



## 青稞苗期耐低氮能力的品种差异分析

安立昆<sup>1,2,3,4</sup>, 马爱莎<sup>5</sup>, 姚有华<sup>1,2,3,4</sup>, 其美永藏<sup>5</sup>, 吴昆仑<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 青海大学农林学院, 西宁 810016; 2. 青藏高原种质资源研究与利用实验室, 西宁 810016;  
3. 青海省青稞遗传育种重点实验室, 西宁 810016; 4. 国家麦类改良中心青海青稞分中心,  
西宁 810016; 5. 青海大学生态环境工程学院, 西宁 810016)

**摘要** 以 8 个代表性品种为材料, 分析低氮胁迫下青稞苗期的农艺性状和耐低氮能力。结果表明: 低氮胁迫下各青稞农艺性状都出现显著差异。所有青稞中株高、植株鲜质量、植株干质量都明显下降, 根长、根鲜质量、根干质量都明显上升。但不同品种的根冠比变化差异不同, 通过对各农艺性状分析发现, 植株和根的鲜质量和干质量更能反映青稞的耐低氮能力, 其中根干质量是筛选耐低氮青稞的最重要农艺性状, 可以作为青稞耐低氮资源筛选的重要指标。多指标综合分析结果表明, 各青稞耐低氮能力为‘昆仑 15’>‘黄青 1 号’>‘肚里黄’>‘昆仑 14’>‘昆仑 18’>‘二道眉白青稞’>‘洛隆宗’>‘特鄂’。

**关键词** 青稞; 低氮胁迫; 苗期; 农艺性状

青稞 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.) 是大麦属 1a 生草本植物, 由于其成熟后稃壳容易脱落, 也称为裸大麦, 是中国青藏高原地区种植面积最大, 分布最广泛的重要粮食和饲料作物<sup>[1-3]</sup>。青稞富含 β-葡聚糖、纤维素、酚类物质等多种特色营养成分, 具有预防癌症、糖尿病、高血脂等多种功效, 是一种非常具有开发潜力的保健食品<sup>[4]</sup>。青稞主要生长在生态脆弱、土地贫瘠的高原地区, 在青稞种植过程中不可避免要施用大量氮肥, 对高原地区脆弱的农业生态造成严重影响, 筛选和培育耐低氮青稞品种, 减少青稞生产中的氮肥施用, 是目前高原地区青稞产业可持续发展面临的重要问题之一<sup>[5-8]</sup>。

氮是作物生长发育中最重要的营养元素之一, 充足的氮元素供应是保证作物产量和品质的重要因素。同一作物中不同基因型对低氮的耐受能力差异极大, 通过统计分析低氮培养条件下的作物农艺性状特点, 筛选出具有耐低氮特性的作物基因型及与耐低氮密切相关的农艺性状, 是目前作物耐低氮资源筛选和研究所普遍采用的方法<sup>[9-14]</sup>。王晓芸等<sup>[15]</sup>采用苗期水培的方法通过统

计分析低氮培养条件下大麦苗期农艺性状的变异范围, 对 42 种大麦资源的氮利用效率进行研究, 筛选出氮高效利用大麦资源 3 份和氮低效利用资源 2 份。姜琪等<sup>[16]</sup>采用水培的方法对 19 份大麦地方品种低氮条件下根长、株高、分蘖数和干质量等指标的显著性、变异系数、相关性进行分析, 筛选出耐低氮大麦资源 5 份, 并且发现植株和根干质量是大麦耐低氮筛选的重要农艺性状, 而株高不适于作为大麦耐低氮筛选的农艺性状指标。扎桑等<sup>[17]</sup>采用苗期 Hoagland's 营养液培养的方法对 1 029 份青稞苗期低氮条件下株高、根长、植株和根的鲜质量和干质量等农艺性状和生理指标进行测量和分析, 筛选出 30 份耐低氮和 30 份对低氮敏感的青稞材料。

目前, 关于青稞耐低氮资源筛选和农艺性状特点的研究报道较少。研究低氮条件下青稞的农艺性状特点, 筛选耐低氮青稞资源, 并研究其关键农艺性状, 对于筛选和培育耐低氮青稞品种具有重要的意义。本研究对低氮胁迫下不同青稞苗期的农艺性状指标进行研究, 以为耐低氮青稞资源筛选、品种培育提供参考。

收稿日期: 2022-09-13 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 青海省农林科学院创新基金 (2019-NKY-05); 国家自然科学基金 (32060423); 2022 年国家大麦 (青稞) 产业技术体系 (CARS-05-01A-05); 青海省自然科学基金计划-创新团队 (2022-ZJ-902); 青海省创新平台建设专项 (2022-ZJ-Y01)。

第一作者: 安立昆, 男, 助理研究员, 硕士生导师, 主要从事青稞遗传育种研究。E-mail: anlikun@163.com

通信作者: 吴昆仑, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事青稞遗传育种研究。E-mail: wkqlaaf@163.com

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

以前期从 108 份青稞资源中初步筛选出耐贫瘠能力较强,在生产上广泛种植,并具有不同青稞主产区代表性的青稞品种:‘昆仑 15’‘黄青 1 号’‘昆仑 18’‘肚里黄’‘洛隆宗’‘特鄂’‘二道眉白青稞’。以上 8 种青稞种子均由青藏高原种质资源研究与利用实验室保存。

### 1.2 试验方法

1.2.1 青稞低氮处理 各青稞种子经 84 消毒液浸泡 6 min 后用自来水冲洗 6 次,将种子放在湿润的滤纸上进行萌发,1 周后选取长势相似的幼苗固定于泡沫板中,每种青稞 5 株幼苗,放于黑色塑料盒(600 mm×500 mm×160 mm)中,共设置 2 盒。采用改良 Hoagland's 培养液(80 mg/L  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )进行培养。每盒 20 L 培养液。用空气泵 24 h 向培养液中通入空气,每 3 d 更换 1 次培养液,每天用 1 mol/L KOH 溶液稳定 pH 为 7.0。当幼苗生长至 3 叶期时,分别采用正常(80 mg/L  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )和低氮(20 mg/L  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )的改良 Hoagland's 培养液继续进行培养。待青稞生长至 5 叶期时对农艺性状进行测量。

1.2.2 测定指标与方法 测量株高和根长、植株和根鲜质量后将植株和根在 105 °C 下烘 30 min 杀青,80 °C 烘至恒质量后对植株和根干质量进行称量。

1.2.3 数据统计与分析 各指标显著性、变异系数、相关性、主成分和隶属函数分析,参照吕立军<sup>[18]</sup>、王春萍等<sup>[19]</sup>、李洁<sup>[20]</sup>、齐海霞<sup>[21]</sup>、马尧<sup>[22]</sup>、吴雯雯<sup>[23]</sup>进行计算与分析。利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 22.0 以及 R 语言分析处理数据。

耐低氮系数=低氮处理值/正常处理值

变异系数=(标准偏差/平均值)×100%

Pearson 相关性分析:

计算公式:

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

主成分分析:使用 R 语言包 Factoextra 通过线性组合对多维数据进行主成分分析,提取表征组间差异的关键变量。利用偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)建立指标变化与植株处理组别之间的关系模型,通过计算变量投影重要度(VIP)来实现对样本类别预测和差异指标的筛选。使用 R

语言 PLS 程序包建立模型。

随机森林分析:采用 R 语言 Random Forest 程序包进行计算。

$V1 = \frac{1}{n_{\text{tree}}} \sum (\text{erro}_j - \text{erro})$ ,  $n_{\text{tree}}$  代表树的数量,erro 代表误差率。

隶属函数分析计算公式:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), j = 1, 2, 3, \dots, n;$$

$$\mu(X_j) = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$\mu(X_j)$  表示第  $j$  个综合指标的隶属函数值,  $X_j$  表示第  $j$  个综合指标值;  $X_{\max}$  表示第  $j$  个综合指标的最大值,  $X_{\min}$  表示第  $j$  个综合指标的最小值。

## 2 结果与分析

### 2.1 低氮胁迫对不同青稞幼苗农艺性状的影响

低氮胁迫处理后所有青稞株高、植株鲜质量、植株干质量都出现明显下降,根长、根鲜质量、根干质量都出现明显上升,但不同青稞的指标上升或下降幅度不同(表 1)。通过对青稞的耐低氮指数分析发现根干质量的变异系数最大(表 2)。

### 2.2 低氮胁迫与不同青稞幼苗农艺性状的相关性和主成分分析

对所测定的 7 个农艺性状进行相关性分析表明,各相对指标之间的相关性存在差异,有 1 对相对指标呈显著相关( $P < 0.05$ )(表 3)。本研究中, KMO 统计量为 0.687, Barlett 小于 0.001,说明数据结构效度良好,可使用主成分分析提取用于青稞耐低氮筛选的相关农艺性状指标。利用特征根大于 1 的筛选标准提取 3 个主成分,结果所示,前 3 个主成分解释度达 89.33%,正常和低氮处理下青稞不同农艺性状指标差异明显,说明低氮处理下青稞农艺性状指标发生明显变化(表 1,表 4,图 1-A,图 1-C)。进一步计算不同公因子载荷系数可知:因子 1 中主要包括根干质量、植株干质量、根鲜质量和根长,其样本解释度达 58.91%;因子 2 中主要包括植株鲜质量和株高,其样本解释度达 16.05%;因子 3 中主要是根冠比,其样本解释度达 14.37%(表 4)。

### 2.3 低氮胁迫下不同青稞幼苗农艺性状 PLS-DA 判别和随机森林分析

PLS-DA 判别分析作为有监督模型可提高不

表 1 低氮胁迫下青稞苗期农艺性状( $\bar{x} \pm s$ )

Table 1 Agronomic traits of hulless barley at seedling stage under low nitrogen stress

品种 Cultivar	指标 Index	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	植株鲜质量/g Plant fresh mass	根鲜质量/g Root fresh mass	植株干质量/g Plant dry mass	根干质量/g Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio
肚里黄 Dulihuang	正常 Normal nitrogen	26.93±1.35 a	17.00±0.56 a	6.42±0.79 a	2.17±0.25 a	0.18±0.01 a	0.15±0.04 a	0.84±0.22 a
	低氮 Low nitrogen	22.23±0.60 b	21.17±1.57 b	3.53±0.18 b	3.68±0.21 b	0.79±0.03 b	0.87±0.02 b	1.10±0.05 b
洛隆宗 Luolongzong	正常 Normal nitrogen	18.57±0.71 a	14.67±0.40 a	6.74±0.55 a	2.67±0.04 a	0.11±0.02 a	0.42±0.26 a	4.20±2.94 a
	低氮 Low nitrogen	13.33±0.50 b	16.37±1.16 b	2.41±0.26 b	2.77±0.10 a	0.65±0.07 a	0.66±0.04 b	1.03±0.017 b
昆仑 14 Kunlun 14	正常 Normal nitrogen	28.33±1.05 a	14.37±1.20 a	7.91±0.39 a	2.54±0.12 a	0.12±0.01 a	0.13±0.03 a	1.09±0.27 a
	低氮 Low nitrogen	26.37±0.31 b	15.50±0.85 b	3.78±0.23 b	3.04±0.07 b	0.81±0.08 b	0.96±0.02 b	1.20±0.14 a
黄青 1 号 Huangqing 1	正常 Normal nitrogen	26.10±0.72 a	12.23±0.80 a	5.90±0.29 a	2.42±0.10 a	0.21±0.02 a	0.19±0.04 a	0.91±0.20 a
	低氮 Low nitrogen	18.47±0.90 b	22.37±1.16 b	4.62±0.29 b	3.78±0.10 b	0.91±0.02 b	0.96±0.06 b	1.06±0.08 a
特鄂 Tewu	正常 Normal nitrogen	20.33±1.05 a	12.07±0.64 a	6.83±0.51 a	2.25±0.08 a	0.15±0.02 a	0.13±0.02 a	0.85±0.21 a
	低氮 Low nitrogen	11.03±0.67 b	13.97±0.32 b	2.06±0.46 b	2.91±0.15 b	0.58±0.03 b	0.63±0.07 b	1.09±0.10 b
昆仑 15 Kunlun 15	正常 Normal nitrogen	17.50±1.15 a	17.27±1.00 a	4.09±0.24 a	2.76±0.22 a	0.18±0.03 a	0.17±0.06 a	0.94±0.25 a
	低氮 Low nitrogen	15.73±1.01 b	18.70±0.96 b	3.96±0.36 a	3.86±0.57 b	0.61±0.06 b	0.76±0.12 b	1.25±0.13 b
昆仑 18 Kunlun 18	正常 Normal nitrogen	24.87±0.67 a	16.53±1.16 a	5.65±0.27 a	2.78±0.20 a	0.18±0.02 a	0.16±0.04 a	0.92±0.14 a
	低氮 Low nitrogen	16.37±1.16 b	16.40±0.46 a	4.09±0.24 b	3.11±0.15 b	0.57±0.04 b	0.57±0.27 b	1.00±0.51 a
二道眉白青稞 Erdaomei white hulless barley	正常 Normal nitrogen	21.33±1.25 a	16.00±0.53 a	7.05±0.14 a	2.73±0.42 a	0.15±0.03 a	0.15±0.01 a	1.06±0.28 a
	低氮 Low nitrogen	13.90±0.61 b	18.37±0.93 b	3.30±0.44 b	3.22±0.52 b	0.67±0.05 b	0.75±0.05 b	1.13±0.03 a

注:不同的小写字母表示低氮处理与对照组之间存在显著差异( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between low nitrogen treatment and control ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 2 正常与低氮水平处理下青稞苗期农艺性状间的变异( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 Variation coefficient of agronomic traits of hulless barley at seedling stage under normal nitrogen and low nitrogen treatment

农艺性状 Agronomic trait	正常 Normal nitrogen		低氮 Low nitrogen		耐低氮系数 Low nitrogen tolerance index		农艺性状 Agronomic trait	变异系数/% CV Coefficient of variation		
	变幅 Variation	均值 Mean	变幅 Variation	均值 Mean	变幅 Variation	均值 Mean		正常 Normal nitrogen	低氮 Low nitrogen	耐低氮系数 Low nitrogen tolerance index
株高/cm Plant height	16.30~29.42	23.00±3.91 a	10.3~26.7	17.18±4.75 b	0.58~0.98	0.74±0.12 b	株高 Plant height	0.17	0.28	0.17
根长/cm Root length	11.4~18.30	15.02±2.03 a	13.6~23.6	17.85±2.80 b	0.93~1.87	1.21±0.27 b	根长 Root length	0.14	0.16	0.22
植株鲜质量/g Plant fresh mass	3.89~8.36	6.32±1.13 a	1.65~4.9	3.47±0.85 b	0.25~1.04	0.58±0.22 b	植株鲜质量 Plant fresh mass	0.18	0.24	0.38
根鲜质量/g Root fresh mass	1.98~3.21	2.54±0.28 a	2.63~4.25	3.30±0.46 b	1.02~1.76	1.31±0.23 b	根鲜质量 Root fresh mass	0.11	0.14	0.17
植株干质量/g Plant dry mass	0.09~0.22	0.16±0.03 a	0.54~0.92	0.70±0.12 b	2.70~7.82	4.62±1.26 b	植株干质量 Plant dry mass	0.22	0.18	0.27
根干质量/g Root dry mass	0.10~0.61	0.19±0.12 a	0.32~0.99	0.77±0.17 b	1.07~9.80	5.02±2.00 b	根干质量 Root dry mass	0.65	0.22	0.40
根冠比 Root-shoot ratio	0.59~6.78	1.35±1.38 a	0.52~1.54	1.11±0.19 b	0.16~2.04	1.13±0.43 b	根冠比 Root-shoot ratio	1.02	0.17	0.38

表 3 青稞苗期不同农艺性状相对值之间的相关性分析

Table 3 Correlation coefficient among low nitrogen stress coefficients of agronomic traits of hulless barley at seedling stage

指标 Index	株高 Plant height	根长 Root length	植株鲜质量 Plant fresh mass	植株干质量 Plant dry mass	根鲜质量 Root fresh mass	根干质量 Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio
株高 Plant height	1						
根长 Root length	-0.055	1					
植株鲜质量 Plant fresh mass	0.445	0.226	1				
植株干质量 Plant dry mass	0.425	0.618	0.428	1			
根鲜质量 Root fresh mass	0.296	-0.098	-0.556	-0.178	1		
根干质量 Root dry mass	0.706	0.313	0.095	0.387	0.419	1	
根冠比 Root-shoot ratio	0.559	0.378	0.562	0.564	-0.338	0.709*	1

同指标组合时的判别准确率,去除冗余信息。通过计算每个性状指标的变量投影重要度(VIP)可

以发现,植株干质量、根干质量、植株鲜质量和根鲜质量在区分正常和低氮处理组的贡献度最高

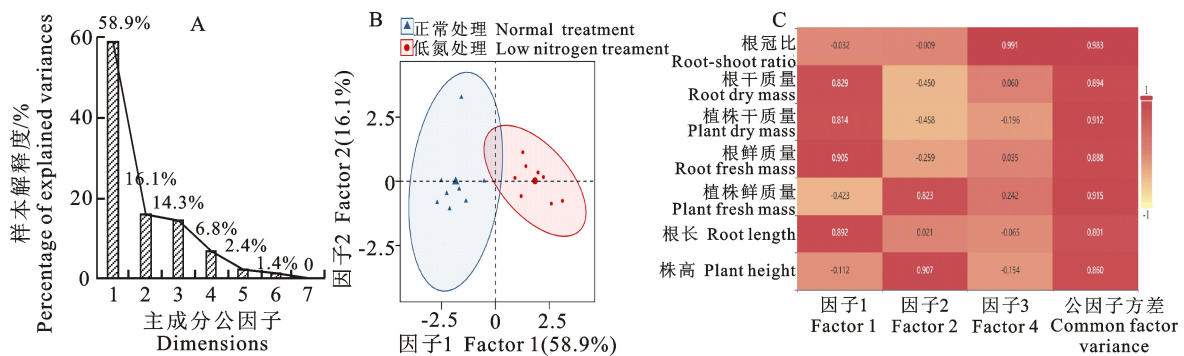
(图 2-A)。这 4 个指标在主成分分析的因子 1 和因子 2 中也展现较高的样本表征能力,因此这 4 个指标可作为体现青稞耐低氮能力的关键指标。进一步利用随机森林筛选青稞耐低氮能力的关键指标,结果显示根干质量与低氮胁迫关联度最高,

其次是植株干质量、根鲜质量和植株鲜质量(图 2-B)。虽然 PLS-DA 模型和随机森林分析筛选到与耐低氮相关青稞性状指标重要度排名略有不同,但是根干质量、植株干质量、根鲜质量和植株鲜质量均作为前 4 名与耐低氮相关指标被筛选出来。

表 4 正常与低氮处理下青稞农艺性状主成分分析特征值与方差贡献率

Table 4 Eigenvalues and variance contributions of principal component analysis of agronomic traits of hullless barely seedlings under normal and low nitrogen treatments

成分 Factor	特征根 Eigen			旋转后方差解释率 Variance of rotated		
	特征根 Eigenvalue (Unrotated)	方差百分比/% Of variance	累积/% Cumulative of variance	特征根 Eigenvalue (Unrotated)	方差百分比/% Of variance	累积/% Cumulative of variance
1	4.124	58.91	58.91	3.159	45.14	45.14
2	1.124	16.05	74.97	1.981	28.31	73.44
3	1.006	14.37	89.33	1.112	15.89	89.33
4	0.477	6.81	96.14			
5	0.17	2.42	98.56			
6	0.097	1.39	99.95			
7	0.003	0.05	100.00			



A. 碎石图; B. 散点图; C. 因子载荷矩阵热图

A. Scree test; B. Scatter plot; C. Heat map of component matrix

图 1 正常和低氮处理下青稞苗期农艺性状主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of agronomic traits in hullless barley seedlings

under normal and low nitrogen treatments

## 2.4 低氮胁迫下不同青稞幼苗农艺性状隶属函数分析

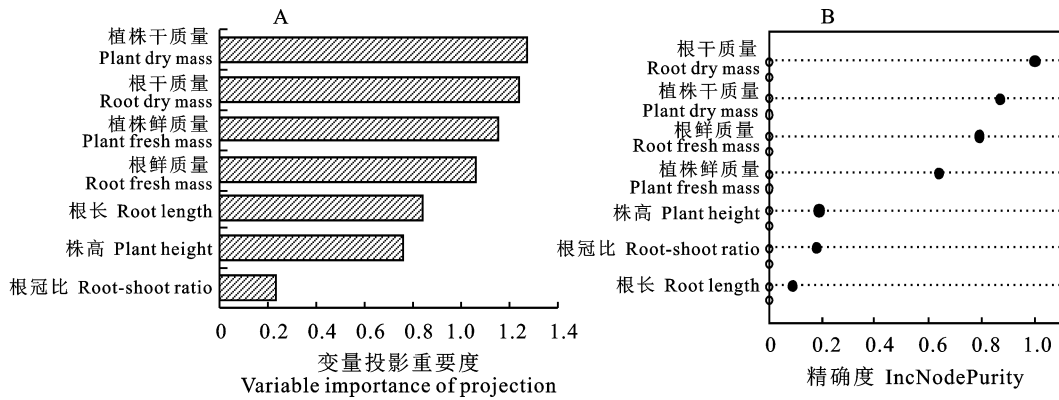
利用隶属函数对低氮胁迫下各青稞农艺性状进行分析,对各青稞的耐低氮能力进行评价。各青稞耐低氮能力分别为‘昆仑 15’>‘黄青 1 号’>‘肚里黄’>‘昆仑 14’>‘昆仑 18’>‘二道眉白青稞’>‘特鄂’>‘洛隆宗’(表 5)。

## 3 讨论

作物耐低氮资源筛选与农艺性状特点研究一直是作物育种中的热点领域之一。关于青稞中耐

低氮资源筛选和农艺性状特点的研究报道较少。作为中国青藏高原地区最重要的粮食作物,研究低氮胁迫下青稞农艺性状特点,筛选耐低氮青稞资源对于减少青稞氮肥的施用,降低青稞生产成本,促进高原地区生态农业经济发展具有重要的意义。虽然不同作物耐低氮评价的农艺性状指标各有不同,但很多研究都表明干质量尤其是根干质量是与很多作物耐低氮能力密切相关的农艺性状指标<sup>[24-28]</sup>。李梁等<sup>[29]</sup>采用苗期水培方法对全国不同地区的 22 个大麦品种低氮胁迫下的农艺性状进行显著性、变异系数、相关性和聚类分析,





A. PLS-DA 模型变量 VIP 值排名; B. 随机森林模型变量重要性排名

A. VIP value ranking of PLS-DA model variables; B. Importance ranking of random forest model variables

图 2 基于 PLS-DA 和随机森林模型的青稞耐低氮相关农艺性状重要性排序

Fig. 2 Ranking of importance for agronomic traits of low nitrogen tolerance in hulless barley based on PLS-DA and random forest

表 5 低氮条件下青稞苗期农艺性状隶属函数分析

Table 5 Membership function analysis of agronomic traits of hulless barley at seedling stage under low nitrogen treatment

品种 Cultivar	株高 Plant height	根长 Root length	植株鲜质量 Plant fresh mass	植株干质量 Plant dry mass	根鲜质量 Root fresh mass	根干质量 Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio	平均值 Mean	排名 Ranking
昆仑 15 Kunlun 15	0.906 22	0.149 23	1.000 00	0.508 76	0.948 57	0.504 34	1.000 00	0.716 73	1
黄青 1 号 Huangqing 1	0.336 81	1.000 00	0.721 35	0.783 38	0.688 79	0.597 10	0.839 50	0.709 56	2
肚里黄 Duli Huang	0.687 53	0.334 25	0.369 33	1.000 00	0.665 74	0.704 28	0.970 06	0.675 88	3
昆仑 14 Kunlun 14	1.000 00	0.144 53	0.259 70	0.179 72	0.000 00	1.000 00	0.779 77	0.480 53	4
昆仑 18 Kunlun 18	0.190 06	0.045 27	0.632 98	0.047 85	1.000 00	0.325 28	0.774 27	0.430 82	5
二道眉白青稞 Erdaomei white hulless barley	0.170 39	0.223 32	0.246 28	0.148 03	0.645 63	0.576 58	0.747 05	0.393 90	6
洛隆宗 Luolongzong	0.182 80	0.461 25	0.072 00	0.233 22	0.264 95	0.606 82	0.888 76	0.387 12	7
特鄂 Tewu	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.447 41	0.000 00	0.000 00	0.063 92	8

发现不同大麦品种在低氮胁迫下的农艺性状差异显著,相对茎叶干质量和相对植株干质量变异系数较大,可以作为大麦耐低氮能力的评价指标。杨丽娜<sup>[30]</sup>在研究 82 份野生大麦和 16 份栽培大麦耐低氮能力时直接采用地上部相对干质量为筛选指标,筛选出高度耐性材料 5 份、中度耐性材料 2 份和对低氮敏感材料 4 份,认为低氮条件下发达的根系是大麦耐低氮能力的保证。李俊杰等<sup>[31]</sup>采用苗期水培方法对 118 份小麦资源在低氮胁迫下的农艺性状进行了显著性、变异系数、主成分、聚类分析、隶属函数等综合分析后发现,根干质量和植株干质量是反映小麦苗期耐低氮能力的关键指标,并筛选出耐低氮小麦 3 份。本研究中各青稞在低氮处理下各农艺性状和对低氮的耐受性表现出了明显差异。低氮胁迫使构成青稞生物体最重要的蛋白质合成受到抑制,导致青稞的株高、植株鲜质量、植株干质量都出现明显下降。

为了吸收更多的氮元素,相对于在正常培养条件下,低氮胁迫下的青稞根系变得更加发达,根长、根鲜质量、根干质量都出现了明显上升。本研究同样发现发达的根系是青稞耐低氮能力的基础,与根系相关的农艺性状是反映青稞耐低氮能力的关键指标。低氮培养下青稞根干质量的耐低氮系数在各指标中的变异系数最大,说明根干质量受低氮胁迫影响最明显,可以作为青稞耐低氮筛选的关键农艺性状指标。通过相关性、主成分、PLS-DA 判别、随机森林以及隶属函数综合分析也发现,相对于株高和根长,植株和根的鲜质量和干质量更能反映青稞的耐低氮能力,其中根干质量是筛选耐低氮青稞最重要农艺性状。8 种青稞耐低氮能力为‘昆仑 15’>‘黄青 1 号’>‘肚里黄’>‘昆仑 14’>‘昆仑 18’>‘二道眉白青稞’>‘洛隆宗’>‘特鄂’。

采用苗期水培方法对作物进行低氮培养,研

究与耐低氮相关的关键农艺性状特点并筛选耐低氮作物资源是目前普遍采用的研究方法。相对于土培和田间试验方法,苗期水培方法具有操作简单、周期短、可以精确控制培养条件等优点,适合快速对大量作物资源进行研究和筛选。但无法反映作物在田间全生育期缺氮条件下的农艺性状特点以及对产量的影响。本研究采用苗期水培方法,对低氮培养条件下不同青稞农艺性状进行综合分析,明确反映青稞耐低氮能力的关键农艺性状,并对 8 种青稞的耐低氮能力进行评价,为青稞耐低氮资源筛选和品种培育提供一定参考。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 吴昆仑,陈丽华,迟德钊.不同生态区青稞品种变异的 SSR 鉴定[J].浙江农业学报,2011,23(3):475-478.  
WU K L, CHEN L H, CHI D ZH. Identification of variation of hulless barley in different ecological regions by SSR markers [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(3):475-478.
- [2] 姚晓华,张志斌. *HVA1* 基因的同源克隆及其转基因植物耐逆性研究进展[J].广东农业科学,2011,38(14):129-131, 137.  
YAO X H, ZHANG ZH B. Research on stress tolerance of *HVA1* gene and transgenic plants[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(14):129-131, 137.
- [3] 任晴雯,安立昆,姚有华,等.青稞 *HvnPHO1;2* 基因克隆、亚细胞定位和表达模式分析[J].西北农业学报,2021,30(10):1461-1472.  
REN Q W, AN L K, YAO Y H, *et al.* Cloning, subcellular localization and expression analysis of phosphate transporter gene *HvPHO1;2* in hulless barley[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(10):1461-1472.
- [4] 夏虎,晏熙玥,卢利聃,等.青稞的营养功能及其高值化利用研究进展[J].食品工业科技,2022,43(20):1-11.  
XIA H, YAN X Y, LU L N, *et al.* Progress on nutritional function and high-value utilization of hulless barley[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(20):1-11.
- [5] ZENG Q X, ZENG J, YE L, *et al.* Transcriptome profiling analysis for two Tibetan wild barley genotypes in responses to low nitrogen[J]. *BMC Plant Biology*, 2016, 16(1):30.
- [6] YANG L H, HU L J, ZHU B, *et al.* Genotypic variations of N use efficiency in Tibetan wild and cultivated barleys[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2013, 40(2):155-164.
- [7] 全晓艳.西藏野生大麦低氮耐性机理研究[D].杭州:浙江大学,2016.  
QUAN X Y. Studies on the mechanism of low nitrogen tolerance in Tibet wild barley[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [8] 安立昆,姚有华,姚晓华,等.青稞耐低氮相关类甜蛋白基因 *HvTONDI* 克隆和亚细胞定位研究[J].西北农业学报,2021,30(8):1157-1166.  
AN L K, YAO Y Y, YAO X H, *et al.* Cloning and subcellular localization of related thaumatin like protein gene *HvTONDI* tolerant to low nitrogen in hulless barley[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(8):1157-1166.
- [9] 张楚.苦荞耐低氮基因型的筛选及其生理机制的初步研究[D].山西临汾:山西师范大学,2018.  
ZHANG CH. The primary research about the screening of fagopyrum tataricum genotypes to low nitrogen tolerance and physiological mechanism [D]. Linfen Shanxi: Shanxi Normal University, 2018.
- [10] 赵化田,王瑞芳,许云峰,等.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, *et al.* Screening and evaluating low nitrogen tolerant wheat genotype at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5):1199-1204.
- [11] 黄兴东.谷子耐低氮胁迫品种资源的筛选与鉴定[D].山西晋中:山西农业大学,2019.  
HUANG X D. Screening and identification of resistance to low nitrogen varieties of foxtail millet [D]. Jinzhong Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [12] DUAN P F. Response of maize genotypes with different nitrogen use efficiency to low nitrogen stresses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1):77-80.
- [13] 张兴华,薛吉全,刘万锋,等.不同玉米品种耐低氮能力鉴定与评价[J].西北农业学报,2010,19(8):65-68.  
ZHANG X H, XUE J Q, LIU W F, *et al.* Screening and identification of low nitrogen tolerance in different maize hybrids[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(8):65-68.
- [14] 程晓彬,李念,阮景军,等.以色列野生二棱大麦籽粒氮素含量的基因型及其生态差异[J].麦类作物学报,2018,38(4):418-423.  
CHENG X B, LI N, RUAN J J, *et al.* Genotype and ecological difference of nitrogen content in grains of wild barley (*Hordeum Spontaneum*) from Israel[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(4):418-423.
- [15] 王晓芸,马增科,孟亚雄.不同基因型大麦苗期氮素利用效率的评价分析[J].大麦与谷类科学,2018,35(3):5-16.  
WANG X Y, MA Z K, MENG Y X. Evaluation and analysis of nitrogen use efficiency of barley varieties with different genotypes at seedling stage[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35(3):5-16.
- [16] 姜琪,陈志伟,刘成洪,等.大麦地方品种苗期耐低氮筛选和鉴定指标的研究[J].华北农学报,2019,34(1):148-155.  
JING Q, CHEN ZH W, LIU CH H, *et al.* Screening and identification indices of low-nitrogen tolerance for barley

- landraces at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(1):148-155.
- [17] 扎桑, 旺姆, 徐齐君. 西藏青稞种质资源苗期耐低氮鉴定与筛选[J]. 西藏农业科技, 2021, 43(2):11-17.  
ZHASANG, WANGMU, XU Q J. Identification and screening of low nitrogen tolerance in seedling stage of Tibetan highland barley germplasm resources[J]. *Tibet Agricultural Science and Technology*, 2021, 43(2):11-17.
- [18] 吕立军. 大葱苗期耐低氮低磷品种筛选及评价指标研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.  
LÜ L J. Screening and evaluation index of cultivars tolerant to low nitrogen and phosphorus at seedling stage of green onion (*Allium fistulosum* L.) [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [19] 王春萍, 张世才, 黄启中, 等. 辣椒苗期耐低氮基因型差异分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(14):4631-4637.  
WANG CH P, ZHANG SH C, HUANG Q ZH, *et al.* Analysis of genotypic differences of low nitrogen tolerance of pepper (*Capsicum annuum*) at seedling stage [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(14):4631-4637.
- [20] 李洁. 150份青稞种质资源成株期耐旱性鉴定[J]. 西北农业学报, 2022, 31(2):164-174.  
LI J. Identification of drought tolerance in 150 hulless barley germplasm resources at adult stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(2):164-174.
- [21] 齐海霞. 气候变化和极端事件对新疆地区冬小麦生长和产量的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.  
LIN H X. Impact of climate change and extremes on the growth and yield of winter wheat in Xinjiang[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [22] 马尧. 不同种质资源花椒主要品质性状差异及其影响因素研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.  
MA Y. Differences and influence factors for pericarp quality of different *Zanthoxylum* L. germplasm resources[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [23] 吴雯雯. 基于水稻汕优63重组自交系群体的数量性状遗传构成剖析方法及应用[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2008.  
WU W W. Shanyou 63 recombinant inbred lines-based approach and application to dissecting the genetic architecture of quantitative traits[D]. Yangzhou Jiangsu: Yangzhou University, 2008.
- [24] 姜琪. 上海地区大麦地方品种的耐低氮筛选和鉴定指标及分子机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.  
JIANG Q. The study of screening, identification and molecular mechanisms of low nitrogen tolerance for barley landraces in Shanghai region [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [25] 阮燕晔. 不同玉米品种氮效率差异的生理生化基础研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2003.  
RUAN Y Y. Physiological and biochemical basis of differences in nitrogen efficiency of different maize varieties [D]. Shenyang: Agricultural University, 2003.
- [26] 周联东. 玉米氮高效指标鉴定及其遗传研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002.  
ZHOU L D. Studies on identification and heredity of nitrogen efficiency indexes [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University, 2002.
- [27] 陈志伟, 陆瑞菊, 姜琪, 等. 一种耐低氮大麦的筛选方法: CN310112, CN201810021569.4 [P]. 2018-06-22.  
CHEN ZH W, LU R J, JIANG Q, *et al.* A screening method for low nitrogen tolerance barley: CN310112, CN2018100 21569.4 [P]. 2018-06-22.
- [28] SINGH U, LADHA J K, CASTILLO E G, *et al.* Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium-and long-duration rice[J]. *Field Crops Research*, 1998, 58(1):35-53.
- [29] 李梁, 杜志钊, 高润红, 等. 不同地区大麦品种苗期耐低氮性及聚类分析[J]. 上海农业学报, 2013, 29(1):10-14.  
LI L, DU ZH ZH, GAN R H, *et al.* Low-nitrogen tolerances of different-region barley varieties at seedling stage and their cluster analysis [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2013, 29(1):10-14.
- [30] 杨丽娜. 西藏野生大麦与栽培大麦氮利用效率的基因型差异研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
YANG L N. Studies on genotypic difference in nitrogen use efficiency among Tibetan wild and cultivated barleys[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [31] 李俊杰, 杜蒲芳, 石婷瑞, 等. 不同基因型小麦苗期耐低氮性评价及筛选[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(7):21-32.  
LI J J, DU P F, SHI T R, *et al.* Screening and evaluation of low nitrogen tolerance from different genotypes wheat at seedling stage [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(7):21-32.

## Analysis of Varietal Difference of Low Nitrogen Tolerance of Hulless Barley at Seedling Stage

AN Likun<sup>1,2,3,4</sup>, MA Aisha<sup>5</sup>, YAO Youhua<sup>1,2,3,4</sup>,  
CHEMI YANGZOM<sup>5</sup> and WU Kunlun<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining 810016, China; 3. Qinghai Key Laboratory of Hulless Barley Genetics and Breeding, Xining 810016, China; 4. Qinghai Subcenter of National Hulless Barley Improvement, Xining 810016, China; 5. College of Eco-Environmental Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract** The agronomic traits and low nitrogen tolerances of 8 representative hulless barley varieties were analyzed at the seedling stage under low nitrogen stress, the results showed that there were significant differences in all agronomic traits of all hulless barley under low nitrogen stress, the plant height, fresh mass and dry mass decreased significantly, meanwhile, the root length, fresh mass and dry mass increased significantly. After the analysis of the agronomic traits, the results revealed that the fresh and dry mass of plants and roots better reflected the low nitrogen tolerance of hulless barley, its root dry mass was the most important agronomic trait for screening low nitrogen tolerant hulless barley, which could be used as an important indicator for screening of low nitrogen tolerant hulless barley resources. The results of the multi-indicator analysis showed that the low nitrogen tolerance of each variety was ranked as ‘Kunlun 15’ > ‘Huangqing’ 1 > ‘Dulihuang’ > ‘Kunlun 14’ > ‘Kunlun 18’ > ‘Erdaomei white hulless barley’ > ‘Luolongzong’ > ‘Tewu’.

**Key words** Hulless barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.); Low nitrogen stress; Seedling stage; Agronomic traits

**Received** 2022-09-13

**Returned** 2022-11-15

**Foundation item** Innovation Fund of Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences (No. 2019-NKY-05); National Natural Science Foundation of China (No. 32060423); China Barley (hulless barley) Industry Technology System (No. CARS-05-01A-05); Natural Science Foundation of Qinghai Province, -Innovation Team (No. 2022-ZJ-902); Innovation Platform Construction Project of Qinghai Province (No. 2022-ZJ-Y01).

**First author** AN Likun, male, assistant research fellow, master supervisor. Research area: breeding of hulless barley. E-mail: anlikun@163.com

**Corresponding author** WU Kunlun, male, research fellow, doctoral supervisor. Research area: breeding of hulless barley. E-mail: wklqaaf@163.com

(责任编辑:顾玉兰 Responsible editor: GU Yulan)