

常 晓,王小博,代华龙,等. 不同氮肥利用效率类型玉米自交系的源、库特征及其筛选指标[J].江苏农业学报,2020,36(5):1098-1104.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.004

不同氮肥利用效率类型玉米自交系的源、库特征及其筛选指标

常 晓¹, 王小博¹, 代华龙², 吴 嫚¹, 杨兆生¹, 李 健¹

(1.中国农业科学院棉花研究所/棉花生物学国家重点实验室,河南 安阳 455000; 2.驻马店市气象局,河南 驻马店 463000)

摘要: 在前期利用氮高效综合评价值将 47 个玉米自交系划分为 4 类不同氮肥利用效率类型的基础上,通过测定不同氮肥利用效率类型玉米自交系的叶面积指数、净同化率、单位叶面积小花数、单位叶面积库容量等源、库指标,研究不同氮肥利用效率类型玉米自交系源、库指标的差异及筛选影响氮肥利用效率的主要源、库指标。结果表明,吐丝期和成熟期叶面积指数及干物质积累量、灌浆结实期净同化率、库容量、单位叶面积小花数、单位叶面积库容量均表现为低氮高效型>低氮中效型>低氮低效型>低氮敏感型。相关性分析结果表明,吐丝期和成熟期叶面积指数及干物质积累量、灌浆结实期净同化率、库容量、单位叶面积小花数、单位叶面积库容量与氮高效综合评价值均呈显著正相关。多元逐步回归分析和通径分析结果表明,灌浆结实期净同化率和成熟期叶面积指数对氮高效综合评价值影响较大,因此这 2 个指标可作为评价氮高效型玉米材料的主要源、库指标。

关键词: 玉米; 自交系; 氮肥利用效率; 源; 库

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)05-1098-07

Characteristics of source and sink in maize inbred lines with different nitrogen use efficiencies and their screening indices

CHANG Xiao¹, WANG Xiao-bo¹, DAI Hua-long², WU Man¹, YANG Zhao-sheng¹, LI Jian¹

(1. Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang 455000, China; 2. Zhumadian Meteorological Bureau, Zhumadian 463000, China)

Abstract: This research was carried out on the basis of the early research which divided 47 maize inbred lines into four different types of nitrogen use efficiencies by comprehensive evaluation value of efficient nitrogen use (D value). By measuring source and sink indices such as leaf area index (LAI), net assimilation rate, panicles per unit leaf area and sink capacity per unit leaf area, the difference of source and sink indices was studied and the main indices of source and sink influencing nitrogen use efficiency were screened. The results showed that LAI and plant dry matter accumulation at silking stage and maturing stage, net assimilation rate, sink capacity, panicles per unit leaf area and sink capacity per unit leaf area at filling stage all presented as high efficient in low nitrogen > middle efficient in low nitrogen > low efficient in low nitrogen > sensitive in low nitrogen. The results of correlation analysis showed that LAI and dry matter accumulation at silking stage and maturing stage, net assimilation rate, sink capacity, panicles per unit leaf area and sink capacity per unit leaf area at filling

stage had significant positive correlation with D value. The results of multiple stepwise regression analysis and path analysis showed that the net assimilation rate at filling stage and LAI at maturity stage had a great influence on the comprehensive evaluation value of efficient nitrogen use, so the two indices can be used as the main source and sink indices in evaluating the efficient nitrogen use maize materials.

收稿日期:2020-04-09

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610-162020051004,1610162019050906)

作者简介:常 晓(1989-),女,河南安阳人,硕士,助理研究员,研究方向为作物抗逆生理。(E-mail)cx2282179@163.com

通讯作者:李 健,(E-mail)lijian84826@163.com

Key words: maize; inbred line; nitrogen use efficiency; source; sink

氮是玉米生长发育所需的重要营养元素^[1-4]。据统计,中国目前氮肥的当季利用率仅为 30%~40%^[5],增施氮肥可以有效提高玉米产量,但生产中氮肥经常会过量施用,不仅造成玉米减产,氮肥利用效率降低,也造成了环境污染等一系列问题^[6]。提高作物吸收利用氮素的潜力是提高氮素利用效率的最佳途径^[7]。有研究结果表明,不同类型玉米品种的氮素吸收量存在显著差异,且氮高效型高产玉米品种在高氮和低氮条件下的氮肥利用效率均最高^[8-9],因此选育氮高效型高产玉米品种成为当下的研究热点。氮高效指标的筛选是氮高效型品种选育及氮高效栽培管理的前提,在氮高效指标的选择上,董鲁明^[10]研究发现在胁迫条件下玉米的籽粒产量是最重要的评价指标;李强等研究指出,叶面积、单株干物质质量、地上部干物质质量、氮积累量、根体积、根干物质质量、根冠比 7 个指标可作为苗期耐低氮水平的筛选指标^[11]。尽管前人做了大量的研究,也从中筛选出了氮高效的指标,但筛选出的指标不统一,广适性有待提升,主要原因可能与当地区域条件及研究选用的材料间差异不显著有关。本团队前期研究结果表明利用氮高效综合评价值(*D* 值)可以很好地评价玉米自交系的氮肥利用效率^[11],另外源库关系作为作物产量形成的基础理论之一,不同氮肥利用效率类型玉米自交系的源、库表现出不同差异,因此本研究在利用氮高效综合评价值将 47 个玉米自交系划分为低氮高效型(I类)、低氮中效型(Ⅱ类)、低氮低效型(Ⅲ类)和低氮敏感型(Ⅳ类)4 类不同氮肥利用效率类型的基础上,从源库关系的角度研究低氮胁迫下不同氮肥利用效率类型玉米自交系源库相关指标的差异,探索以源、库相关指标作为氮肥利用效率筛选指标的可行性,为玉米氮肥利用效率遗传改良及氮高效栽培管理提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2016 年和 2017 年夏玉米生长季在中国农业科学院棉花研究所安阳试验基地开展。试验地土壤为潮土,0~20 cm 土壤的基础肥力见表 1。试验采用裂区设计,以前期试验所选用的 47 个不同遗传背景玉米自交系为主区,各自交系氮肥利用效率

类型来源于前期试验中利用氮高效综合评价值(*D* 值)聚类分析的结果(表 2)。以不同施氮水平作为副区,施氮水平设置不施氮(N0)、低氮(N90,施 90 kg/hm²纯氮)、和正常氮(N180,施 180 kg/hm²纯氮)3 种处理方式。本研究主要分析低氮胁迫(N90)处理下 4 类供试玉米材料的源库变化规律。每份供试玉米自交系材料种植 4 行,行长 5.0 m,行距 0.6 m,小区面积 12 m²,种植密度 1 hm² 75 000 株,3 次重复。于 2016 年 6 月 10 日和 2017 年 6 月 7 日播种,施氮处理将 40%氮肥作底肥,7 叶展时 60%氮肥作追肥补施,其他田间管理措施同一般大田,收获分别在 2016 年 10 月 3 日和 2017 年 10 月 1 日。

表 1 试验地土壤基础肥力

Table 1 Basic soil fertility of experimental fields

土壤有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH
17.45	0.98	32.48	10.52	138.56	7.67

1.2 测定项目与方法

叶面积指数和植株干物质的测定:于吐丝期和成熟期,每个小区选择具有代表性的植株 3 株,分别测量叶片的长和宽,用叶面积系数法计算叶面积,即,叶面积=叶长×叶宽×0.75,叶面积指数(*LAI*)=总叶面积/土地面积。取样植株分为茎鞘、叶片、籽粒,于烘箱内 105 ℃ 杀青 40 min 后 75 ℃ 烘至恒质量,再分别称其干物质质量。

产量及产量构成的测定:于成熟期时,收获中间 2 行果穗,带回室内进行考种,随机选取 5 穗,进行行数、行粒数、千粒质量和含水量的测定,用 PM-8188 测定籽粒的含水量,按标准含水量(14%)计算产量。

氮含量的测定:样品粉碎处理后用于测定氮含量,籽粒和植株的氮含量用 Kjeltac 8200 全自动凯氏定氮仪测定。氮积累量=干物质质量×氮含量。

吐丝期到成熟期净同化率的计算:净同化率= $(m_s - m_t) / [(LAI_s - LAI_t) \times (D_t - D_s)]$,公式中 m_s 为吐丝期干物质积累量, m_t 为成熟期干物质积累量, LAI_s 为吐丝期叶面积指数, LAI_t 为成熟期叶面积指数, $(D_t - D_s)$ 是吐丝期到成熟期的间隔天数。

单位叶面积小花数的计算:单位叶面积小花

数=穗粒数/吐丝期叶面积,穗粒数=行数×行粒数。

库容量的计算:库容量为单株籽粒产量。

单位叶面积库容量的计算:单位叶面积库容量=库容量/吐丝期叶面积。

单位干物质库容量的计算:单位干物质库容量=库容量/吐丝期干物质积累量。

单位氮素库容量的计算:单位氮素库容量=库容量/吐丝期氮积累量。

表 2 玉米试验材料的来源及氮高效综合评价价值

Table 2 Origins of the tested maize and the efficient and comprehensive evaluation value of nitrogen use efficiency

类型	来 源	氮高效综合评价价值	类型	来 源	氮高效综合评价价值
I	HCL645×C7-2	0.715	II	ZY89	0.562
I	PH6WC×D1798Z	0.705	III	CT3354	0.483
I	PH6WC	0.744	III	9058	0.491
I	PH6WC×郑 58	0.709	III	22	0.486
I	XL21×PH6WC	0.653	III	ZY701	0.502
I	D1798Z×521	0.717	III	四-287	0.466
I	美杂二环系×郑 58	0.657	III	CT3566	0.462
I	郑 58	0.694	III	585	0.482
I	HCL645×C7-2×单 598	0.670	III	浚 92-8	0.496
I	DH351×郑 58	0.652	III	四-144	0.467
I	外杂二环系	0.659	IV	C7-2×PH4CV	0.418
II	外杂二环系×521	0.538	IV	HCL645	0.426
II	ZY18	0.531	IV	HC212	0.358
II	ZY608	0.592	IV	HC141	0.356
II	美杂二环系×PH6WC	0.595	IV	ZY8	0.399
II	外杂二环系×C7-2	0.539	IV	ZY305	0.389
II	HT60	0.547	IV	XL21	0.326
II	D5168	0.586	IV	PH4CV×PHB1M	0.402
II	HCL645×DH392	0.597	IV	ZY118	0.378
II	ZY10	0.603	IV	ZY127	0.408
II	DH382	0.563	IV	H2671	0.434
II	NS501	0.533	IV	D1798Z	0.437
II	C7-2	0.558	IV	ZY138	0.429
II	PHM10	0.518			

I 类:低氮高效型; II 类:低氮中效型; III 类:低氮低效型; IV 类:低氮敏感型。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 进行整理,采用 SPSS 20.0 进行方差分析、回归分析和相关分析。图表的数据为平均值±标准差。

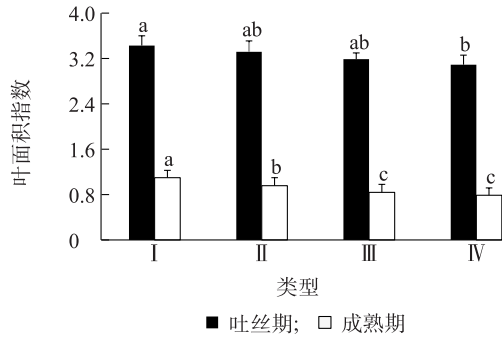
2 结果与分析

2.1 不同氮肥利用效率类型玉米自交系源指标的差异

2.1.1 叶面积指数的差异 计算相同氮肥利用效率

类型玉米自交系吐丝期和成熟期叶面积指数的平均值。低氮高效型(I类)、低氮中效型(II类)、低氮低效型(III类)和低氮敏感型(IV类)玉米自交系吐丝期和成熟期叶面积指数呈逐渐降低趋势(图 1),I类玉米自交系吐丝期叶面积指数分别比II、III、IV类玉米自交系分别高 3.61%、7.84%和 11.33%,I类玉米自交系吐丝期叶面积指数显著高于IV类玉米自交系;I类玉米自交系成熟期叶面积指数比II、III、IV类玉米自交系分别高 14.58%、30.95%和 39.24%,I类玉米自交系成熟

期叶面积指数显著高于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系。分析结果表明,生育期后期低氮低效型玉米自交系叶面积下降快,低氮高效型玉米自交系叶面积下降慢,在成熟期低氮高效型玉米自交系叶面积指数显著高于低氮低效型玉米自交系。



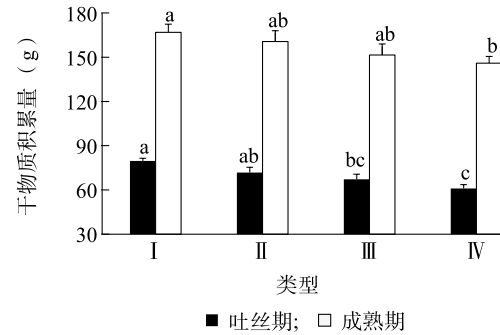
I类:低氮高效型;Ⅱ类:低氮中效型;Ⅲ类:低氮低效型;Ⅳ类:低氮敏感型。

图1 不同氮肥利用效率类型玉米自交系吐丝期和成熟期叶面积指数的差异

Fig.1 Difference of leaf area indices (LAI) in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies at silking stage and maturing stage

2.1.2 干物质积累量的差异 由图2可知,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系吐丝期干物质积累量分别为79.36 g、71.77 g、67.28 g和60.98 g,Ⅰ类玉米自交系比Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类分别高10.58%、17.95%和30.14%,且Ⅰ类玉米自交系显著高于Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系;Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系成熟期干物质积累量分别为167.87 g、160.68 g、151.42 g和145.95 g,Ⅰ类玉米自交系比Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类分别高4.47%、10.86%和15.02%,Ⅰ类玉米自交系与Ⅳ类玉米自交系差异显著。结果表明,低氮高效型(Ⅰ类)玉米自交系在吐丝期和成熟期的干物质积累量均显著高于低氮敏感型(Ⅳ类)玉米自交系。

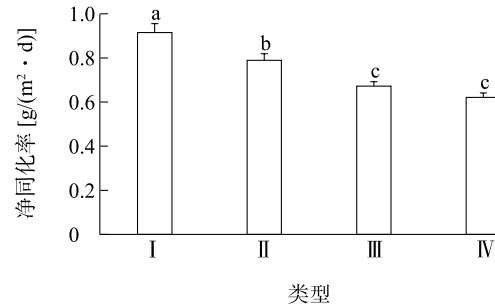
2.1.3 灌浆结实期净同化率的差异 由图3可知,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系灌浆结实期净同化率分别为0.92 g/(m²·d)、0.79 g/(m²·d)、0.67 g/(m²·d)和0.62 g/(m²·d),Ⅰ类玉米自交系显著高于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系,分别高16.48%、36.76%和47.99%。说明低氮高效型(Ⅰ类)玉米自交系灌浆结实期净同化率较高,低氮中效型(Ⅱ类)、低氮低效型(Ⅲ类)和低氮敏感型(Ⅳ类)玉米自交系灌浆结实期净同化率较低。



Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ见图1。

图2 不同氮肥利用效率类型玉米自交系吐丝期和成熟期干物质积累量的差异

Fig.2 Difference of plant dry matter accumulation in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies at silking stage and maturing stage



Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ见图1。

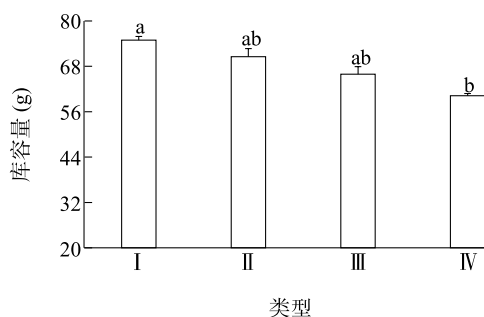
图3 不同氮肥利用效率类型玉米自交系灌浆结实期净同化率的差异

Fig.3 Difference of net assimilation rate in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies during grain filling stage

2.2 不同氮肥利用效率类型玉米自交系库容量及其构成的差异

2.2.1 库容量的差异 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系的库容量呈降低趋势(图4),分别为75.40 g、70.55 g、65.93 g和60.24 g,Ⅰ类玉米自交系比Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系高6.87%、14.36%和25.17%,Ⅰ类玉米自交系与Ⅳ类玉米自交系间差异显著。说明低氮高效型(Ⅰ类)玉米自交系库容量较大。

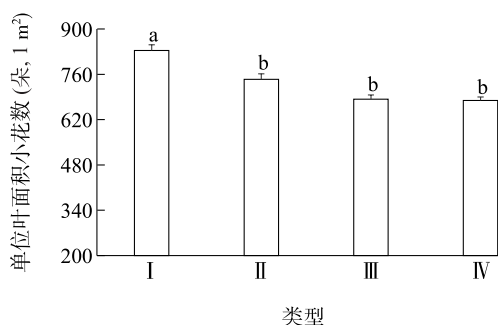
2.2.2 单位叶面积小花数的差异 由图5可知,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系单位叶面积小花数分别为1 m² 856.59朵、744.65朵、682.85朵和678.88朵,Ⅰ类玉米自交系显著高于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类玉米自交系,分别高15.03%、25.44%和26.18%。说明低氮高效型(Ⅰ类)玉米自交系单位叶面积小花数较多。



I、II、III、IV见图1。

图4 不同氮肥利用效率类型玉米自交系库容量的差异

Fig.4 Difference of sink capacity in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies



I、II、III、IV见图1。

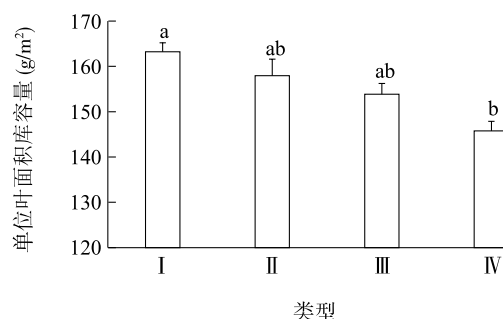
图5 不同氮肥利用效率类型玉米自交系单位叶面积小花数的差异

Fig.5 Difference of panicles per unit leaf area in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies

2.2.3 单位叶面积库容量的差异 不同氮肥利用效率类型玉米自交系单位叶面积库容量的变化与库容量的变化规律一致(图6)。I、II、III、IV类玉米自交系单位叶面积库容量分别为 164.08 g/m²、157.93 g/m²、153.83 g/m²和 145.77 g/m², I类比II、III、IV类分别高3.90%、6.67%和12.56%, I类玉米自交系显著高于IV类玉米类自交系。说明低氮高效型(I类)玉米自交系单位叶面积库容量较大。

2.2.4 单位干物质库容量的差异 由图7可知, I、II、III、IV类玉米自交系单位干物质库容量分别为0.948、0.979、0.977和0.990,各玉米自交系间无显著差异。说明单位干物质库容量受氮肥利用效率影响较小,在低氮高效型(I类)、低氮中效型(II类)、低氮低效型(III类)和低氮敏感型(IV类)玉米自交系间无差异。

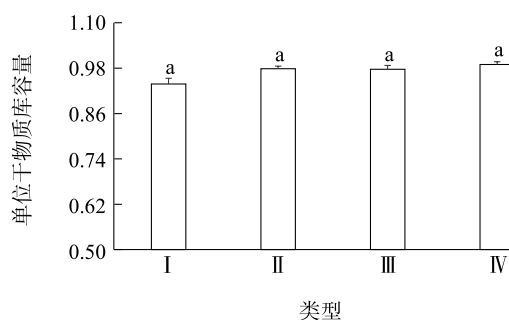
2.2.5 单位氮素库容量的差异 由图8可知, I、II、III、IV类玉米自交系单位氮素库容量分别为



I、II、III、IV见图1。

图6 不同氮肥利用效率类型玉米自交系单位叶面积库容量的差异

Fig.6 Difference of sink capacity per unit leaf area in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies



I、II、III、IV见图1。

图7 不同氮肥利用效率类型玉米自交系单位干物质库容量的差异

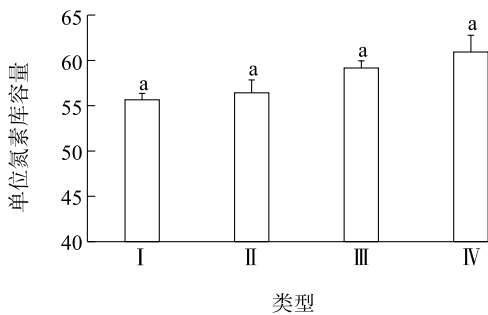
Fig.7 Difference of sink capacity per unit dry plant weight in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies

56.67、56.42、59.16和60.93,各玉米自交系间无显著差异。说明单位氮素库容量不受氮肥利用效率的影响,在低氮高效型(I类)、低氮中效型(II类)、低氮低效型(III类)和低氮敏感型(IV类)玉米自交系间无差异。

2.3 影响氮肥利用效率综合评价的主要源、库指标

相关性分析结果表明,氮高效综合评价(D值)与吐丝期和成熟期叶面积指数、吐丝期和成熟期干物质质量、灌浆结实期净同化率、库容量、单位叶面积小花数、单位叶面积库容量均呈显著正相关关系(表3),随着吐丝期和成熟期叶面积指数、吐丝期和成熟期干物质质量、灌浆结实期净同化率、库容量、单位叶面积小花数、单位叶面积库容量的增大,氮高效综合评价显著升高。

为确定影响氮肥利用效率的主要源、库指标,对



I、II、III、IV见图1。

图8 不同氮肥利用效率类型玉米自交系单位氮素库容量的差异

Fig.8 Difference of sink capacity per unit nitrogen accumulated in maize inbred lines with different types of nitrogen use efficiencies

各源、库指标与氮高效综合评价价值进行多元逐步回归分析。结果表明,灌浆结实期净同化率(x_1)、单位干物质库容量(x_2)、成熟期叶面积指数(x_3)和单位氮素库容量(x_4)对氮高效综合评价价值有显著影响($Y = -0.543 + 0.471x_1 - 0.540x_2 + 0.309x_3 - 0.002x_4$, $R^2 = 0.908$)。由表4可知,灌浆结实期净同化率和成熟期叶面积指数对氮高效综合评价价值的直接途径系数较大,而其他指标的直接途径系数较小,说明灌浆结实期净同化率和成熟期叶面积指数对氮高效综合评价价值影响较大,因此灌浆结实期净同化率和成熟期叶面积指数可以作为评价玉米氮肥利用效率的主要源、库指标。

表3 源、库指标与氮高效综合评价价值(D值)的相关性
Table 3 Correlation of source and sink indices with comprehensive evaluation value of efficient nitrogen use (D value)

指 标	与 D 值的相关系数
吐丝期叶面积指数	0.418 **
成熟期叶面积指数	0.684 **
吐丝到成熟叶面积指数减少量	0.084
吐丝期干物质质量	0.583 **
成熟期干物质质量	0.355 *
灌浆结实期净同化率	0.733 **
库容量	0.430 **
单位叶面积小花数	0.426 **
单位叶面积库容量	0.354 *
单位干物质库容量	-0.306 *
单位氮素库容量	-0.272

* 和 ** 分别表示达到 0.05 显著相关和达到 0.01 极显著相关。

表4 源、库指标对氮高效综合评价价值(D值)的直接途径系数
Table 4 Direct path coefficients of source and sink indices to comprehensive evaluation value of efficient nitrogen use (D value)

指 标	与 D 值的直接途径系数
灌浆结实期净同化率	0.623
成熟期叶面积指数	0.458
单位干物质库容量	-0.312
单位氮素库容量	-0.157

3 讨论

源库关系是作物产量研究中的热点之一^[12]。源代表植株器官对光能的吸收利用,库代表植株潜在的产量形成,源和库两类器官的协调程度对作物产量的形成至关重要^[13-15]。对不同氮肥利用效率类型玉米自交系叶面积指数的分析结果表明,低氮高效型玉米自交系在吐丝期和成熟期叶面积指数均高于低氮中效型、低氮低效型和低氮敏感型,且显著高于低氮敏感型。叶片是玉米植株截获光能并将光能转化为化学能的重要器官,是冠层结构最重要的组成部分,其光合同化产物是产量形成的物质基础^[16],生育后期低氮低效型玉米自交系的总叶面积降低幅度大,而低氮高效型玉米自交系的总叶面积降低幅度小,因此生育后期低氮高效型玉米自交系的叶片光合作用要高于低氮低效型玉米自交系。对于干物质积累量和净同化率而言,低氮高效型玉米自交系在吐丝期和成熟期均有较高的干物质积累量和净同化率,保证了低氮高效型玉米自交系可以有丰富的源供应。

玉米的产量形成一方面取决于叶源碳水化合物的供应能力,另一方面取决于籽粒库容量对碳水化合物的转化与积累能力^[17-19]。本研究结果表明,低氮高效型玉米自交系在库容量、单位面积小花数和单位叶面积库容量上高于低氮低效型玉米自交系,说明低氮高效型玉米自交系具有库容量大的特点,利于碳水化合物的转化与积累,这与单玉华等^[20]的研究结果一致,即单位面积库容量大的品种拥有较高的氮素籽粒生产效率。

本研究对源、库指标与氮高效综合评价价值进行相关分析和途径分析的结果表明,氮高效综合评价价值与吐丝期和成熟期叶面积指数、吐丝期和成熟期

干物质质量、灌浆结实期净同化率、库容量、单位叶面积小花数、单位叶面积库容量均呈显著正相关关系,灌浆结实期净同化率和成熟期叶面积指数对氮高效综合评价值的直接通径系数均较大,由此可以推断灌浆结实期净同化率和成熟期叶面积指数可以作为评价玉米氮肥利用效率的主要源、库指标。前人研究结果表明,源和库对玉米产量的限制作用与种植密度和玉米品种有关,低密度下库大于源,高密度下源大于库^[21]。本试验的种植密度较大,可能是源类指标对氮高效综合评价值影响较大的原因。源和库谁为限制产量的因素因玉米品种而存在差异^[22-24],不同玉米品种有各自的库源关系特点,应根据玉米品种确定相应的栽培措施,以达到库大源足,实现高产高效^[25]。

参考文献:

- [1] 李强,罗延宏,谭杰,等. 玉米杂交种苗期耐低氮指标的筛选与综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1190-1199.
- [2] 李文龙,吕英杰,刘笑鸣,等. 氮肥对不同氮效率玉米氮代谢酶和氮素利用及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1829-1835.
- [3] 常程,张书萍,刘晶,等. 氮肥对辽宁春玉米品种氮素吸收利用的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(5): 143-149.
- [4] 高文俊,杨国义,高新中,等. 氮磷钾肥对青贮玉米产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2018(5): 144-149.
- [5] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000(4): 188-193.
- [6] PEREIRA C C, AZEVEDO S L, PASSOS R R, et al. Rice varieties exhibit different mechanisms for nitrogen use efficiency (NUE)[J]. Australian Journal of Crop Science, 2016, 10(3): 342-352.
- [7] 江立庚,戴廷波,韦善清,等. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 466-471.
- [8] 王艳,米国华,陈范骏,等. 玉米自交系氮效率基因型差异的比较研究[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(4): 361-365.
- [9] 崔文芳,高聚林,王志刚,等. 玉米自交系氮效率基因型差异分析[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 6-12.
- [10] 董鲁明. 不同类型玉米品种氮高效生理特性的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2009.
- [11] 常晓,郭志军,王小博,等. 玉米自交系氮高效指标的筛选及综合评价[J]. 玉米科学, 2019, 27(1): 17-24.
- [12] 陈琛,于小凤,赵步洪,等. 水稻大库容遗传群体源库性状、物质生产与分配的基本特征[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1009-1014.
- [13] 吕丽华,王璞,鲁来清. 不同冠层结构下夏玉米产量形成的源库关系[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 66-71.
- [14] 黄智鸿,魏东,冯安荣,等. 冀西北地区超高产玉米与普通玉米源库特征及其关系[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 111-115.
- [15] 吕丽华,王慧军,王璞. 不同施氮量下夏玉米产量形成的源库关系[J]. 华北农学报, 2010, 25(2): 194-199.
- [16] 李明,李文雄. 玉米产量形成与源库关系[J]. 玉米科学, 2006, 14(2): 67-70.
- [17] 高天平,张春,刘文涛,等. 秸秆还田方式与灌溉量对土壤碳水环境和玉米产量的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(6): 108-112.
- [18] 张奇,张振华,刘丽珠,等. 增施有机肥对黄泛冲积区贫瘠土壤养分和玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 271-276.
- [19] 张超男,赵会杰,王俊忠,等. 不同施肥方式对夏玉米碳水化合物代谢关键酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 54-58.
- [20] 单玉华,王海候,龙银成,等. 不同库容量类型水稻在氮素吸收利用上的差异[J]. 扬州大学学报, 2004, 25(1): 41-45.
- [21] 薛吉全,马国胜,路海东,等. 密度对不同类型玉米源库关系及产量的调控[J]. 西北植物学报, 2001, 21(6): 1162-1168.
- [22] BARNETT K H, PEARCE R B. Source-sink ratio alteration and its effect on physiological parameters in maize[J]. Crop Science, 1983, 23(2): 294-299.
- [23] UHART S A, ANDRADE F H. Source-sink relationship in maize grown in a cool temperate area[J]. Agronomy, 1991, 11(10): 863-875.
- [24] 戴明宏,赵久然,杨国航,等. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1585-1595.
- [25] 杨利华,张丽华,杨世丽,等. 不同株高玉米品种部分群体质量指标对种植密度的反应[J]. 华北农学报, 2007, 22(6): 139-146.

(责任编辑:陈海霞)