

不同类型玉米品种子粒产量与品质对低氮胁迫的响应

温涛^{1,2}, 穆心愿², 刘天学¹, 赵霞², 丁勇², 曹丽茹²,
鲁晓民², 唐保军², 夏来坤²

(1. 河南农业大学农学院, 郑州 450046; 2. 河南省农业科学院粮食作物研究所/河南省玉米绿色精准生产国际联合实验室, 郑州 450002)

摘要: 以18个玉米品种为试验材料, 以正常施氮(NPK)为对照, 研究低氮胁迫(PK-N)对玉米子粒产量与品质的影响, 并对玉米品种进行氮效率类型划分和评价。结果表明, 低氮胁迫导致玉米穗粒数显著减少而产量降低, 子粒淀粉、蛋白质和赖氨酸含量显著降低而品质下降。相关分析表明, 两个氮肥处理下, 子粒产量与穗粗、行粒数、穗粒数、穗粒重均呈显著正相关, 淀粉含量与蛋白质、脂肪、赖氨酸含量呈不同程度的负相关, 蛋白质、脂肪和赖氨酸含量三者之间均呈不同程度的正相关, 淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸产量均与子粒产量呈极显著正相关。通径分析表明, 穗长、穗粗和行粒数是影响玉米子粒产量的主要穗部性状, 子粒产量是影响玉米淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸产量的主要因素。根据耐低氮综合评价D值和子粒产量, 筛选出郑单819、郑单568和郑单232等高产耐低氮型品种。

关键词: 玉米; 子粒产量; 品质; 低氮胁迫; 熵权法; 通径分析

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Response of Grain Yield and Quality to Low-nitrogen Stress in Different Maize Varieties

WEN Tao^{1,2}, MU Xin-yuan², LIU Tian-xue¹, ZHAO Xia², DING Yong², CAO Li-ru²,
LU Xiao-min², TANG Bao-jun², XIA Lai-kun²

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046;

2. Cereal Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences / Henan International Joint Laboratory on Maize Precision Production, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The effects of low nitrogen stress(PK-N) on grain yield and quality of maize were studied with 18 maize varieties as experimental materials and normal nitrogen application(NPK) as the control, and the nitrogen efficiency types of maize varieties were classified and evaluated. The results showed that low nitrogen stress led to a significant decrease in grains per ear and yield, and a significant decrease in starch, protein and lysine content and a decrease in quality. Correlation analysis revealed that grain yield was significantly positively correlated with ear diameter, grains per row, grains per ear, and grain weight per ear under both nitrogen treatments. Starch content was negatively correlated with protein, fat and lysine content in different degrees. Protein, fat and lysine content were positively correlated in different degrees. Starch, protein, fat and lysine yield were significantly positively correlated with grain yield. Path analysis showed that ear length, ear diameter and rows per ear were the main ear traits affecting maize grain yield, and grain yield was the main factor affecting maize starch, protein, fat and lysine yield. Based on the comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance D value and grain yield, high yield and low nitrogen tolerance varieties such as Zhengdan819, Zhengdan568, and Zhengdan232 were selected.

Key words: Maize; Grain yield; Grain quality; Low-nitrogen stress; Entropy weight method; Path analysis

录用日期: 2024-05-07

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(222102110278)、河南省农业科学院自主创新项目(2023ZC007)、河南省农业科学院科技创新团队项目(2024TD037)、河南省玉米产业技术体系建设专项(HARS-22-02-G2)、河南省农业科学院基础性科研工作项目(2023JC09)

作者简介: 温涛(1998-), 硕士, 主要从事玉米氮高效生理生态研究。E-mail: wentao18317765003@163.com

刘天学和赵霞为本文通信作者。E-mail: tianxueliu2005@163.com E-mail: zhaoxia1007@126.com

玉米是我国重要的粮、经、饲、加工多用途作物,也是喜肥高产型作物,其中氮肥对玉米产量和品质具有十分重要的影响^[1-2]。玉米对氮肥的响应存在显著的基因型差异^[3],选用高产氮高效型玉米品种可显著提高玉米单产,改善玉米子粒品质,同时提高氮肥利用效率。黄淮海地区是我国最大的夏玉米主产区,该区中低产田占比高,增产潜力巨大^[4]。因此,筛选和培育高产优质氮高效型玉米品种是大面积提高该区玉米单产和品质的重要物质基础,对保障我国粮食安全具有重大意义。

玉米对氮素较敏感,合理施用氮肥可增加玉米产量,同时改善子粒品质^[5]。氮供应不足会影响玉米植株的一系列重要生理生化过程,最终导致光合性能受抑制,光合同化物的积累与分配受阻,子粒产量降低,品质下降^[6-8]。在同一氮水平下,氮高效型品种比氮低效型品种有更高的氮积累量^[9]、更快的植株生长速率和穗生长速率^[10-11],获得更高的穗粒数和粒重,形成更高的子粒产量^[12-13]。相同栽培条件下,高产氮高效型品种的增产潜力可达6%以上,节氮潜力达15%以上^[14-16]。玉米品质性状受遗传因

素的调控^[17],也易受生态环境^[18]、肥料^[19-20]等多方面因素影响。在肥料因素中,尤以氮肥对玉米子粒品质的影响最大。合理施用氮肥可增加玉米子粒蛋白质和淀粉的含量,降低脂肪含量,改善子粒品质。

随着黄淮海地区新审定玉米品种数量急剧增加,进一步了解玉米品种子粒产量和品质对低氮胁迫的响应,对该区玉米新品种的选育和合理利用具有重要意义。本研究收集15个黄淮海地区审定推广玉米品种和3个自育杂交组合为材料,通过大田低氮处理,研究低氮胁迫对玉米子粒产量与品质的影响,基于相关分析、通径分析和熵权模糊隶属函数方法,对供试品种进行氮效率类型划分与评价,为该区氮高效品种遗传改良与高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为15个黄淮海地区生产上大面积推广应用及近年来在该区新审定的杂交种和3个自育杂交组合。品种名称与编号见表1。

表 1 供试品种与代码
Table 1 Code of tested maize varieties

代 码 Code	品种名称 Variety	审定情况 Validation	代 码 Code	品种名称 Variety	审定情况 Validation
1	郑单958	国审 2000	10	春秋 795	豫审 2021
2	郑单 819	国审 2022	11	盈丰 938	豫审 2018
3	郑单 5176	豫审 2019	12	农玉 16	豫审 2018
4	郑单 5179	国审 2022	13	迪卡 698	国审 2022
5	秋乐 368	国审 2017	14	裕丰 303	国审 2015
6	先玉 335	国审 2004	15	浚单 565	豫审 2023
7	MC786	国审 2019	16	郑单 234	参试未审
8	郑单 568	豫审 2022	17	郑单 231	参试未审
9	新单 88	国审 2021	18	郑单 232	参试未审

1.2 试验设计

试验于2023年6-10月,在河南省农业科学院原阳基地长期肥料定位试验田(35°01' N、113°42' E,海拔63.40 m)进行。试验地土壤类型为潮土,种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟制。长期肥料定位试验田自2015年6月玉米季定位施肥,至2023年玉米季已历时9年,设置正常氮肥处理(NPK, N 270 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²)和低氮胁迫处理(PK-N,不施氮肥,磷、钾肥同NPK处理)。各处理按大区试验设计,每个大区四周建有1 m深水泥墙,防止各处理间窜水窜肥。肥料种类分别是

尿素、过磷酸钙和硫酸钾。玉米播种前40%氮肥及全部磷、钾肥作为底肥一次性施入,玉米拔节期开沟追施60%氮肥,每年小麦季和玉米季选择相同的肥料和施肥量。2023年6月玉米播种前,测定0~20 cm耕层土壤养分含量,NPK处理耕层土壤有机质10.46 g/kg、全氮0.66 g/kg、全磷0.89 g/kg、全钾19.69 g/kg、碱解氮41.80 mg/kg、有效磷32.08 mg/kg、速效钾179.21 mg/kg;PK-N处理耕层土壤有机质10.53 g/kg、全氮0.51 g/kg、全磷0.87 g/kg、全钾19.51 g/kg、碱解氮28.25 mg/kg、有效磷30.48 mg/kg、速效钾161.58 mg/kg。与NPK处理相比,PK-N处理

耕层土壤全氮和碱解氮含量分别降低 22.73% 和 32.42%。

供试品种的种植密度为 67 500 株/hm², 60 cm 等行距, 4 行区, 行长 5 m。采用随机区组试验设计, 18 个玉米品种组内随机排列, 3 次重复, 共计 108 个小区。于 2023 年 6 月 10 日开沟点播, 2023 年 10 月 7 日收获。试验地其他田间管理与大田生产相同, 玉米播种后当天浇蒙头水, 3~5 叶期用玉米专用除草剂防除杂草, 拔节期和大喇叭口期用玉米专用杀虫剂和杀菌剂叶面喷雾防治病虫害, 遇干旱及时灌溉浇水, 暴雨后及时排涝散墒。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 子粒产量及构成因素

于玉米成熟期收获每个小区中间两行全部果穗, 晒干后调查穗长(EL)、穗粗(ED)、穗行数(RpE)、行粒数(GpR)、百粒重(HGW)、穗粒数(GpE)、穗粒重(GWpE)、容重(VW), 然后全部收获果穗进行脱粒称重, 测定含水量, 计算出籽率(PGR), 并按 14% 含水量折算子粒产量(GY)。

1.3.2 子粒品质

选果穗中部大小均匀子粒用于品质性状测定。采用布鲁克 matrix-1 型近红外光谱仪(德国 BRUKER 公司)测定子粒淀粉含量(SC)、蛋白质含量(PC)、脂肪含量(FC)和赖氨酸含量(LC), 每个样品平行测定 3 次取平均值^[21]。根据子粒产量, 计算子粒淀粉产量(SY)、蛋白质产量(PY)、脂肪产量(FY)和赖氨酸产量(LY)^[22]。

1.4 数据处理与分析

采用基于熵值赋权的熵权模糊隶属函数法^[23]对 18 个供试玉米品种的低氮耐性进行评价。

构建从优隶属度矩阵: 按照从优隶属度原则, 各单项评价指标响应的模糊量值隶属于标准方案对应评价指标相应模糊量值的程度为从优隶属度。本研究各评价指标按照越大越优型指标计算。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}}, \text{式中, } r_{ij} \text{ 为从优隶属度, } \max x_{ij} \text{ 为}$$

各评价指标的最大值。

熵权法确定指标权重: 首先原始数据归一化处理。按照越大越优型指标计算处理, 计算公式:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \text{式中, } \max x_{ij} \text{ 和 } \min x_{ij} \text{ 分}$$

别为各评价指标的最大值和最小值。

其次计算熵值。 m 个评价事物 n 个评价指标的熵计算公式:

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m}, \text{式中, } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots$$

$$m; f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + b_{ij})}。$$

最后计算评价指标权重 W , 计算公式:

$$W_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=0}^n H_i}, \text{且满足 } \sum_{i=0}^n W_i = 1。$$

计算模糊评价的综合指数: 把各个评价指标的权重值 W_i 与响应评价指标的从优隶属度相乘并累加, 可得模糊评价的耐低氮综合评价 D 值, 计算公式:

$$D = \sum_{i=0}^n W_i r_{ij}, \text{该值越大, 该品种综合评价越优。}$$

采用 Microsoft Excel 软件进行数据整理, 采用 SPSS 软件进行处理间显著性检验(Duncan's), Pearson 相关分析和通径分析, 采用 Origin 软件进行画图。

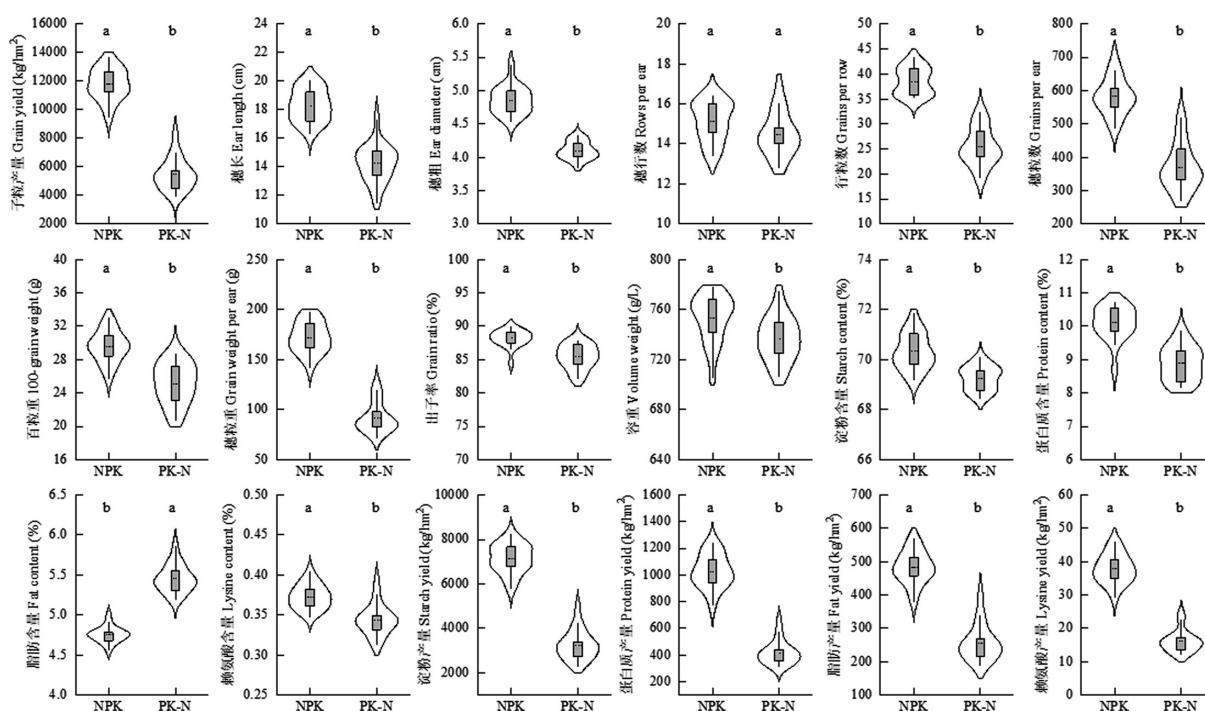
2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理下玉米产量和品质性状的差异分析

由图 1 可知, 除穗行数(RpE)外, 其余产量和品质性状均受低氮胁迫的极显著影响。与 NPK 处理相比, PK-N 处理的玉米产量性状中, 子粒产量(GY)、穗长(EL)、穗粗(ED)、行粒数(GpR)、穗粒数(GpE)、百粒重(HGW)、穗粒重(GWpE)、出籽率(GR)、容重(VW)分别显著下降 53.81%、22.16%、15.58%、33.95%、36.56%、15.17%、46.56%、3.13%、2.24% ($P < 0.05$); 品质性状中, 子粒淀粉(SC)、蛋白质(PC)、赖氨酸(LC)含量分别显著降低 1.53%、12.03%、7.74% ($P < 0.05$), 子粒脂肪(FC)含量显著提高 14.64% ($P < 0.05$), 子粒淀粉(SY)、蛋白质(PY)、脂肪(FY)、赖氨酸(LY)产量分别显著减少 54.49%、59.45%、47.04%、57.52% ($P < 0.05$)。其中, 降幅较高的性状是 GY、SY、PY、FY 和 LY, 其次是 GpR、GpE 和 GWpE, 降幅最小的性状是 SC。NPK 处理下各性状品种间的变异系数排序为 PY > LY > FY > GY > SY > GpE > GWpE > GpR > RpE > HGW > EL > PC > LC > ED > VW > FC > GR > SC, PK-N 处理下排序为 PY > FY > LY > SY > GY > GpE > GWpE > GpR > HGW > EL > RpE > PC > LC > ED > VW > FC > GR > SC。PK-N 处理各性状的变异系数均高于 NPK 处理, 两个氮肥处理下, 变异系数排前 5 位和最后 5 位的性状均一致。

2.2 不同氮肥处理下玉米品种各性状之间的相关性分析

表 2 相关性分析表明, 不同氮肥处理下, 18 个供



注:箱线图中中间虚线代表均值。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The dotted line in the middle of the boxplot represented the mean value. Different lowercase letters indicated significant difference among different nitrogen treatments($P<0.05$).

图1 不同氮肥处理对玉米子粒产量和品质性状的影响

Fig.1 Differences in grain yield and quality of summer maize varieties under different nitrogen treatments

试品种部分性状间的相关性达到显著或极显著水平,且不同氮肥处理下性状间的相关系数有较大差异。GY与ED、GpR、GpE、GWpE在两个氮肥处理下均呈显著正相关,其中,与GWpE的相关系数最高,均达0.80以上;GY与VW、PC、LC在NPK处理下呈显著正相关,GY与EL、GR在PK-N处理下呈显著正相关。NPK处理下,EL与HGW呈显著正相关;在PK-N处理下,EL与GpR、GpE、GWpE、GR呈显著正相关。NPK处理下,ED与RpE、GpE、GWpE呈显著正相关,与GR呈极显著负相关;在PK-N处理下,ED与GpR、GpE、GWpE呈显著正相关。在两个氮肥处理下,RpE与GpE呈极显著正相关,与HGW呈显著负相关;GpR与GpE、GWpE均呈极显著正相关;GpE与GWpE呈极显著正相关,与HGW呈显著负相关。NPK处理下,GWpE与GR呈显著负相关,与VW呈显著正相关;在PK-N处理下,GWpE与GR、VW无显著相关性。

在PK-N处理下,VW与SC呈显著负相关,与PC、FC、LC呈显著正相关,在NPK处理下则无显著相关性。在两个氮肥处理下,SC与PC、FC、LC均呈负相关,除NPK处理的FC外,其余均达显著水平;PC、FC、LC两两之间均呈正相关,其中只有NPK处

理的PC与FC之间未达显著水平。SY、PY、FY、LY与GY在两个氮肥处理下均呈极显著正相关,相关系数均达0.90以上。在两个氮肥处理下,SY、PY、FY、LY两两之间均呈极显著正相关。NPK处理下,PY、LY与SC均呈显著负相关,PY与PC、LC以及LY与PC、FC、LC均呈显著正相关,FY与PC、FC、LC呈显著正相关;PK-N处理下,SY、PY、FY、LY与SC、PC、FC、LC之间并未存在显著相关性。

2.3 不同氮肥处理下玉米主要性状与产量的途径分析

途径分析结果显示(表3),NPK处理下,主要性状对子粒产量的直接作用大小为GpR>HGW>RpE>GR>VW>ED>PC>FC>EL>LC>SC,其中GpR、HGW、RpE、GR、ED、PC和EL对子粒产量的影响为正值,VW、FC、LC和SC对子粒产量的影响为负值;主要性状对子粒产量的间接作用大小为GR>VW>PC>HGW>LC>GpR>RpE>ED>EL>SC>FC,其中VW、PC、ED、EL、FC和LC对子粒产量的影响为正值,GR、HGW、GpR、RpE和SC对子粒产量的影响为负值。GpR、RpE和HGW对子粒产量的直接影响大于间接影响,VW、GR、EL、ED、PC、SC、LC和FC对子粒产量的间接影响大于直接影响。

表2 18个玉米品种在NPK和PK-N处理下各性状间的相关性分析
Table 2 Correlation analysis for eighteen traits of 18 maize varieties under NPK treatment and PK-N treatment

性状 Trait	GY	EL	ED	RpE	GpR	GpE	HGW	GWpE	GR	VW	SC	PC	FC	LC	SY	PY	FY	LY
GY	—	0.287	0.498*	0.368	0.573*	0.681**	0.244	0.884**	-0.344	0.465*	-0.208	0.408*	0.289	0.433*	0.994**	0.928**	0.978**	0.945**
EL	0.772**	—	-0.252	-0.333	0.286	-0.009	0.496*	0.341	-0.173	0.087	0.064	0.188	-0.243	0.084	0.297	0.310	0.215	0.268
ED	0.584*	0.181	—	0.493*	0.105	0.423*	0.079	0.514*	-0.663**	0.021	-0.125	0.107	0.364	0.020	0.494*	0.418*	0.531*	0.397
RpE	0.241	0.035	0.207	—	-0.052	0.662**	-0.458*	0.373	-0.091	0.272	0.003	-0.033	0.093	0.003	0.376	0.261	0.356	0.282
GpR	0.887**	0.705**	0.463*	0.309	—	0.713**	-0.101	0.662**	-0.357	0.517*	-0.201	0.424*	-0.041	0.315	0.560*	0.613**	0.516*	0.567*
GpE	0.787**	0.552*	0.451*	0.671**	0.911**	—	-0.412*	0.747**	-0.330	0.558*	-0.135	0.283	0.038	0.221	0.679**	0.633**	0.631**	0.612**
HGW	-0.022	-0.080	0.081	-0.593**	-0.335	-0.519*	—	0.295	-0.253	-0.016	-0.090	0.280	0.137	0.300	0.239	0.301	0.254	0.306
GWpE	0.918**	0.622**	0.562*	0.353	0.851**	0.811**	0.069	—	-0.534*	0.590*	-0.194	0.491*	0.152	0.454	0.879**	0.874**	0.843**	0.860**
GR	0.392*	0.492*	0.031	0.084	0.502*	0.414*	-0.355	0.285	—	-0.025	-0.064	-0.081	0.143	0.120	-0.359	-0.290	-0.281	-0.224
VW	0.262	0.057	0.163	0.090	0.140	0.152	0.076	0.190	0.007	—	0.168	0.159	0.037	0.293	0.492*	0.422*	0.430*	0.471*
SC	0.260	0.190	0.450*	0.192	0.222	0.242	0.099	0.376	0.121	-0.579*	—	-0.788**	-0.229	-0.653**	-0.101	-0.477*	-0.245	-0.395
PC	-0.022	-0.161	-0.177	-0.127	-0.171	-0.186	0.306	-0.030	-0.184	0.769**	-0.740**	—	0.321	0.805**	0.329	0.717**	0.445*	0.608**
FC	0.105	-0.131	-0.092	-0.019	-0.007	-0.011	0.297	0.156	-0.244	0.711**	-0.577*	0.908**	—	0.519*	0.265	0.357	0.480*	0.421*
LC	-0.147	-0.217	-0.353	-0.205	-0.129	-0.179	0.041	-0.204	0.080	0.613**	-0.773**	0.809**	0.787**	—	0.367	0.664**	0.513*	0.702**
SY	0.999**	0.770**	0.594**	0.244	0.885**	0.786**	-0.016	0.922**	0.389	0.239	0.292	-0.047	0.084	-0.173	—	0.891**	0.967**	0.917**
PY	0.960**	0.705**	0.515*	0.189	0.817**	0.710**	0.056	0.877**	0.348	0.468*	0.051	0.255	0.358	0.093	0.952**	—	0.928**	0.971**
FY	0.987**	0.732**	0.551*	0.227	0.864**	0.763**	0.020	0.914**	0.352	0.367	0.162	0.122	0.261	-0.013	0.983**	0.989**	—	0.959**
LY	0.952**	0.710**	0.478*	0.183	0.856**	0.741**	-0.029	0.853**	0.438*	0.450*	0.031	0.214	0.338	0.156	0.944**	0.985**	0.981**	—

注: 对角线下方的数字表示PK-N处理下的相关系数; 对角线上方的数字表示NPK处理下的相关系数。“*、**”分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平差异显著。
Note: The numbers under the diagonal indicate correlation under PK-N treatment. The numbers above the diagonal indicate correlation under NPK treatment. * and ** indicates the different significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

PK-N 处理下主要性状对子粒产量的直接作用大小为 GpR>HGW>EL>FC>RpE>LC>ED>PC>GR>VW>SC,其中 GpR、HGW、EL、RpE、LC、ED、PC 和 SC 对子粒产量的影响为正值,FC、GR 和 VW 对子粒产量的影响为负值;主要性状对子粒产量的间接作用大小为 GR>EL>HGW>ED>FC>LC>VW>SC>GpR>PC>RpE,其中 GR、EL、ED、FC、VW、SC 和 GpR 对子粒产量的影响为正值,HGW、LC、PC 和 RpE 对子粒

产量的影响为负值。GpR 和 RpE 对子粒产量的直接影响大于间接影响,VW、GR、EL、ED、PC、SC、LC、FC 和 HGW 对子粒产量的间接影响大于直接影响。

由决策系数可知,NPK 处理下对子粒产量起正贡献的是 ED>GpR>FC>EL,PK-N 处理下对子粒产量起正贡献的是 GpR>EL>ED>RpE。综合两个氮肥处理结果,穗长、穗粗和行粒数是影响玉米产量的主要穗部性状。

表3 不同氮肥处理下主要性状与子粒产量的通径分析
Table 3 Path analysis of main traits and grain yield under NPK treatment and PK-N treatment

处 理 Treatment	性 状 Trait	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient	决策系数 Decision coefficient
NPK	EL	0.087	0.201	0.042
	ED	0.271	0.226	0.196
	RpE	0.761	-0.393	-0.019
	GpR	1.003	-0.431	0.143
	HGW	0.777	-0.533	-0.225
	GR	0.439	-0.783	-0.495
	VW	-0.236	0.701	-0.275
	SC	0.032	-0.241	-0.014
	PC	-0.209	0.618	-0.214
	FC	0.077	0.211	0.039
	LC	0.035	0.398	0.029
PK-N	EL	0.348	0.425	0.416
	ED	0.215	0.370	0.205
	RpE	0.211	0.030	0.057
	GpR	0.630	0.258	0.721
	HGW	0.306	-0.328	-0.107
	GR	-0.023	0.416	-0.019
	VW	-0.008	0.271	-0.004
	SC	-0.001	0.261	-0.001
	PC	0.139	-0.161	-0.025
	FC	-0.122	0.227	-0.041
	LC	0.106	-0.253	-0.042

2.4 不同氮肥处理下玉米主要性状与子粒品质的通径分析

通径分析结果显示(表4),在两个氮肥处理下,对子粒淀粉产量(SY)直接作用最大的性状是GY,其次是SC,GpE通过GY对SY的间接作用最大;对子粒蛋白质产量(PY)直接作用最大的性状是GY,其次是PC,GpE通过GY对PY的间接作用最大;对子粒脂肪产量(FY)直接作用最大的性状是GY,其次是FC,GpE通过GY对FY的间接作用最大;对子粒赖氨酸产量(LY)直接作用最大的性状是GY,其次是LC,GpE通过GY对LY的间接作用最大。由决策系数可知,对SY、PY、FY、LY起最大正贡献的均是

GY。综合两个氮肥处理结果,子粒产量是影响玉米淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸产量的主要因素,其次是子粒淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸含量。

2.5 不同玉米品种氮效率类型划分

以NPK处理为对照,计算PK-N处理18个性状的耐低氮系数,采用熵权赋值法计算各性状耐低氮系数的权重。权重大小排序为FY(0.144)、SY(0.144)、LY(0.143)、GY(0.141)、PY(0.139)、GWpE(0.083)、GpE(0.076)、GpR(0.046)、EL(0.026)、HGW(0.013)、PC(0.013)、RpE(0.010)、LC(0.008)、ED(0.006)、FC(0.004)、VW(0.002)、GR(0.001)、SC(0.001)。采用模糊隶属函数法计算供试玉米品种的耐低氮综合评价

值(D),D值越大表明品种的耐低氮能力越强。供试玉米品种的D值为0.579~0.977,平均值0.737,变异系数17.64%。以NPK处理的子粒产量平均值和D值平均值将18个供试品种划分为4类(图2)。由图2可知,高产耐低氮型(HR)处于第Ⅰ象限,包括郑单232、郑单819、郑单568共3个品种;高产低氮敏感型(HS)

处于第Ⅱ象限,包括秋乐368、MC786、盈丰938、郑单234、郑单231共5个品种;低产耐低氮型(LR)处于第Ⅳ象限,包括郑单5176、郑单5179、新单88、春秋795、农玉16、浚单565共6个品种;低产低氮敏感型(LS)处于第Ⅲ象限,包括郑单958、先玉335、迪卡698、裕丰303共4个品种。

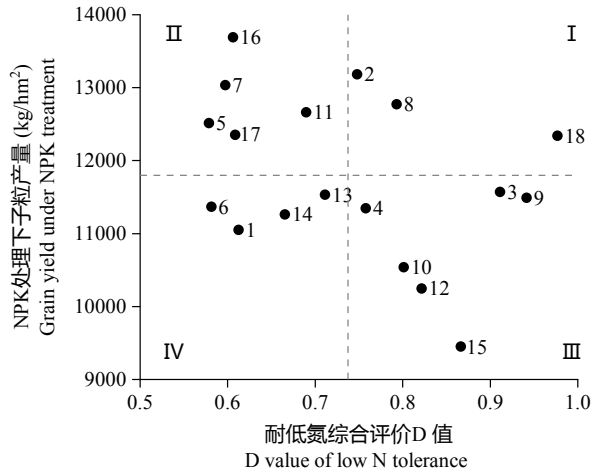


图2 18个玉米品种氮效率类型划分结果

Fig.2 Classification results of nitrogen efficiency types for 18 maize varieties

2.6 不同氮效率类型玉米品种产量和品质性状的差异分析

表5 不同氮效率类型玉米品种子粒产量与品质性状对低氮胁迫的响应

Table 5 Grain yield and quality of maize varieties with different nitrogen efficiency types response to low-nitrogen stress

氮效率类型 Nitrogen efficiency type	处 理 Treatment	GY (kg/hm ²)	GpE	HGW (g)	GWpE (g)	GR(%)	VW(g/L)	SC(%)
HR	NPK	12 764.99 a	625.43 a	30.44 a	189.04 a	87.37 a	772.28 a	70.14 ab
	PK-N	6 809.16 c	428.25 c	25.33 bc	106.26 c	85.16 bc	743.86 bc	69.35 bc
HS	NPK	12 850.70 a	612.81 ab	29.87 a	182.73 a	88.19 a	759.84 ab	70.30 ab
	PK-N	4 849.51 d	334.14 de	24.98 bc	82.98 d	84.50 c	738.48 bc	68.97 c
LR	NPK	10 772.64 b	567.34 ab	28.52 ab	161.38 b	88.37 a	741.35 bc	70.06 ab
	PK-N	5 983.98 c	406.08 cd	24.69 c	99.75 c	87.02 ab	737.51 bc	69.36 bc
LS	NPK	11 301.05 b	537.34 b	30.15 a	161.75 b	88.46 a	747.58 abc	70.88 a
	PK-N	4 380.81 d	316.21 e	25.63 bc	80.58 d	84.33 c	725.37 c	69.33 bc
氮效率类型 Nitrogen efficiency type	处 理 Treatment	PC(%)	FC(%)	LC(%)	SY (kg/hm ²)	PY (kg/hm ²)	FY (kg/hm ²)	LY (kg/hm ²)
HR	NPK	10.56 a	4.74 b	0.380 a	7 698.16 a	1 159.73 a	520.49 a	41.74 a
	PK-N	8.75 d	5.47 a	0.336 d	4 062.92 c	514.81 c	321.31 c	19.72 c
HS	NPK	10.20 ab	4.78 b	0.377 ab	7 767.69 a	1 128.08 a	528.69 a	41.76 a
	PK-N	9.15 cd	5.51 a	0.346 cd	2 875.94 d	381.69 de	229.58 d	14.43 cd
LR	NPK	10.10 ab	4.74 b	0.371 abc	6 488.72 b	936.89 b	439.37 b	34.42 b
	PK-N	8.82 d	5.40 a	0.343 cd	3 569.67 c	454.96 cd	278.68 c	17.68 c
LS	NPK	9.66 bc	4.76 b	0.363 abcd	6 889.47 b	938.09 b	462.45 b	35.27 b
	PK-N	8.78 d	5.44 a	0.347 bcd	2 613.76 d	329.01 e	204.64 d	13.04 d

注:同列数据不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments at P<0.05 level.

于氮敏感型品种,脂肪含量的增幅差异不大。由于耐低氮型品种的子粒产量降幅小于氮敏感型品种,其淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸产量的降幅均小于氮敏感型品种。

综上所述,低氮胁迫造成玉米穗粒数减少、子粒淀粉和蛋白质含量降低、脂肪含量升高,进而导致子粒产量降低、品质下降。不同品种的子粒产量和品质对低氮胁迫的响应存在显著差异。选用高产耐低氮型品种郑单819、郑单568和郑单232可提高子粒产量,获得更高的淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸产出,同时提高氮肥的利用效率。

参考文献:

- [1] 杨恩琼,黄建国,何腾兵,等. 氮肥用量对普通玉米产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(3): 509–513.
YANG E Q, HUANG J G, HE T B, et al. Effect of nitrogen fertilization on yield and nutritional qualities of food maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(3): 509–513. (in Chinese)
- [2] 姜 涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(3): 559–565.
JIANG T. Effects of nitrogen application regime on yield, quality and plant nutrient contents of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(3): 559–565. (in Chinese)
- [3] 陈先敏,梁效贵,赵 雪,等. 历年国审玉米品种产量和品质性状变化趋势分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4020–4029.
CHEN X M, LIANG X G, ZHAO X, et al. Analysis on the trends of yield and quality related traits for maize hybrids released in China over the past years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(21): 4020–4029. (in Chinese)
- [4] 杨建波,王 莉,张萍丽,等. 河南省粮食主产区中低产田分区综合整治研究[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(1): 79–85.
YANG J B, WANG L, ZHANG L P, et al. Comprehensive improvement on the medium-low yield fields of the major grain production areas in Henan province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(1): 79–85. (in Chinese)
- [5] 于宁宁,任佰朝,赵 斌,等. 施氮量对夏玉米籽粒灌浆特性和营养品质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3771–3776.
DING N N, REN B C, ZHAO B, et al. Effects of nitrogen application rate on grain filling characteristics and nutritional quality of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3771–3776. (in Chinese)
- [6] 李 强,马晓君,程秋博,等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种花后物质生产及叶片功能特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2016, 24(1): 17–26.
LI Q, MA X J, CHENG Q B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on post-silking dry matter production and leaves function characteristics of low-nitrogen tolerance maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1): 17–26. (in Chinese)
- [7] MU X H, CHEN Q W, CHEN F J, et al. Dynamic remobilization of leaf nitrogen components in relation to photosynthetic rate during grain filling in maize[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 129: 27–34.
- [8] HISSE I R, D'ANDREA K E, OTEGUI M E. Source-sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: Responses to contrasting nitrogen supply levels[J]. Field Crops Research, 2019, 230: 151–159.
- [9] SU W N, KAMRAN M, XIE J, et al. Shoot and root traits of summer maize hybrid varieties with higher grain yields and higher nitrogen use efficiency at low nitrogen application rates[J]. PeerJ, 2019, 7: e7294.
- [10] MA B X, WANG J Q, HAN Y H, et al. The response of grain yield and ear differentiation related traits to nitrogen levels in maize varieties with different nitrogen efficiency[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 14620.
- [11] LIU Z, HAO Z H, SHA Y, et al. High responsiveness of maize grain yield to nitrogen supply is explained by high ear growth rate and efficient ear nitrogen allocation[J]. Field Crops Research, 2022, 286: 108610.
- [12] 杨豫龙,赵 霞,王帅丽,等. 黄淮海中南部玉米氮高效品种筛选及产量性状分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 23–32.
YANG Y L, ZHAO X, WANG S L, et al. Screening and yield character analysis of maize nitrogen efficient varieties in south and central Huang-Huai-Hai area[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(1): 23–32. (in Chinese)
- [13] 穆心愿,齐建双,丁 勇,等. 黄淮海南部夏玉米对氮、磷、钾亏缺的响应及基因型差异[J]. 玉米科学, 2023, 31(3): 128–136.
MU X Y, QI J S, DING Y, et al. Responses of different maize varieties to nitrogen, phosphorus and potassium deficiency in south of Huang-Huai-Hai plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(3): 128–136. (in Chinese)
- [14] 胡聪慧,石文君,李 梁,等. 东北地区玉米氮高效品种筛选及产量组成因素分析[J]. 玉米科学, 2020, 28(5): 67–76.
HU C H, SHI W J, LI L, et al. Screening for nitrogen-efficient maize cultivars used in northeast China and analysis of yield components[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(5): 67–76. (in Chinese)
- [15] 郭 松,曾祥忠,陈 琨,等. 川中丘区玉米氮高效品种筛选及增产潜力分析[J]. 核农学报, 2020, 34(11): 2569–2577.
GUO S, ZENG X Z, CHEN K, et al. Screening of n-efficient maize varieties and analysis for their yield increase potentials in central Sichuan basin[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(11): 2569–2577. (in Chinese)
- [16] 陈范骏,房增国,高 强,等. 中国东北部分地区玉米主推品种高产氮高效潜力分析[J]. 中国科学:生命科学, 2013, 43(4): 342–350.
CHEN F J, FANG Z G, GAO Q, et al. Analysis of high yield and high nitrogen efficiency potential of main maize varieties in East and North China[J]. Scientia Sinica(Vitae), 2013, 43(4): 342–350. (in Chinese)
- [17] 王利青,高聚林,王富贵,等. 1970s—2010s玉米品种产量及籽粒营养品质的分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(5): 44–60.
WANG L Q, GAO J L, WANG F G, et al. Analysis of yield and grain nutrient quality of maize varieties from 1970s to 2010s[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(5): 44–60. (in Chinese)

- [18] 刘淑云,董树亭,胡昌浩,等.玉米产量和品质与生态环境的关系[J].作物学报,2005,31(5):571-576.
LIU S Y, DONG S T, HU C H, et al. Relationship between ecological environment and maize yield and quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(5): 571-576. (in Chinese)
- [19] 李建奇.氮、磷营养对黄土高原旱地玉米产量、品质的影响机理研究[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1042-1047.
LI J Q. Study on the influencing mechanisms of nitrogen and phosphorus nutrients on maize yield and quality in rainfed lands of the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008, 14(6): 1042-1047. (in Chinese)
- [20] 黄绍文,孙桂芳,金继运,等.氮、磷和钾营养对优质玉米子粒产量和营养品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(3):225-230.
HUANG S W, SUN G F, JIN J Y, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium application on grain yield and qualities of high-oiland high-starch corn[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2004, 10(3): 225-230. (in Chinese)
- [21] 张凤启,丁勇,张君,等.不同来源玉米自交系品质性状的配合力分析[J].河南农业科学,2022,51(11):11-20.
ZHANG F Q, DING Y, ZHANG J, et al. Combining ability analysis of quality traits of maize inbred lines from different sources[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(11): 11-20. (in Chinese)
- [22] 刘铭,刘秀霞,刘文成,等.氮磷钾配施对高淀粉玉米产量和品质的影响[J].东北农业科学,2022,47(2):1-3,15.
LIU M, LIU X X, LIU W C, et al. Effect of NPK cooperating applications on yield and quality of high starch maize[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(2): 1-3, 15. (in Chinese)
- [23] 刘秋员,周磊,田晋钰,等.长江中下游地区常规中熟粳稻氮效率综合评价及高产氮高效品种筛选[J].中国农业科学,2021,54(7):1397-1409.
LIU Q Y, ZHOU L, TIAN J Y, et al. Comprehensive evaluation of nitrogen efficiency and screening of varieties with high grain yield and high nitrogen efficiency of inbred middle-ripe japonica rice in the middle and lower reaches of yangtze river[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(7): 1397-1409. (in Chinese)
- [24] 张海燕,孙琦,张德贵,等.低氮胁迫下我国不同年代玉米品种产量及产量构成因子变化趋势研究[J].玉米科学,2013,21(5):13-17.
ZHANG H Y, SUN Q, ZHANG D G, et al. Trends of grain yield and component factor under low nitrogen in chinese maize cultivars from different eras[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(5): 13-17. (in Chinese)
- [25] 熊伟屹,徐开未,刘明鹏,等.不同氮用量对四川春玉米光合特性、氮利用效率及产量的影响[J].中国农业科学,2022,55(9):1735-1748.
XIONG W Y, XU K W, LIU M P, et al. Effects of different nitrogen application levels on photosynthetic characteristics, nitrogen use efficiency and yield of spring maize in Sichuan province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(9): 1735-1748. (in Chinese)
- [26] 米国华,陈范骏,袁力行.氮素调节玉米幼穗及籽粒发育的生理机制[J].土壤与作物,2012,1(4):193-198.
MI G H, CHEN F J, YUAN L X, et al. Regulatory mechanism of nitrogen availability on earshoot and kernel development in maize[J]. Soils and Crops, 2012, 1(4): 193-198. (in Chinese)
- [27] RUIZ A, ARCHONTOULIS S V, BORRAS L. Kernel weight relevance in maize grain yield response to nitrogen fertilization[J]. Field Crops Research, 2022, 286: 108631.
- [28] 王敏,徐萍,刘新江,等.黄淮海地区夏玉米农艺性状与产量的通径分析[J].中国生态农业学报(中英文),2011,19(5):1229-1236.
WANG M, XU P, LIU X J, et al. Path analysis of summer maize agronomic traits and yield in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 19(5): 1229-1236. (in Chinese)
- [29] 刘强,杨明花,艾合买提江,等.11个玉米主要性状与籽粒产量的相关性通径分析[J].天津农业科学,2016,22(7):123-125,138.
LIU Q, YANG M H, AI H M T J, et al. Correlation and path analysis on 11 agronomic characters with grain yield of maize[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(7): 123-125, 138. (in Chinese)
- [30] 张志慧,郭锐,白琪林,等.高产玉米组合主要性状的灰色关联度分析[J].山西农业科学,2011,39(9):930-932.
ZHANG Z H, GUO R, BAI Q L, et al. Grey correlation degree analysis for the main traits in high yielding maize combinations[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(9): 930-932. (in Chinese)
- [31] 张岚,胡春辉,张龙,等.不同来源玉米自交系籽粒品质性状及其相关分析[J].中国农学通报,2018,34(12):23-29.
ZHANG L, HU C H, ZHANG L, et al. Grain quality traits and their correlations of maize inbred lines with different resources[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(12): 23-29. (in Chinese)
- [32] 李凯,黄庆华,钟儒清,等.不同玉米品种籽粒中营养成分含量及相关性分析[J].农业大数据学报,2020,2(4):70-77.
LI K, HUANG Q H, ZHONG R Q, et al. Analysis of the contents and correlations of nutrient components in different maize cultivars[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2020, 2(4): 70-77. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)