

不同基因型裸燕麦氮素利用效率 与氮素营养特性

葛军勇¹,田长叶²,曾昭海¹,董占红²,胡跃高¹

(1.中国农业大学农学与生物技术学院,北京 100193; 2.河北省高寒作物研究所,河北 张北 076450)

摘要:为系统研究裸燕麦氮效率,选用 8 个不同基因型裸燕麦种质进行田间试验,在不同生育期对不同氮素利用效率指标的基因型差异及裸燕麦的氮素营养特性进行分析。结果表明:(1)各基因型间除氮收获指数变异相对较小($CV\ 5.04\%$)之外,其余指标均变异较大($CV\ 11.98\% \sim 26.65\%$);(2)氮流效率与氮素吸收效率、植株氮生产力呈显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)相关关系,说明植株干物质生产与氮素利用的关系密切,可作为表征裸燕麦籽粒蛋白含量高低的综合指标,对高蛋白裸燕麦育种具有重要价值;(3)提高花后氮同化量和氮转运量有利于提高氮流效率($r = 0.7233^{**}$, $r = 0.7053^{**}$);(4)裸燕麦开花期前追施氮肥可有效提高氮素吸收效率($r = 0.484^{*}$),花后土壤供氮水平过高不利于植株干物质积累($r = -0.701^{**}$)。研究表明裸燕麦氮效率基因型效应显著,为氮高效育种提供了丰富的变异材料。

关键词:氮素利用效率;基因型差异;评价指标;氮素营养特性;裸燕麦

中图分类号: S512.6; S506.2 **文献标志码:** A

Nitrogen use efficiencies and their relationships with nitrogen nutritious characteristics of naked oats with different genotypes

GE Jun-yong¹, TIAN Chang-ye², ZENG Zhao-hai¹, DONG Zhan-hong², HU Yue-gao¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Cold Crops Research Institute of Hebei Province, Zhangbei, Hebei 076450, China)

Abstract: To evaluate the nitrogen use efficiencies (NUE) and their relationships with nitrogen nutritious characteristics of naked oats with eight different genotypes, a field experiment was conducted. Samples were collected at different growth stages and were then separated according to the tissue origins. After being dried, the samples were weighed and the nitrogen concentration was determined using semi-micro Kjeldahl method. The main results showed that the genotypes had significant effects on NUE ($CV\ 11.98\% \sim 26.65\%$) but not on NHI ($CV\ 5.04\%$). Additionally, NFE, as an integrated index reflecting the differences of grain yield and nitrogen utilization among different oat varieties, was significantly ($P < 0.05$; $P < 0.01$) correlated with NRE, NPP, indicating that it could be more useful in evaluating NUE. Moreover, NFE could be improved by increasing N assimilation and translocation after anthesis to effectively increase the N utilization in oat ($r = 0.7233^{**}$, $r = 0.7053^{**}$). Also, it was found naked oat could endure soil impoverishment ($r = 0.484^{*}$). However, excessive nitrogen was harmful ($r = -0.701^{**}$). This research indicated that top-dressing nitrogen before anthesis could improve NUE effectively. At the same nitrogen levels, significant genotype effects of NRE and NFE caused remarkable differences among varieties, providing a rich variation basis for oat breeding.

Keywords: nitrogen use efficiency; genotypic differences; evaluation; nitrogen nutrition characteristics; naked oats

收稿日期:2014-05-16

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-08-B-1, CARS-08-A-5)

作者简介:葛军勇(1987—),男,山东成武人,博士研究生,主要从事燕麦栽培技术与遗传研究。E-mail: gejy207@163.com。

通信作者:胡跃高(1959—),男,山西清徐人,教授,博士生导师,主要从事农作制度研究。E-mail: huyuegao@cau.edu.cn。

土壤氮素是大田作物消耗最多的矿质元素,与作物的产量和品质密切相关,因此作物对氮素吸收与利用的研究已成为高效育种、作物生产、植物营养等相关领域的研究热点,国内外学者已在小麦、玉米、水稻等多种作物上进行了广泛而深入的研究。裸燕麦,俗称莜麦、玉麦、铃铛麦,是华北、西北等高寒山区的主要粮食作物,其蛋白质含量位居 8 种粮食作物之首,氨基酸营养均衡、β 葡聚糖含量高,拥有良好的发展前景^[1]。但裸燕麦长期生长在高寒冷凉地区,耐贫瘠、不耐高肥、产量低,如何提高产量与品质已成为燕麦产业高速发展的瓶颈。

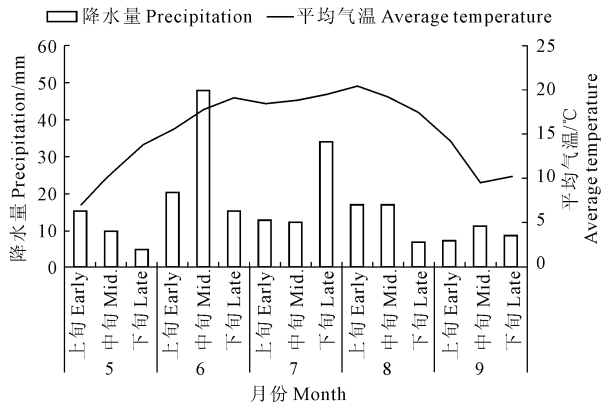
前人研究指出氮高效品种的选育与氮肥的合理施用是提高作物产量和品质的重要手段^[2-4],而掌握裸燕麦的氮素利用规律和氮素营养特性是进行氮高效育种与科学施肥的基础。而关于裸燕麦氮效率的研究较少,国内多集中在氮肥施用效应、氮素形态、农艺性状、少数品种或遗传材料的氮效率研究等方面^[5-10],国外 Isfan^[11]早在 1993 年就发现不同燕麦品种氮效率的基因型差异显著,但未见关于多基因型裸燕麦氮效率特性系统研究的报道。有关作物氮素利用效率评价指标的研究很多,主要集中在氮素吸收效率和生理利用效率方面,此外,还有关于氮偏生产力、氮素农学效率、氮流效率、氮收获指数、氮生产力等的研究^[11-13]。

为尽量避免基因型与环境互作效应,本试验选择在裸燕麦主产区之一的张北县,挑选本地选育的 8 个种质来源差异较大的裸燕麦品种(系),对不同氮效率评价指标的基因型差异及其营养特性进行研究,旨在初步探明裸燕麦氮效率规律,为裸燕麦氮高效品种选育和田间生产氮肥调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2012 年在张家口市农业科学院坝上实验基地(41°08'N, 114°45'E)进行,海拔 1 400 m。当地气候属中温带大陆性季风气候,年均日照时数 2 897.8 h,年均气温 2.6 ℃,无霜期 90~110 d,年均降水量 300 mm。试验基地土壤类型为栗钙土,0~20 cm 耕层土壤基本化学性状为:有机质 4.33 g·kg⁻¹,全氮 1.294 g·kg⁻¹,有效氮 106 mg·kg⁻¹,有效磷 16.36 mg·kg⁻¹,速效钾 269.59 mg·kg⁻¹。前茬作物为谷子,气象数据由张家口市气象局提供(图 1)。本试验选用该区域裸燕麦主栽品种和高代稳定品系 8 个,其生育期除坝莜 6 号较短之外基本一致,而产量、蛋白质含量等主要农艺性状变化较大(表 1)。



注:有效降水指 5 mm 以上降水量。
Note: Effective precipitation refers to rainfall of more than 5 mm.
图 1 试验期间月有效降水量和月均气温变化
Fig.1 Effective variations in precipitation and temperature during experiment period

表 1 供试裸燕麦品种(系)的产量与蛋白质含量
Table 1 Grain yield and protein content of naked oat varieties(lines) tested in the experiments

品种(系) Variety (line)	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	蛋白质含量 Protein content/%
坝莜 1 号 Bayou 1	2345	16.41
坝莜 3 号 Bayou 3	3203	15.61
97045223	3914	12.74
坝莜 6 号 Bayou 6	2874	14.23
坝莜 9 号 Bayou 9	3247	13.38
冀张莜 4 号 Jizhangyou 4	1598	17.54
200233831	3500	16.39
200242255	3455	13.48

注:表中数据为多年种植产量、蛋白质含量的平均值(由河北省高寒作物研究所提供)。
Note: Data in the table was the average yield and protein content (supported by Cold Crops Research Institute of Hebei Province).

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 选取地力均匀、地面平整地块,采用随机区组设计,3 次重复,小区面积为 3 m × 6 m = 18 m²,区组之间行道为 0.8 m。燕麦均采用条播,播量为 120 kg·hm⁻²,行距为 33 cm。施氮(纯氮)量 90 kg·hm⁻²,60%底施,40%于拔节期追施。各小区施磷肥(P₂O₅) 75 kg·hm⁻²,不施钾肥,播前以基肥一次性施入。在适播期内视土壤墒情结合底肥同时播种,燕麦播种时间为 5 月 22 日,收获时间分别为 8 月 20 日(坝莜 6 号)和 9 月 10 日(其余品种),其他管理同一般高产大田。
1.2.2 样品处理 分别在抽穗开花期、灌浆期和成熟期取样,每小区选取代表性样段 0.3 m,按植株不同部位分离,105℃杀青,80℃烘至恒重并测干物重。

将样品粉碎后,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏定氮法测定样品氮浓度^[14]。

1.2.3 指标计算 土壤当季 N 供应量根据耕层土壤有效氮含量计算所得;土壤有效氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 施 N 量 + 土壤供 N 量;植株 N 积累量 = 特定器官干物重 × 该器官含 N 量;植株总 N 积累量 = 地上部各器官 N 积累量之和;开花前 N 同化量 = 开花时各器官 N 积累量之和;开花后 N 同化量 = 成熟期总 N 积累量 - 开花前 N 同化量;开花后 N 转运量 = 开花时叶、茎、穗部 N 的总和 - 成熟期叶、茎、穗部(不含籽粒)N 的总和;N 转运效率(%) = 开花后 N 转运量/开花前 N 同化量 × 100;N 吸收效率(NRE, %) = 植株地上部 N 积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/土壤有效氮量 × 100;氮流效率(NFE, %) = 籽粒中 N 积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/土壤有效氮量 × 100;土壤 N 生产力(NPS) = 籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/土壤有效氮量;植株 N 生产力(NPP, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 籽粒产量/植株地上部 N 积累量;N 收获指数(NHI, %) = 籽粒 N 积累量/植株地上部 N 积累量 × 100。

1.2.4 统计分析 采用 Excel 2007 进行数据整理和图形绘制,利用 SAS v9.2(SAS Institute, USA)统计软件 GLM 程序,Duncan’s 多重比较法进行差异显著性分析($P = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 裸燕麦氮素利用效率指标的基因型差异分析

表 2 结果表明,不同的 N 效率指标在不同品种间具有明显的差异。通过对不同指标的表现差异分析可知(表 3),除氮收获指数变异相对较小外,其余指标均变化较大,其中 NPP、NFE、NRE 的变异系数分别达到 26.65%、26.17%、21.96%。NPP、NFE 的最大值(坝苽 6 号、200233831)分别比最小值(200233831、坝苽 6 号)高出 2 倍以上,表明 NPP 与 NFE 之间存在着极为显著的负相关关系;NRE 的最大值为 76.84%(200242255),比最小值(37.50%,坝苽 6 号)高出一倍以上,说明基因型间综合氮效率差异达到了极显著水平。由表 2、表 3 可知新品系 200242255 的 NRE(75.84%)第一、NFE(56.10%)第二、NPP 第七,说明该品系对土壤中氮素的较高利用水平主要是靠较高的吸收效率,是耐高肥品种;坝苽 6 号 NFE 与 NRE 最低,而 NPP 最高,说明坝苽 6 号是典型耐瘠薄品种,较高的产量主要依赖较高的氮素生理利用效率。

2.2 不同氮素利用效率指标之间的相关性分析

不同氮效率指标相关分析(表 4)表明:NPP 与 NRE、NFE 之间存在极显著负相关关系,而 NRE 与 NPS、NFE 之间呈现显著或极显著正相关,表明裸燕

表 2 不同裸燕麦品种(系)的氮素利用效率指标

Table 2 Nitrogen use efficiency indexes of different naked oat varieties(lines)

品种(系) Variety(line)	土壤氮生产力 NPS/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	植株氮生产力 NPP/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮吸收效率 NRE/%	氮流效率 NFE/%	氮收获指数 NHI/%
坝苽 1 号 Bayou 1	8.58b	13.87c	61.86ab	46.86bc	75.75a
坝苽 3 号 Bayou 3	8.34b	15.26bc	54.64bcd	38.83cd	71.07ab
97045223	10.53a	15.67bc	67.23ab	49.33ab	73.37ab
坝苽 6 号 Bayou 6	7.65b	20.41a	37.50d	26.43e	70.47ab
坝苽 9 号 Bayou 9	7.60b	18.14ab	42.31cd	31.42de	74.29a
冀张苽 4 号 Jizhangyou 4	9.16ab	15.69bc	58.39abc	39.85cd	68.25bc
200233831	7.52b	8.43c	63.39ab	57.93a	63.99c
200242255	8.18b	10.65c	75.84a	56.10ab	73.01ab

注 Note: NPS – nitrogen productivity of soil; NPP – nitrogen productivity of plant; NRE – nitrogen recovery efficiency; NFE – nitrogen flow efficiency; NHI – nitrogen harvest index. 下同。The same below.

表 3 主要氮素利用效率指标的基因型变异

Table 3 Genotypic variations in different nitrogen use efficiency indexes

项目 Item	土壤氮生产力 NPS/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	植株氮生产力 NPP/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮吸收效率 NRE/%	氮流效率 NFE/%	氮收获指数 NHI/%
平均值 Mean	8.45	14.69	57.90	43.28	70.90
最大值 Max.	10.53	20.41	76.84	57.93	75.75
最小值 Min.	7.52	8.43	37.50	26.43	63.99
CV/%	11.98	26.65	21.96	26.17	5.04

表 4 不同氮素利用效率指标之间的相关性
Table 4 Correlations between different indexes of nitrogen use efficiency

项目 Items	氮收获指数 NHI	植株氮生产力 NPP	氮吸收效率 NRE	氮流效率 NFE
植株氮生产力 NPP	0.312			
氮吸收效率 NRE	0.142	-0.790 * *		
氮流效率 NFE	-0.111	-0.932 * *	0.924 * *	
土壤氮生产力 NPS	0.385	0.093	0.435 *	0.225

注: *、* * 分别表示达到 0.05、0.01 显著水平,下同。
Note: * and * * stand for 0.05 and 0.01 significant levels, respectively, the same below.

麦对氮素的高效吸收与高效利用之间存在某种矛盾,综合性指标 NFE 主要受 NRE 的影响,但总体来说植株总氮积累量的增加为氮素向籽粒的转移奠定了物质基础,土壤供氮水平对裸燕麦籽粒产量起到了决定作用。NRE 与 NPP 之间存在极显著负相关关系,表明供试品种(系)中缺乏同时具备高效吸收与利用的双高特性品种。NRE 与 NHI 关系不显著,说明不同基因型裸燕麦种质的生理利用效率较为复杂,需进一步研究。NFE 与 NPS 关系不显著,说明本试验供氮水平可能过高,尚需验证。

2.3 裸燕麦氮素营养特性分析

裸燕麦不同氮效率指标与氮营养性状相关分析(表 5)表明,NFE 与植株氮含量呈显著正相关,表明提高植株氮浓度可以促进氮素的生理利用;NPP 与植株氮含量呈极显著负相关,表明植株氮浓度必须控制在合理范围内,过多的氮供给将对籽粒产量造成不利影响;NPP 与籽粒氮含量间呈极显著负相关,表明高蛋白品种不能有效利用氮肥形成籽粒产量,

即高蛋白品种氮肥生产力偏低,符合高蛋白品种产量低的现实;NPP 与开花前氮同化量、开花后氮同化量之间分别呈显著、极显著负相关关系,表明在植株体内尤其开花后氮的同化与籽粒产量的形成之间存在矛盾,营养器官同化氮素与籽粒对氮素的同化可能存在竞争关系;NPS 与植株氮含量呈显著负相关,表明土壤供氮水平应保持在合理范围内,供氮水平过高会对植株氮含量产生不利影响;NHI 与植株氮含量、开花后氮同化量呈显著负相关,表明花后土壤供氮水平高有利于植株总氮积累量的增加,但不利于籽粒蛋白质含量的增加,这一点可在饲用裸燕麦生产中加以运用。NRE 与开花前氮同化量呈显著正相关,表明裸燕麦在开花前对土壤中的氮素吸收效率较高;NPS 与开花后氮同化量呈极显著负相关,表明花后土壤供氮水平高将不利于作物高效利用氮素提高籽粒产量;综合这两点可以得出,在裸燕麦大田生产的氮肥施用方面,在底施一定氮肥的基础上,应在三叶~拔节期间追施氮肥,而花后不宜追施。

表 5 不同氮素利用效率指标与氮营养性状相关性
Table 5 Correlations between nitrogen use efficiency and nitrogen nutrition characteristics

项目 Items	氮收获指数 NHI	植株氮生产力 NPP	氮吸收效率 NRE	氮流效率 NFE	土壤氮生产力 NPS
籽粒氮含量 Grain N content/%	-0.111	-0.932 * *	0.924 * *	0.999 * *	0.225
植株氮含量 Plant N content/%	-0.435 *	-0.759 * *	0.324	0.541 *	-0.574 *
开花前氮同化量 N assimilation before anthesis/(kg·hm ⁻²)	0.015	-0.476 *	0.484 *	0.446 *	0.001
开花后氮同化量 N assimilation after anthesis/(kg·hm ⁻²)	-0.539 *	-0.676 * *	0.141	0.723 *	-0.701 * *

2.4 裸燕麦花后氮素同化及转运的回归分析

氮流效率是表征裸燕麦有效利用氮肥形成籽粒蛋白质能力高低的指标,在本研究中氮流效率与籽粒氮含量二者极显著正相关,表明氮流效率可作为评判裸燕麦籽粒蛋白含量高低的主要参数之一;氮流效率与花后氮同化量、氮转运量均呈显著正相关,表明裸燕麦花后氮素的同化与转运特性是影响其蛋白质含量高低的主要因素。对成熟期的籽粒氮含量与花后氮同化量、氮转运量进行回归分析,分别得到

如下回归方程(图 2):

$$Y = 0.9529X_a + 72.291, r = 0.7233 * *$$
$$Y = 1.3944X_b + 25.419, r = 0.7053 * *$$

3 讨 论

3.1 氮效率指标定义

作物氮效率最经典的定义是 Moll 等^[12]提出的,即将氮效率定义为籽粒产量和土壤供氮水平的比值,且将氮效率分解为吸收效率与利用效率两个构

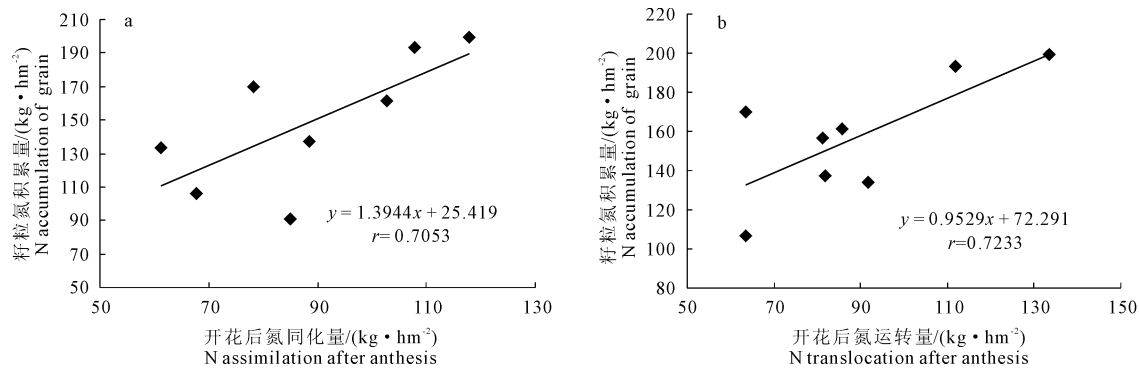


图 2 花后氮同化量(a)和氮运转量(b)与籽粒氮积累量的关系

Fig.2 Relationships between grain N accumulations and assimilations (a) and N translocations (b) after anthesis

成因素:(1) 吸收效率是成熟期地上部积累的总氮量与土壤供氮水平的比值;(2) 利用效率是籽粒产量与地上总氮量的比值,即氮效率等于吸收效率与利用效率的乘积。此处氮素利用效率是以籽粒产量为基础的利用效率(Gute,G代表 grain yield,ute代表 utilization efficiency),它仅反映了利用效率的一个方面,若要全面衡量利用效率,还应该包括以生物量为基础的利用效率(Bute,B代表 biomass)和以籽粒蛋白质产量为基础的利用效率(Pute,P代表 grain protein yield)。

本文土壤氮生产力(NPS)指标是根据 Moll 氮效率定义所设,等于氮素吸收效率(NRE)与 Gute(即本文 NPP 指标)的乘积。氮收获指数(NHI)在粗蛋白意义上可表述为 Pute。氮流效率(NFE)等于 NHI 与 NRE 的乘积,是表述氮效率的又一个综合指标,可望在高蛋白含量优质燕麦资源鉴定方面发挥作用。由于本研究侧重于氮效率对裸燕麦籽粒产量和蛋白产量的影响,故未将 Bute 纳入本研究,Bute 可作为饲用燕麦氮效率研究的指标。

3.2 氮效率指标之间的关系

不同氮效率指标从不同角度反应了裸燕麦对氮素的吸收与利用情况。NRE 与不同品种裸燕麦的根系发育^[24]及根系的吸收动力学^[25]有关,具有高 NRE 是具有高 NPP 的基础;高 NRE 品种提高了作物对土壤中氮的吸收,既可在经济上少施肥、降能耗又可在生态意义上减少氮肥对环境的污染。NPP 和 NHI 作为考量作物对吸收的氮素进行有效利用的两个指标,与氮素在植株体内的积累、同化、转运和再分配有关。NPS 和 NFE 作为可综合反映裸燕麦对土壤中氮素吸收与利用的指标,无论对氮高效品种选育还是对田间生产的氮肥运筹都具有重要应用价值。

3.2.1 氮素吸收与利用效率指标 童依平等^[15-16]1996—1999 年 3 a 大田试验研究表明,无论低氮或

高氮条件,籽粒产量和生物量均与吸氮量呈显著或极显著正相关。本研究结果表明,NRE 与产量(NPS)显著正相关,与蛋白质产量(NFE)呈极显著正相关,与 NPP 极显著负相关,因此在裸燕麦高产栽培条件下,NRE 高的品种产量尤其是蛋白质含量相对较高,这对优质加工用裸燕麦原料生产极为重要,在现有生产条件下,选择 NRE 高的品种在得到高蛋白原料的同时也能获得较高的产量。

3.2.2 氮素的积累、同化、再分配指标 有关籽粒氮素积累、同化与再分配关系的研究很多。Peterson 等^[17]研究发现氮转运效率高的燕麦品种中既有高蛋白含量品种也有低蛋白含量品种;Cox 等^[18]研究认为植株总氮同化量和花后氮同化量显著影响小麦籽粒蛋白质产量,但与籽粒蛋白质含量无关。植株总吸氮量和花后氮同化量对籽粒氮素积累的影响很大^[21]。本研究结果显示,花后氮同化量和氮运转量与籽粒氮积累量相关性显著,而花后氮同化量与 NPP、NPS 极显著负相关。因此,在裸燕麦生产的氮肥运筹中,为获得较高蛋白质产量,应重视调动前期营养器官中的氮素向籽粒的转运,并加强中后期的氮肥调控以延缓植株衰老,提高裸燕麦花后氮素同化能力;为获得较高产量,应充分满足花前期的氮素供应以促使植株营养器官积累较多氮素,并适当控制中后期氮肥供应以使前期积累的氮素发挥最大生产效能。

Dhugga 等^[26]在相同供氮水平下对不同品种小麦和黑麦的研究结果显示品种间籽粒氮素含量差异比其它器官高 48% ~ 75%,据此认为氮分配效率存在基因型差异。Przulj 等^[27]研究表明,大麦的 NHI 在品种间及年际间均变化较大。Rouanet 等^[28]提出氮分配效率在可持续农业生产体系中具有重要地位。但本研究结果显示,相对其他指标而言,NHI 在裸燕麦品种间变异不大,基因型效应不显著,表明通过育种途径难以进行改良,另外与小麦^[21]、水

稻^[29]、玉米^[30]等作物相比,裸燕麦 NHI 已达到较高水平,因此,目前生产条件下应主要通过氮肥调控进行改善。

裸燕麦在本试验条件下 NRE 和 NFE 的品种间变异大,基因型效应显著,为氮高效及高蛋白育种提供了理论基础。另有研究结果显示,作物氮效率差异受环境与基因型互作的影响显著^[21-23],本研究将在此次基础上继续在不同生态地区不同年际间对多类型种质的氮效率进行研究,以期获得对裸燕麦氮营养特性的科学认识。

参 考 文 献:

[1] 田长叶,郝瑞秀,赵世锋,等.燕麦营养与医疗价值及其保健食品开发[J].张家口农专学报,2003,(4):12-15.

[2] Hirel B, Bertin P, Quillere I, et al. Towards a better understanding of the genetic and physiological basis for nitrogen use efficiency in maize [J]. Plant Physiology, 2001,125(3):1258-1270.

[3] 张福锁.环境胁迫与植物营养[M].北京:北京农业大学出版社,1993:356.

[4] Baligar P N, Kaliwal B B. Induction of gonadal toxicity to female rats after chronic exposure to mancozeb[J]. Industrial Health, 2001,39(3):235-243.

[5] 鲍根生,周青平,韩志林.氮、钾不同配比施肥对燕麦产量和品质的影响[J].草业科学,2008,(10):48-53.

[6] 许国芬,周青平,颜红波,等.施氮水平对燕麦产量与养分吸收的影响[J].中国草地学报,2009,(6):20-24.

[7] 马雪琴,赵桂琴,龚建军.高寒牧区播期和施氮对不同燕麦品种氮素利用的作用[J].草业科学,2008,(5):36-41.

[8] Welch R W, Leggett J M. Nitrogen content, oil content and oil composition of oat cultivars (*A. sativa*) and wild avena species in relation to nitrogen fertility, yield and partitioning of assimilates[J]. Journal of Cereal Science, 1997,26(1):105-120.

[9] Steenbjerg F, Larsen I, Jensen I, et al. The effect of nitrogen and simazine on the dry-matter yield and amino acid content of oats and on the absorption and utilization of various plant nutrients[J]. Plant and Soil, 1972,36(1-3):475-496.

[10] 纪亚君,周青平,王 朋,等.氮肥对燕麦生长速率的影响[J].青海畜牧兽医杂志,2013,(1):4-7.

[11] Isfan D. Genotypic variability for physiological efficiency index of nitrogen in oats[J]. Plant and Soil, 1993,154(1):53-59.

[12] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agronomy Journal, 1982,74(3):562-564.

[13] 童依平,李振声.农作物 N 素利用效率基因型差异及其机理[J].生态农业研究,1999,7(2):23-27.

[14] 鲍士旦.土壤农化学分析[M].北京:中国农业出版社,2005:

264.

[15] 童依平,李振声.不同小麦品种吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究:I.吸收和利用效率对产量的影响[J].西北植物学报,1999,19(2):270-277.

[16] 童依平,李继云,李振声.不同小麦品种(系)吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究 II.影响吸收效率的因素分析[J].西北植物学报,1999,(3):393-401.

[17] Peterson D M, Youngs V L, Schrader L E, et al. Assimilation and remobilization of nitrogen and carbohydrates in oats, especially as related to groat protein concentration [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1975,55(1):19-28.

[18] Cox M C, Qualset C O, Rains D W. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. III. Nitrogen translocation in relation to grain yield and protein [J]. Crop Science, 1986,26(4):737-740.

[19] Cox M C, Qualset C O, Rains D W. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. I. Dry matter and nitrogen accumulation[J]. Crop Science, 1985,25(3):430-435.

[20] 杜金哲,李文雄,胡尚连,等.春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与籽粒产量和蛋白质含量的关系[J].作物学报,2001,27(2):253-260.

[21] 孙传范,戴廷波,荆 奇,等.小麦品种氮利用效率的评价指标及其氮营养特性研究[J].应用生态学报,2004,(6):983-987.

[22] Martinez M F, Arelovich H M, Wehrhahne L N. Grain yield, nutrient content and lipid profile of oat genotypes grown in a semiarid environment[J]. Field Crops Research, 2010,116(1-2):92-100.

[23] Barraclough P B, Howarth J R, Jones J, et al. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement[J]. European Journal of Agronomy, 2010,33(1):1-11.

[24] Schenk M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level [J]. Plant and Soil, 1996,181(1):131-137.

[25] Cacco G, Ferrari G, Saccomani M. Pattern of sulfate uptake during root elongation in maize: its correlation with productivity[J]. Physiologia Plantarum, 1980,48(3):375-378.

[26] Dhugga K S, Waines J G. Analysis of nitrogen accumulation and use in bread and durum wheat [J]. Crop Science, 1989,29(5):1232-1239.

[27] Przulj N, Momcilovic V. Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barley: II . Nitrogen translocation[J]. European Journal of Agronomy, 2001,15(4):255-265.

[28] Rouanet M, Luis J. Physiological nitrogen use efficiency in annual crops for sustainable agriculture[J]. Agricultura Tecnica, 1994,54.

[29] 程建峰,戴廷波,曹卫星,等.不同氮收获指数水稻基因型的氮代谢特征[J].作物学报,2007,33(3):497-502.

[30] 卢艳丽,陆卫平,刘小兵,等.不同基因型糯玉米氮素吸收利用效率的研究 III.氮素分配转移特性的基因型差异[J].植物营养与肥料学报,2007,13(1):86.