小麦苗期耐低氮性的选择效率较高,选择这些性状才能取得较好的效果。

表 7 小麦苗期氮效率主要性状对耐低氮性选择的相对效率

Table 7 Relative efficiency of main traits of nitrogen efficiency of wheat at seedling stage under the selection of low nitrogen tolerance

性状 Trait	低氮 Low-N			正常氮 Normal-N		
	遗传相关系数		相对效率 Relative efficiency	遗传相关系数		相对效率 Relative efficiency
	Genetic correlation coefficients	H <sup>2</sup> /%		Genetic correlation coefficients	H <sup>2</sup> /%	
PH	-0.142	65.17	-0.194	0.437	83.31	0.629
RL	0.399	53.67	0.455	0.436	59.05	0.528
TN	0.863	79.33	1.174	-0.217	73.12	-0.292
LW	0.430	75.00	0.605	0.119	76.92	0.164
LA	-0.137	61.93	-0.226	0.508	74.50	0.691
RFW	0.499	78.21	0.692	-0.003	59.65	-0.004
SFW	0.435	52.05	0.437	0.329	66.87	0.424
PFW	0.511	68.70	0.637	0.262	64.39	0.331
RDW	0.303	73.32	0.435	0.372	64.77	0.472
SDW	0.223	63.51	0.257	0.501	73.28	0.676
PDW	0.267	70.37	0.349	0.647	83.12	0.930
RNC	-0.227	18.03	-0.118	0.606	47.27	0.657
SNC	0.460	44.09	0.557	0.013	51.72	0.015
RNU	0.204	36.81	0.240	0.569	62.79	0.711
SNU	0.486	34.08	0.482	0.476	57.26	0.568
PNU	0.431	46.59	0.510	0.538	59.26	0.653
SNUE	-0.474	44.90	-0.554	-0.165	47.46	-0.179
PNUE	-0.380	38.43	-0.426	0.157	30.93	0.138

## 3 讨论

### 3.1 耐低氮型小麦品种的筛选

选育耐低氮型品种是提高作物氮肥利用率、促进土壤缺氮地区农业生产的有效途径。研究表明,低氮胁迫环境可导致植株形态学参数和生理生化参数改变<sup>[17-18]</sup>。例如,低氮胁迫下,植株地上部生长受抑制程度大于根部,植株氮积累量降低、氮利用效率明显升高等<sup>[19-20]</sup>。本研究发现低氮胁迫在一定程度上抑制了小麦幼苗地上部及植株整体的生长,但促进了根长、根冠比、根氮素利用效率、茎叶氮素利用效率和植株氮素利用效率。可见小麦幼苗会通过加强根系生长、根冠比及提高体内氮素利用效率等适应机制来应对低氮胁迫对其造成的影响,这与前人研究结果基本一致。小麦苗期氮素的高吸收率虽不能等同于小麦在整个生育期的氮高利用率,只能说明其具有潜在的氮高效利用能力<sup>[6]</sup>。李淑文等<sup>[20]</sup>研究指出,较强的氮素吸收能力和较好的植株生长特性是氮高效小麦品种获得高氮效率的生物学基础。裴雪霞等<sup>[7]</sup>研究结果表明,小麦生长发育前期氮素吸收量对小麦生长发育起关键作用。因此小麦苗期的氮素吸收对成熟期籽粒产量的形成有重要影响。然而,评价指标是筛选耐低氮小麦品种的前提条件,裴雪霞等<sup>[7]</sup>认为小麦苗期相对植株干重值可作为耐低氮小麦品种的评价指标,本研究按照此方法,发现耐低氮型品种包括长武 89(1)3-4 和安 85 中 124-1;中间型包括长 6878、白齐麦和早选 12 等 7 个品种;其他 15 个品种属于低氮敏感型。李丹丹等<sup>[5]</sup>将植株氮积累量和地上干重的耐低氮性指数作为小麦苗期氮效率评价指标,本研究依据其方法,将昌乐 5 号、早选 3 号和沧州小麦等 7 个品种分为耐低氮型;将白齐麦、早选 12 和晋麦 33 归为中间型;其他 14 个品种属于低氮敏感型。可以看出,即使同样的试验材料,依据不同氮高效评价指标进行分析其结果不尽相同。为解决这一问题,有学者提出综合评价指标<sup>[6]</sup>,此方法已得到广泛应用,如棉花钾<sup>[21]</sup>高效品种筛选和水稻<sup>[22]</sup>、烟草<sup>[23]</sup>氮高效品种筛选。其能够克服单一指标评价的缺点,增加了评价的全面性和准确性<sup>[24]</sup>。因此,本研究采用综合评价值(*D*值)进行聚类分析,将 24 个小麦品种分为三类:耐低氮型、中间型和低氮敏感型。

### 3.2 小麦氮效率主要性状与耐低氮性综合评价值的相关性

小麦育种中,通常要对多个性状进行选择,但是

由于性状间常存在不同程度相关性,选择一个性状就会涉及到其他性状。因此,借助性状间的相关性进行间接选择是一条有效途径。但人们一般只注重表型相关系数,而忽略了环境对性状表达的影响相关,所得到的结果通常不能真实反映性状间的关系,因此,在研究中经常将表型相关分解为 2 个方面:遗传相关和环境相关。有研究认为,遗传相关比表型相关更适合作为选择标准的性状值<sup>[25]</sup>。但可靠的表型相关评价方法必须同时考虑遗传和环境的互动。小麦不同品种间性状均达到显著水平,这与其他研究者的研究结果基本一致<sup>[4,20,26-28]</sup>。本研究表明,在低氮胁迫条件下 TN、LW、RFW、SFW、PFW、SNA、PNA 与耐低氮性综合评价值(*D*)之间的遗传相关及表型相关均达到显著或极显著水平,但表型相关性更强(除 TN 和 SNA)。说明小麦耐低氮性与上述性状间除受遗传性影响外,环境也起了一定的作用;正常氮处理下 PH、RL、LA、SDW、PDW、RNC、RNA、SNA、PNA 与耐低氮性综合评价值(*D*)之间的遗传相关及表型相关均达到显著或极显著水平,但遗传相关性更强。说明小麦耐低氮性与上述性状间有很好的遗传相关关系。因此,这些有显著表型相关,容易识别、方便测量的指标性状在今后的小麦耐低氮性选择中提供一定的参考依据。

### 3.3 小麦苗期氮效率相关性状的遗传力及耐低氮性选择策略

遗传力所反映的是亲代性状遗传给子代的一种能力,是评价亲本不同性状优劣的主要指标<sup>[29]</sup>。Falconer 等<sup>[15]</sup>指出,把一个性状用作选择的间接标准必须满足 2 个条件:第一,该性状的遗传力必须足够高;第二,性状间的遗传相关性也必须足够高。因此,在耐低氮性育种实践中,综合考虑氮效率相关性状与综合评价值的遗传相关性和性状的遗传力是获得理想选择效果的关键。本研究基于上述两个条件,确定低氮胁迫下选择 TN、LW 和 RFW 等性状;正常供氮条件下选择 LA、PDW 和 RNA 等氮效率主要性状可以提高小麦耐低氮性的选择效率,作为后期耐低氮性育种中重点考察的性状。

## 4 结论

通过综合评价值,初步筛选出 5 个耐低氮品种:长武 89(1)3-4、安 85 中 124-1、单 R8093、平阳 348 和昌乐 5 号,这些品种可作为耐低氮育种的亲本材料;氮效率相关性状与耐低氮性综合评价值之间均

存在显著或极显著的遗传相关;联合有关性状的遗传相关系数和遗传力进行综合分析,低氮胁迫下选择LW、RFW和PFW等性状;而正常供氮条件下可以选择LA、PDW和RNA等性状,这些性状可以作为后期耐低氮性小麦育种中重点选择性状。

## 参考文献 References

- [1] Li W J, He P, Jin J Y. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for spring maize in north-east China [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(11): 1747-1761
- [2] Hirsch R E, Sussman M R. Improving nutrient capture from soil by the genetic manipulation of crop plants [J]. *Trends in Biotechnology*, 1999, 17(9): 356-361
- [3] Tilman D. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999 (96): 5995-6000
- [4] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 张定一. 耐低氮小麦基因型筛选指标的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 93-98  
Pei X X, Wang J A, Dang J Y, Zhang D Y. An approach to the screening index for low nitrogen tolerant wheat genotype [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2007, 13(1): 93-98 (in Chinese)
- [5] 李丹丹, 田梦雨, 崔昊, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 曹卫星. 小麦苗期耐低氮胁迫的基因型差异 [J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(2): 222-227  
Li D D, Tian M Y, Cui H, Dai T B, Jiang D, Jing Q, Cao W X. Genotypic differences of low nitrogen tolerance at wheat early stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(2): 222-227 (in Chinese)
- [6] 杜保见, 郜红建, 常江, 章力干. 小麦苗期氮素吸收利用效率差异及聚类分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1349-1357  
Du B J, Gao H J, Chang J, Zhang L G. Screening and cluster analysis of nitrogen use efficiency of different wheat cultivars at the seedling stage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1349-1357 (in Chinese)
- [7] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 张定一. 小麦氮素吸收利用的基因型差异研究 [J]. *小麦研究*, 2007(2): 21-27  
Pei X X, Wang J A, Dang J Y, Zhang D Y. Research on genotype difference in nitrogen absorption and utilization of wheat [J]. *Journal of Wheat Research*, 2007, 28(2): 21-27 (in Chinese)
- [8] 史华伟, 孙黛珍, 王曙光, 史雨刚, 杨进文. 冬播春性小麦产量相关性状与抗旱性的关系研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(3): 12-22  
Shi H W, Sun D Z, Wang S G, Shi Y G, Yang J W. Study on the correlation between yield and drought resistance of winter sowing spring wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(3): 12-22 (in Chinese)
- [9] 卢娟, 姚永定, 史华伟, 史雨刚, 王曙光. 小麦产量构成因素相关性状与群体产量的遗传相关分析 [J]. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 501-503  
Lu J, Yao Y D, Shi H W, Shi Y G, Wang S G. Genetic correlation analysis between yield components related traits and population yield in wheat [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(4): 501-503 (in Chinese)
- [10] 张锡洲, 吴沂珀, 李廷轩. 不同施氮水平下不同氮利用效率小黑麦植株氮素积累分配特性 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(2): 151-158  
Zhang X Z, Wu Y P, Li T X. Accumulation and distribution of nitrogen in triticale varieties with different nitrogen utilization efficiencies under different nitrogen application levels [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2): 151-158 (in Chinese)
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第3版. 北京: 农业出版社, 1980  
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1980 (in Chinese)
- [12] 赵艳艳, 袁亚培, 梁雪, 宫晓平, 吴春红, 周秀文, 郭营, 赵岩, 李斯深, 孔凡美. 不同磷、钾处理小麦苗期氮营养性状的QTL分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1523-1537  
Zhao Y Y, Yuan Y P, Liang X, Gong X P, Wu C H, Zhou X W, Guo Y, Zhao Y, Li S S, Kong F M. QTL mapping of nitrogen related traits under different concentrations of P and K at wheat seedling stage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1523-1537 (in Chinese)
- [13] 赵化田, 王瑞芳, 许云峰, 安调过. 小麦苗期耐低氮基因型的筛选与评价 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1199-1204  
Zhao H T, Wang R F, Xu Y F, An D G. Screening and evaluating low nitrogen tolerant wheat genotype at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1199-1204 (in Chinese)
- [14] 王曙光, 史雨刚, 史华伟, 曹亚萍, 孙黛珍. 春小麦光合特性与抗旱性的关系研究 [J]. *作物杂志*, 2017(6): 23-29  
Wang S G, Shi Y G, Shi H W, Cao Y P, Sun D Z. Research on relationship between photosynthetic characteristics and drought resistance in spring wheat [J]. *Crop*, 2017(6): 23-29 (in Chinese)
- [15] Falconer D S, Mackay T F C. *Introduction to Quantitative Genetics* [M]. 4th ed. Harlow: Longman, 1996
- [16] 闫延梅, 侯乐新, 张琪, 闫向前, 孙化军. 超高产夏大豆品种主要农艺性状的遗传分析 [J]. *农业科技通讯*, 2013(12): 99-101  
Yan Y M, Hou L X, Zhang Q, Yan X Q, Sun H J. Genetic analysis of main agronomic characters of super high yield summer soybean varieties [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2013(12): 99-101 (in Chinese)
- [17] 张美俊, 乔治军, 杨武德, 冯美臣, 肖璐洁. 不同糜子品种对低氮胁迫的生物学响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20

- (3): 661-669  
Zhang M J, Qiao Z J, Yang W D, Feng M C, Xiao L J. Biological response of different cultivars of millet to low nitrogen stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 661-669 (in Chinese)
- [18] 谢孟林, 李强, 查丽, 朱敏, 程秋博. 低氮胁迫对不同耐低氮性玉米品种幼苗根系形态和生理特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(8): 946-953  
Xie M L, Li Q, Zha L, Zhu M, Cheng Q B. Effects of low nitrogen stress on the physiological and morphological traits of roots of different low nitrogen tolerance maize varieties at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(8): 946-953 (in Chinese)
- [19] 陈二影, 杨延兵, 秦岭, 张华文, 刘宾. 谷子苗期氮高效品种筛选及相关特性分析[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(17): 3287-3297  
Chen E Y, Yang Y B, Qin L, Zhang H W, Liu B. Evaluation of nitrogen efficient cultivars of foxtail millet and analysis of the related characters at seedling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(17): 3287-3297 (in Chinese)
- [20] 李淑文, 文宏达, 周彦珍, 李雁鸣, 肖凯. 不同氮效率小麦品种氮素吸收和物质生产特性[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(10): 1992-2000  
Li S W, Wen H D, Zhou Y Z, Li Y M, Xiao K. Characterization of nitrogen uptake and dry matter production in wheat varieties with different nitrogen efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(10): 1992-2000 (in Chinese)
- [21] 文琴. 棉花钾高效品种(系)筛选及其生物学特性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008  
Wen Q. Screening and study on biological characteristics varieties (lines) tolerating to low potassium [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [22] 翟荣荣, 余鹏, 叶胜海, 王俊梅, 吴明国, 林建荣, 朱国富, 张小明. 浙江省晚粳稻耐低氮品种的筛选和评价[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(5): 565-572  
Zhai R R, Yu P, Ye S H, Wang J M, Wu M G, Lin J R, Zhu G F, Zhang X M. Screening and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance of Zhejiang photosensitive *Japonica* rice cultivars[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2016, 42(5): 565-572 (in Chinese)
- [23] 钟思荣, 陈仁霄, 陶瑶, 龚丝雨, 何宽信, 张启明, 张世川, 刘齐元. 耐低氮烟草基因型的筛选及其氮效率类型[J]. *作物学报*, 2017, 43(7): 993-1002  
Zhong S R, Chen R X, Tao Y, Gong S Y, He K X, Zhang Q M, Zhang S C, Liu Q Y. Screening of tobacco genotypes tolerant to low nitrogen and their nitrogen efficiency types[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(7): 993-1002 (in Chinese)
- [24] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 朱旭彤. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. *中国农业科学*, 2003(11): 1378-1382  
Zhou G S, Mei F Z, Zhou Z Q, Zhu X T. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003(11): 1378-1382 (in Chinese)
- [25] 王瑞清, 曹连菁, 闫志顺, 李诚, 邵红雨. 小黑麦产量性状的遗传和相关分析[J]. *种子*, 2007(6): 60-62  
Wang R Q, Cao L P, Yan Z S, Li C, Shao H Y. Inheritance and correlation analysis for yield traits in Triticale[J]. *Seed*, 2007(6): 60-62 (in Chinese)
- [26] Jacques L G, Denis B, Emmanuel H. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12(3-4): 163-173
- [27] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 郑险峰, 翟丙年. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006(2): 2143-2149  
Zhao M X, Zhou J B, Yang R, Zheng X F, Zhai B N. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006(2): 2143-2149 (in Chinese)
- [28] 赵刚, 王淑英, 王勇, 李尚中, 唐小明. 不同冬小麦品种对氮素吸收利用效率的差异研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(3): 180-185  
Zhao G, Wang S Y, Wang Y, Li S Z, Tang X M. Study on the difference of nitrogen uptake efficiency in the different wheat varieties[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2010, 25(3): 180-185 (in Chinese)
- [29] 张文英, 柳斌辉, 彭海城, 李爱国, 栗雨勤. 冬小麦抗旱性状遗传力分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(3): 44-47  
Zhang W Y, Liu B H, Peng H C, Li A G, Li Y Q. Analysis on heritability of drought resistance traits in winter wheat (*Triticum aestivum* L)[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 44-47 (in Chinese)

责任编辑: 秦梅