

DOI: 10.11686/cyxb2024374

http://cyxb.magtech.com.cn

李长青, 宋亚茹, 肖凡, 等. 耐瘠高产型玉米品种主要农艺性状特征分析. 草业学报, 2025, 34(9): 97-110.

LI Chang-qing, SONG Ya-ru, XIAO Fan, *et al.* Analysis of main agronomic traits of low-fertility-tolerant and high-yielding maize varieties. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(9): 97-110.

耐瘠高产型玉米品种主要农艺性状特征分析

李长青^{1,2}, 宋亚茹¹, 肖凡¹, 缪春语¹, 孙梦宇¹, 纪萌¹, 孙志梅^{1*}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 2. 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071000)

摘要: 在氮磷复合限制型障碍土壤上, 通过田间小区试验, 对施肥和不施肥下10个供试玉米品种的株型特征、穗部特征及产量进行比较分析, 探明不同玉米品种的耐瘠能力差异, 并解析耐瘠高产型玉米品种的主要农艺性状特征, 为适宜于瘠薄障碍型中低产田土壤的耐瘠高产玉米品种的选育提供科学依据。根据施肥和不施肥条件下的玉米平均产量将10个供试玉米品种分为耐瘠高产型(HB)、不耐瘠高产型(HNB)和不耐瘠次高产型(SHNB)3类, 其中HB型品种的施肥增产效应明显低于HNB和SHNB型玉米品种。在瘠薄土壤不施肥条件下, HB型玉米的株高、穗位高、穗长、行粒数和穗粒数均显著高于HNB和SHNB型品种, 而秃尖长显著降低, 各农艺性状耦合协调度显著提高。而在施肥条件下, 虽然上述农艺性状与HNB型没有显著差异, 但均显著高于SHNB型品种。通过各农艺性状指标与产量的边界线分析得出, 在瘠薄土壤上获得12000 kg·hm⁻²的目标产量, HB型玉米的农艺性状需要达到的适宜范围分别为: 穗长17.80~20.42 cm, 秃尖长<0.05 cm, 行粒数34.32~40.36, 穗粒数578.95~691.55, 百粒重34.31~39.70 g, 株高229.43~256.98 cm, 穗位高103.38~125.52 cm。综上, 在氮磷含量均低的瘠薄型中低产田上, HB型玉米通过保持较长的穗长和较短的秃尖长来实现行粒数和穗粒数的显著提高, 各农艺性状的耦合协调度也明显提高, 最终表现出了在瘠薄土壤上明显的产量优势。

关键词: 玉米品种; 耐瘠高产; 农艺性状; 耦合协调度; 边界线分析

Analysis of main agronomic traits of low-fertility-tolerant and high-yielding maize varieties

LI Chang-qing^{1,2}, SONG Ya-ru¹, XIAO Fan¹, MIAO Chun-yu¹, SUN Meng-yu¹, JI Meng¹, SUN Zhi-mei^{1*}

1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Key Laboratory of Farmland Ecology and Environment of Hebei Province, Baoding 071000, China

Abstract: In this study, field experiments were conducted in nitrogen and phosphorus co-limited soil treated with and without fertilizer application to analyze the differences in plant traits, ear traits, and yield of ten maize (*Zea mays*) varieties. The aims were to explore the differences in low-fertility tolerance among maize varieties, and identify the main agronomic traits of low-fertility-tolerant and high-yielding maize varieties, thereby providing a scientific basis for selecting and breeding maize varieties that are suitable for low-to-medium-yielding fields with nutrient deficiencies. Based on the average yields under these conditions, the ten maize varieties were classified into three types: low-fertility-tolerant and high-yielding type (HB), low-fertility-intolerant and high-yielding type (HNB), and low-fertility-intolerant and medium-yielding type (SHNB). The yield increase from fertilization of the HB-type was

收稿日期: 2024-09-26; 改回日期: 2024-10-31

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901004)资助。

作者简介: 李长青(1996-), 男, 河北承德人, 在读博士。E-mail: lixiaqing19960815@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sunzhimei@hebau.edu.cn

significantly lower than that of HNB and SHNB types. Without fertilizer in low-fertility soil, the HB-type exhibited significantly greater plant height, ear height, ear length, kernels per row, and kernels per ear, compared to HNB and SHNB types, while the bald tip length was significantly shorter, and the coupling coordination degree of agronomic traits was significantly higher. Under fertilization, although the above agronomic traits of the HB-type did not differ significantly from those of the HNB-type, they were significantly higher than those of the SHNB-type. Boundary line analysis of agronomic traits and yields revealed that, to achieve a target yield of $12000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ in low-fertility soil, the suitable ranges for agronomic traits of the HB-type were: ear length 17.80–20.42 cm; bald tip length $<0.05 \text{ cm}$; kernels per row 34.32–40.36; kernels per ear 578.95–691.55; 100-grain weight 34.31–39.70 g; plant height 229.43–256.98 cm; and ear height 103.38–125.52 cm. In conclusion, in low-to-medium-yielding fields with nitrogen and phosphorus co-limitation, the HB-type maize varieties achieved a significantly higher kernels per row and kernels per ear by maintaining a longer ear length and shorter bald tip length. The coupling coordination degree of agronomic traits was also significantly higher, ultimately demonstrating an obvious yield advantage in low-fertility soil.

Key words: maize varieties; low-fertility-tolerance and high-yield; agronomic traits; coupling coordination degree; boundary line analysis

玉米(*Zea mays*)是一种粮饲兼用型作物,其产能提升对保证畜牧业以及全球粮食安全具有重要意义^[1–2]。但影响玉米产量的因素很多,如品种特性、气候条件、水肥管理、耕作措施、病虫害防控等^[3–5],其中品种对产量的贡献可以达到34.8%~40.0%^[6–7]。黄淮海平原是我国重要的粮食产区,但是该区以质地偏砂、氮磷含量低、养分不均衡为突出障碍的中低产田占比较高^[8],深入挖掘作物自身的耐瘠抗逆潜力,充分发挥作物品种的增产潜力是保证或提升中低产田玉米产量不容忽视的首要因素。而玉米良好的株型等农艺性状特征既是高产稳产玉米的外在表现,也是玉米获得高产稳产的必要条件^[9]。因此,筛选耐瘠高产型玉米品种,并明确该类型品种的主要农艺性状特征,对于瘠薄障碍型中低产田玉米产能提升具有重要意义。

随着育种技术的发展,新的玉米品种不断涌现,仅2023年我国第三次品种审定会议通过的玉米新品种就高达774个^[10],但当前的育种目标主要以抗高温、抗干旱、抗盐碱等为主^[11–13]。如当前玉米生长季的高温逆境胁迫日益突出,特别是作为产量形成关键期的生殖生长阶段,对高温逆境胁迫尤为敏感。徐田军等^[11]认为花期前后高温胁迫会导致玉米品种的产量显著降低,且产量降低幅度表现出了明显的品种差异,而穗粒数降低是高温胁迫导致产量降低的主要原因。但也有学者发现,玉米吐丝期到成熟期日均气温高导致的百粒重降低是高温导致产量降低的主要原因^[14]。干旱也是当前我国玉米生产中最常见的非生物胁迫因素之一。在需水关键期,干旱胁迫下不耐旱玉米品种的穗长穗粗明显降低,秃尖长明显增加,最终导致玉米显著减产^[12]。但也有学者研究发现,干旱胁迫使玉米籽粒败育率增加,行粒数和百粒重降低,最终影响产量^[15]。而张元红等^[16]研究认为,在干旱年份,任何密度条件下单位面积穗数和穗粒数都是影响产量的主要因素;而在平水年和丰水年,低密度($52500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)条件下单位面积穗数是影响产量的主要因素,高密度($97500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)条件下,百粒重是影响产量的主要因素。盐碱逆境胁迫也是抑制当前粮食产能的重要因素。在中度盐碱地上适应性强的玉米品种主要是通过显著增加千粒重来获得高产^[13]。由此可见,目前针对逆境胁迫对玉米产量的影响以及玉米农艺性状与产量的关系研究较多,但不同逆境条件最终影响玉米产量的主要农艺性状特征存在明显差异。而针对土壤因素,特别是适宜于氮磷复合限制型中低产田的耐瘠高产型玉米品种的研究还没有引起足够的重视,耐瘠高产型玉米品种的典型农艺性状特征也不明确。因此,本研究在氮磷含量均较低的瘠薄型中低产田上,以课题组前期筛选出的10个高产型玉米品种为供试材料,通过田间小区试验,比较施肥和不施肥条件下不同玉米品种的产量和耐瘠能力差异,并通过边界线分析法解析农艺性状与产量的关系,明确耐瘠高产型玉米品种的主要农艺性状特征,旨在为瘠薄型中低产田玉米品种的优选提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于河北省沧州市河间市精耕家庭农场(38°32′18″N, 116°07′19″E)。该区域属于大陆性季风气候,无霜期187 d。供试土壤为砂土,播前0~20 cm土壤基础理化性质为:有机质12.0 g·kg⁻¹、全氮0.66 g·kg⁻¹、硝态氮13.77 mg·kg⁻¹、铵态氮8.26 mg·kg⁻¹、有效磷7.78 mg·kg⁻¹、速效钾123.26 mg·kg⁻¹、pH 8.59。依据河北省耕地地力主要指标分级诊断标准^[17]可知,土壤有机质含量属于Ⅳ级,全氮含量为Ⅳ级,有效磷含量为Ⅴ级,供试土壤的总体肥力水平明显偏低,为氮磷复合限制型土壤。2022和2023年玉米生长季节的总降水量分别为700.0和282.2 mm,平均温度分别为24.2和24.3℃(图1)。

1.2 供试材料

供试品种:本研究供试的10个玉米品种分别为HW、KE、MK、HY、JN、JH、AZY、JNK、ND、ZD,均为从课题组前期70余个品种中筛选出的单产在12000 kg·hm⁻²以上的高产玉米品种,具体信息如表1所示。

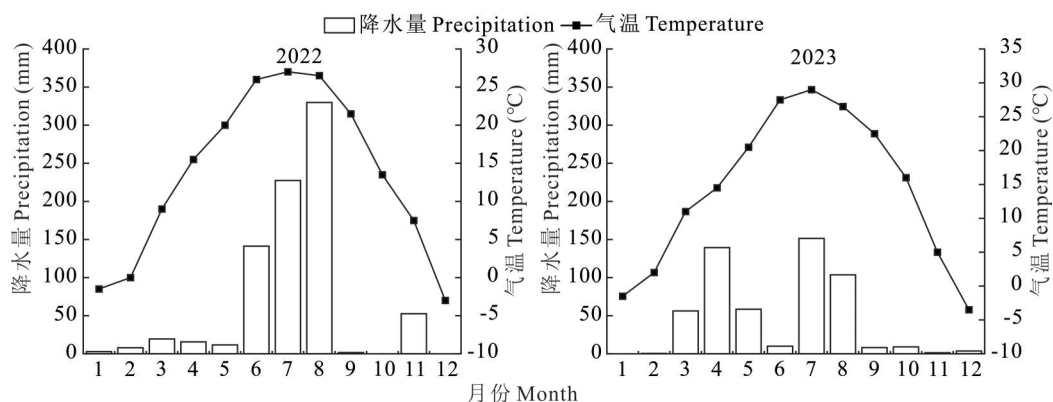


图1 2022–2023年月降水量和平均温度

Fig. 1 Monthly precipitation and average temperature in 2022–2023

表1 供试玉米品种编号及来源

Table 1 Code of tested maize varieties and their origins

品种 Varieties	代号 Code number	选育单位 Breeding organization
华皖261 Huawan 261	HW	安徽华皖种业有限公司 Anhui Huawan Seed Industry Co., Ltd.
科恩702 Keen 702	KE	石家庄考恩农业科技有限公司 Shijiazhuang Kaoen Agriculture Technology Co., Ltd.
美抗1T Meikang1T	MK	河北冀农种业有限责任公司 Hebei Jinong Seed Industry Limited Liability Company
怀玉20 Huaiyu 20	HY	河南怀川种业有限责任公司 Henan Huaichuan Seed Industry Co., Ltd.
冀农802 Jinong 802	JN	河北冀农种业有限责任公司 Hebei Jinong Seed Industry Limited Liability Company
金海188 Jinhai 188	JH	莱州市金海种业有限公司 Laizhou Jinhai Seed Industry Co., Ltd.
矮状元858 Aizhuangyuan 858	AZY	河北德道农业科技有限公司 Hebei Dedao Agriculture Technology Co., Ltd.
京农科729 Jingnongke 729	JNK	北京市农林科学院玉米研究所 Maize Research Institute of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences
农大372 Nongda 372	ND	中国农业大学 China Agricultural University
郑单958 Zhengdan 958	ZD	河南省农业科学院粮食作物研究所 Cereal Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences

供试肥料分别为尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%)和氯化钾(K₂O 60%),均为市面销售。

1.3 试验设计

本试验采用裂区设计,主区为施肥处理(F),分别为不施肥(CK)和施肥(OF),副区为10个玉米品种(V),分别为HW、KE、MK、HY、JN、JH、AZY、JNK、ND、ZD,共20个处理,每个处理3次重复,共60个小区。每个小区面

积为 72 m²。统一种植密度为 67500 株·hm⁻²,采用人工穴播。不施肥模式为全生育期氮磷钾养分均不投入;施肥模式下,氮肥于播种前、拔节期和大喇叭口期分别施入纯氮 150、45 和 30 kg·hm⁻²。其中底肥以尿素(N 46%)和磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%)作为氮源,后期追肥以尿素作为氮源。同时以磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%)和氯化钾(K₂O 60%)分别作为磷源和钾源,用量分别为 P₂O₅ 84 kg·hm⁻²和 K₂O 75 kg·hm⁻²,在玉米播种时采用种肥同播方式一次性基施。本试验开始于 2022 年 6 月,玉米收获后按照当地常规管理模式种植小麦(*Triticum aestivum*),2023 年继续在原小区进行玉米定位试验。两年均在 6 月中下旬播种,同年 10 月中旬收获。试验田灌溉、除草等田间管理参照当地常规管理模式进行。

1.4 测定项目与方法

产量及穗部性状:于玉米成熟期每个小区连续收获 30 穗玉米,现场称总鲜重,同时根据 30 穗的平均鲜穗重选取长势均匀的 5 穗标准穗,带回实验室风干后考种,统计穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数、穗粒数,烘干籽粒后折算 14% 含水量的玉米产量和百粒重。

农艺性状:于玉米吐丝期,每个小区随机选择长势基本一致的 5 株健壮玉米,测量每株玉米的株高(使用卷尺测量地面到雄穗顶部的距离)、茎粗(使用游标卡尺测量茎秆基部直径粗度)和穗位高(使用卷尺测定地面到植株雌穗着生节的距离)。

1.5 相关指标计算

玉米产量分类方法:依据 Bo 等^[18]的分类方法,以不施肥(CK)条件下 10 个玉米品种的平均产量为标准,将玉米品种分为耐瘠和不耐瘠两类,大于平均产量的品种归于耐瘠型品种;小于平均产量的品种归于不耐瘠品种。以施肥(OF)条件下 10 个品种的平均产量为标准,将玉米品种分为高产品种和次高产品种两类,大于平均产量的品种归于高产品种,小于平均产量的品种归于次高产品种。

玉米各农艺性状的耦合协调度计算方法:采用 SPSS Pro 软件计算穗长、秃尖长、行粒数、穗粗、穗行数、穗粒数、百粒重、株高、茎粗、穗位高总计 10 个农艺性状的权重值,根据权重值进一步运用 SPSS AU 软件计算不同类型品种各农艺性状的耦合协调度。耦合协调度 D 值为 0~1,该值越大说明各指标间的协调程度越高^[19]。

目标产量及农艺性状适宜指标范围的确定方法:首先对上述 10 个指标与产量进行相关性分析,将与产量存在显著相关且贡献度大($P < 0.05$)的穗长、秃尖长、行粒数、穗粒数、百粒重、株高、穗位高等性状建立与产量的边界线方程,根据所得边界线方程计算农艺性状的适宜范围^[20]:1)根据各农艺性状所对应的边界线方程求得最高预测产量,并将该预测产量的 95% 作为该农艺性状对应的目标产量;2)然后将各农艺性状对应的目标产量平均值作为本研究的目标产量;3)将该目标产量代入边界线方程,即可计算出达到高产标准时的主要农艺性状适宜范围。

1.6 统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 软件进行数据的处理和相关图表绘制,采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析,运用 Duncan 法多重比较进行试验数据差异显著性检验($P < 0.05$)。运用 R 语言中的随机森林模型量化各农艺性状对玉米产量的贡献度。

2 结果与分析

2.1 不同玉米品种的产量及其分类

2.1.1 不同玉米品种的产量差异 施肥、品种及二者互作对两年的玉米产量均产生了显著影响(图 2)。2022 年在 CK 条件下,各玉米品种产量表现为 MK>HW>KE>JNK>JH>JN>AZY>HY>ND>ZD,产量为 7956.1~11342.9 kg·hm⁻²,最大产量差为 3386.8 kg·hm⁻²。其中 MK 产量最高,与 HW 无显著性差异($P > 0.05$);在 OF 条件下,不同玉米品种产量表现为 JN>MK>HY>ND>JH>KE>HW>ZD>AZY>JNK,产量为 10100.1~12101.9 kg·hm⁻²,最大产量差为 2001.8 kg·hm⁻²。其中 JN、MK、HY、ND、JH、KE 和 HW 几个品种的产量差异均不显著。2023 年继续不施肥的 CK 条件下,各品种产量进一步降低,但仍以 MK 产量最高,其次为 KE 和 HW,3 个品种的产量均显著高于其他各品种;在 OF 条件下,各品种的产量变化与 2022 年基本一致。

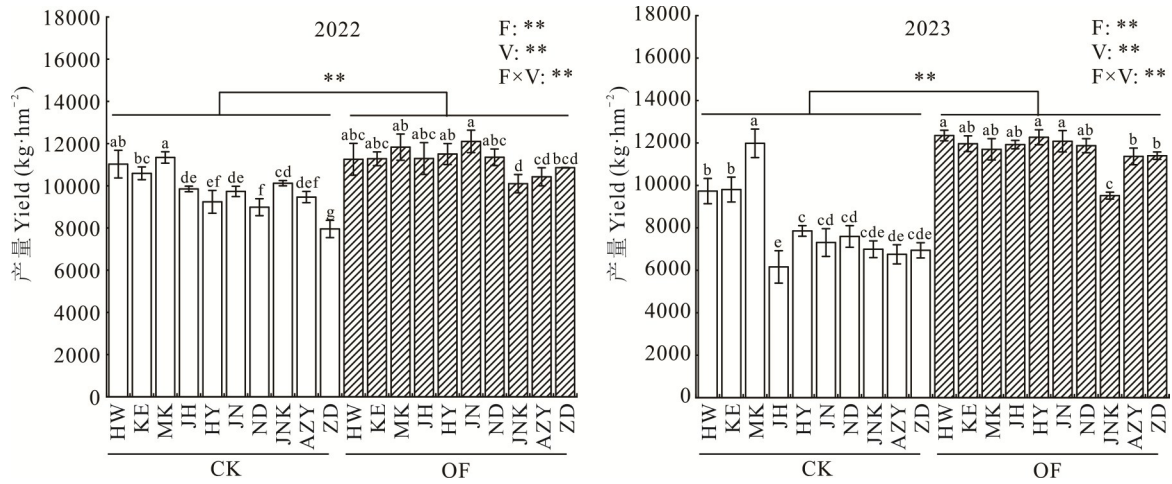


图 2 不同玉米品种的产量差异

Fig. 2 Yield difference of different maize varieties

不同小写字母表示同一施肥模式不同品种在 0.05 水平上存在显著差异。**表示在 0.01 水平上存在显著差异。Different lowercase letters indicate the significant differences among different varieties under the same fertilization mode at 0.05 level. ** indicates the significant difference at 0.01 level. F: 施肥模式 Fertilization mode; V: 品种 Variety; CK: 不施肥 No fertilization; OF: 施肥 Fertilization. 下同 The same below.

2.1.2 不同玉米品种的分类

根据 2022 年 CK 和 OF 条件下的玉米产量,将供试品种划分为 4 类(图 3)。第 1 类为耐瘠高产型玉米品种(HB),包括 MK、KE 和 HW,该类型品种在 CK 和 OF 两个处理下产量水平均较高,且两种施肥模式下的产量差异不显著;第 2 类为不耐瘠高产型品种(HNB),包括 JN、HY、JH 和 ND,该类型品种在 OF 处理下的产量水平较高,且显著高于 CK,说明该类品种在瘠薄土壤上不施肥时的产量水平较低,但施肥后增产潜力大,且能获得较高的产量水平;第 3 类是不耐瘠次高产型品种(SHNB)ZD 和 AZY,该类型品种相较于前述高产型品种在 CK 和 OF 两个处理下的产量水平均较低,且与不施肥相比,施肥的增产潜力大;第 4 类是耐瘠次高产型品种(SHB)JNK,该类型品种在 CK 和 OF 两个处理下的产量水平均较低,且与不施肥相比,施肥的增产潜力也不大(图 4)。

根据 2023 年的玉米产量结果,将供试品种划分为 3 类。即 HB 型品种,包括 MK、KE 和 HW,HNB 型品种,包括 JN、HY、JH 和 ND,SHNB 型品种,包括 ZD、AZY 和 JNK。由于不施肥处理土壤肥力进一步降低,CK 处理中 HW、KE 和 JNK 的产量与 OF 相比显著下降,施肥与不施肥的产量差分别为 2228.13、1895.90、2526.38 kg·hm⁻²,而 MK 的产量 CK 与 OF 处理差异仍不显著(图 4),产量差仅为 367.14 kg·hm⁻²。说明与 JN、HY、JH、ND、AZY 和 ZD 相比,HW、KE 和 JNK 表现出了明显较强的耐瘠薄能力,尤以 MK 表现最为突出。用两年的产量结果均值进一步进行归类分析,与 2023 年分类结果完全一致(图 3)。

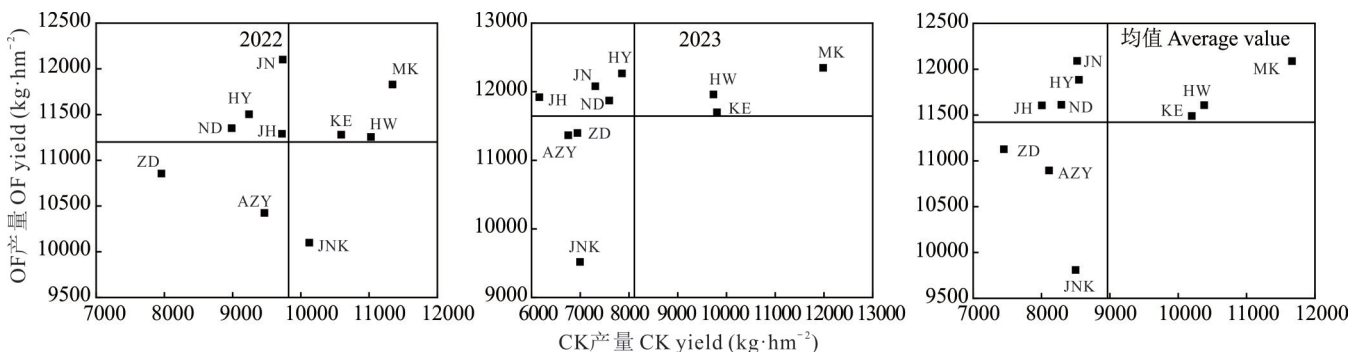


图 3 供试玉米品种分类

Fig. 3 Classification of tested maize varieties

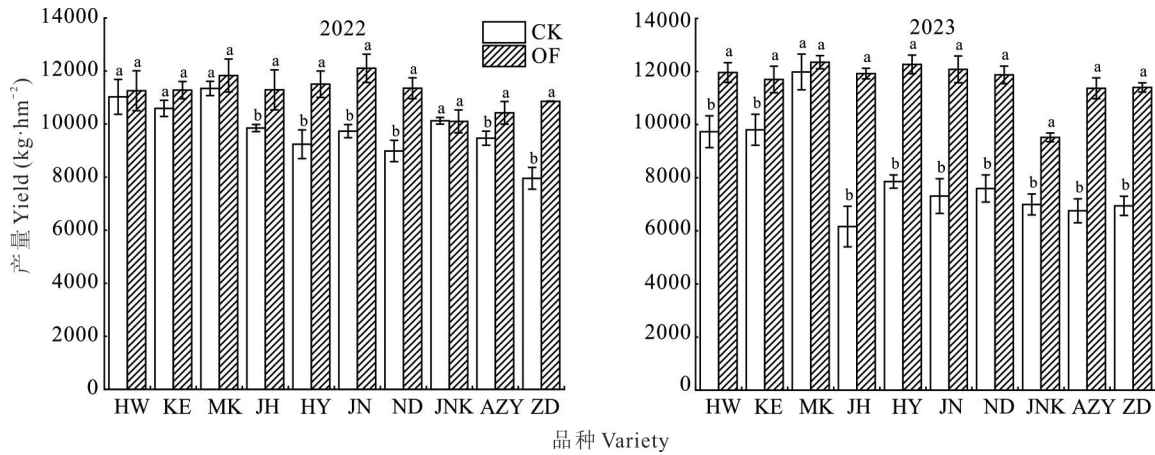


图4 施肥和不施肥条件下的玉米产量差异

Fig. 4 Yield difference of maize between fertilization and no fertilization

不同小写字母表示同一品种不同施肥条件在0.05水平存在显著差异。Different lowercase letters indicate that different fertilization conditions of the same varieties have significant differences at 0.05 level.

2.2 不同类型玉米品种的株型特征分析

2.2.1 不同类型玉米品种的株高差异 根据上述结果,对供试10个品种按照耐瘠高产型品种(HB)、不耐瘠高产型品种(HNB)和不耐瘠次高产型品种(SHNB)3类进行比较发现(图5),施肥、品种对玉米的株高影响两年结果均达到显著水平。2022年CK条件下,HB型品种的株高与HNB型品种之间差异不显著,但二者分别较SHNB型品种高10.8%和4.6%,且HB型品种与SHNB型品种差异显著($P < 0.05$);在OF条件下,HB型品种的株高与HNB型品种之间差异不显著,但二者分别较SHNB型品种高6.8%和10.8%。2023年结果与2022年基本一致。

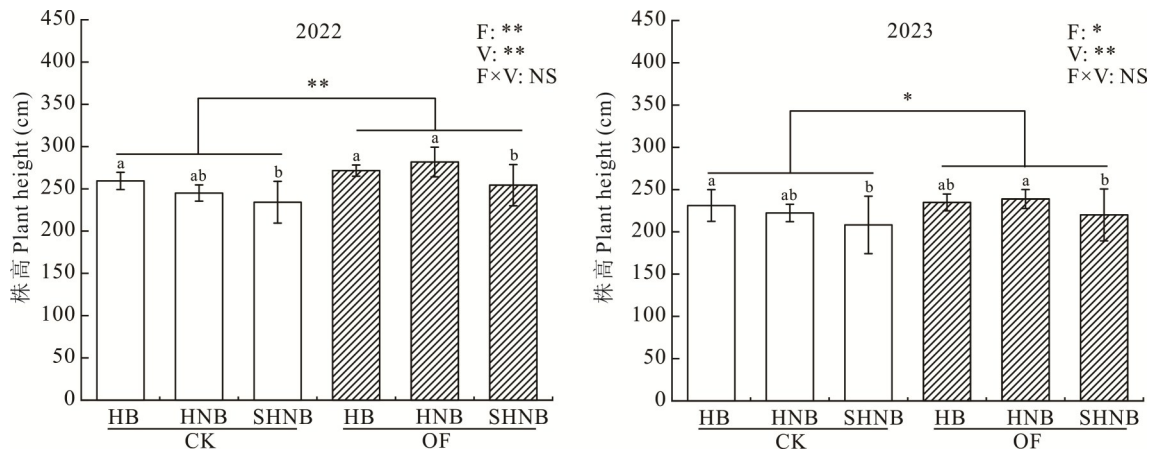


图5 不同类型玉米品种的株高

Fig. 5 Plant height of different types of maize varieties

表示在0.05水平下差异显著,NS表示差异不显著。下同。 indicates a significant difference at 0.05 level, and NS indicates no significant difference. The same below.

2.2.2 不同类型玉米品种的茎粗差异 2022和2023年的茎粗结果均表明(图6),施肥可以显著提高玉米的茎粗,但是各类型品种之间差异不显著。

2.2.3 不同类型玉米品种的穗位高差异 连续两年的试验结果均表明,施肥、品种对玉米的穗位高影响显著,但是二者交互影响不显著(图7)。2022年CK条件下,HB型品种的穗位高与HNB型品种差异不显著,但二者分别较SHNB型品种高22.8%($P < 0.05$)和12.5%;在OF条件下,HB型品种与HNB型品种也不存在显著性差

异,但分别较 SHNB 型品种显著提高 21.3% 和 21.0%。2023 年在 CK 条件下,HB 型品种显著高于 HNB 型和 SHNB 型品种($P < 0.05$),OF 条件下各类型品种的穗位高结果与 2022 年 OF 条件下一致。

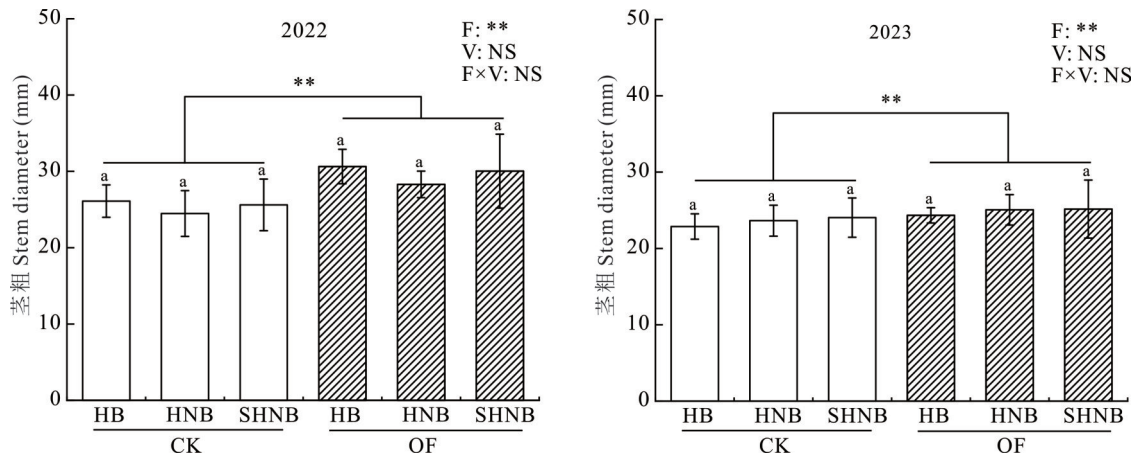


图 6 不同类型玉米品种的茎粗

Fig. 6 Stem diameter of different types of maize varieties

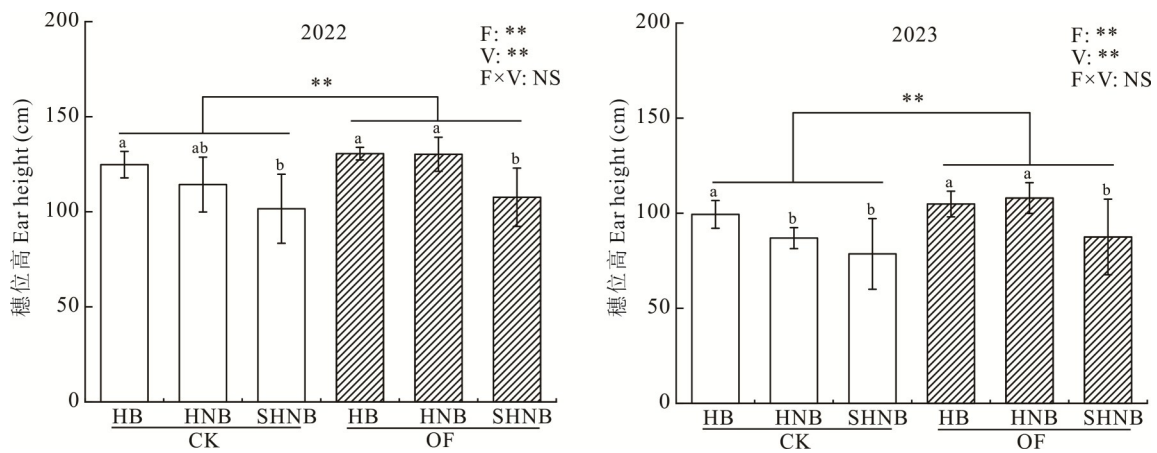


图 7 不同类型玉米品种的穗位高

Fig. 7 Ear height of different types of maize varieties

2.3 不同类型玉米品种的穗部特征分析

2022 年,施肥、品种均显著影响穗长、行粒数和秃尖长,而二者交互作用仅对秃尖长影响显著($P < 0.05$);2023 年,品种之间的穗长、行粒数、穗粗和秃尖长均差异显著,但穗行数差别不大。而施肥对各穗部性状均有显著影响,施肥与品种的交互作用仅对百粒重影响不显著($P > 0.05$),对其余各穗部性状均有显著影响(表 2)。

2022 年两种施肥模式下各类型品种之间的穗行数和穗粗差异均不显著($P > 0.05$),但是在 CK 条件下,HB 型品种的穗长、行粒数分别较 HNB 和 SHNB 型品种显著高 7.1%、16.1% 和 15.0%、14.7%,同时 HB 型品种的秃尖长显著低于 HNB 和 SHNB 型品种(均降低了 75.0%);在 OF 条件下,HB 和 HNB 型品种的穗长、行粒数之间差异不显著($P > 0.05$),但二者的穗长分别较 SHNB 型品种显著高 13.0% 和 11.7%,行粒数分别显著高 10.8% 和 7.4%。2023 年在 CK 条件下,与 HNB 和 SHNB 型品种相比,HB 型品种的穗长、穗行数、行粒数和穗粗分别显著提高了 19.5% 和 19.5%、6.7% 和 9.6%、25.6% 和 19.4%、16.7% 和 11.4%,同时 HB 型品种的秃尖长分别比 HNB 和 SHNB 显著降低了 78.6% 和 88.5%;在 OF 条件下,各类型玉米品种的秃尖长、穗粗和穗行数之间差异不显著($P > 0.05$),HB 和 HNB 型玉米品种的穗长、行粒数之间差异也不显著,但 HB 型玉米品种的穗长和行粒数分别较 SHNB 型玉米品种显著高 9.3% 和 10.3%(表 2)。

2022年施肥、品种和二者交互作用对玉米百粒重的影响均不显著($P>0.05$),2023年仅施肥对百粒重影响显著($P<0.05$,表2)。2022和2023年施肥、品种以及二者交互作用对穗粒数影响均达显著水平。具体分析发现,2022年CK条件下,HB型品种的穗粒数分别较HNB和SHNB型品种显著高18.4%和18.7%;OF条件下,HB和HNB型品种的穗粒数之间差异不显著,但分别较SHNB型品种显著高14.8%和12.0%。在两种施肥模式下各类品种的百粒重之间差异均不显著。2023年结果与2022年完全一致。

表2 不同类型玉米品种的穗部性状

Table 2 Ear characters of different types of maize varieties

年份	施肥	品种	穗长	秃尖长	行粒数	穗粗	穗行数	穗粒数	百粒重
Year	Fertilization (F)	Variety (V)	Ear length (cm)	Bald tip length (cm)	Kernels per row	Ear diameter (cm)	Rows per ear	Kernels per ear	100-grain weight (g)
2022	CK	HB	18.0±0.72a	0.2±0.09b	38.3±2.70a	4.4±0.44a	15.7±0.79a	608.4±39.40a	32.6±2.93a
		HNB	16.8±1.11b	0.8±0.53a	33.3±4.66b	4.2±0.54a	16.1±1.57a	513.8±70.64b	32.4±3.10a
		SHNB	15.5±0.83c	0.8±0.19a	33.4±1.90b	4.6±0.47a	15.4±1.34a	512.4±26.84b	33.2±1.44a
	OF	HB	18.3±1.35a	0.2±0.03a	39.0±2.53a	4.8±0.57a	16.4±0.84a	636.0±48.42a	34.1±1.97a
		HNB	18.1±1.06a	0.2±0.02a	37.8±1.14a	4.5±0.42a	16.5±1.47a	620.6±53.43a	33.9±2.53a
		SHNB	16.2±0.61b	0.2±0.03a	35.2±1.31b	4.5±0.45a	15.8±1.02a	554.2±39.36b	34.0±1.56a
2023	CK	HB	18.4±1.82a	0.3±0.18c	36.3±2.65a	4.9±0.40a	16.0±0.58a	578.6±47.49a	35.6±3.70a
		HNB	15.4±1.20b	1.4±0.28b	28.9±2.27b	4.2±0.40b	15.0±1.19b	435.6±60.26b	34.5±2.08a
		SHNB	15.4±1.11b	2.6±0.73a	30.4±2.87b	4.4±0.40b	14.6±0.45b	441.0±32.47b	33.4±3.85a
	OF	HB	18.8±1.64a	0.2±0.03a	37.6±2.51a	5.0±0.46a	15.6±0.68a	583.7±32.61a	39.3±2.03a
		HNB	18.8±1.07a	0.2±0.02a	36.2±2.82ab	5.0±0.43a	16.0±1.10a	581.5±25.99a	41.1±2.03a
		SHNB	17.2±0.51b	0.2±0.02a	34.1±3.52b	4.7±0.23a	15.8±0.45a	536.6±47.92b	38.7±3.72a
2022	F		**	**	**	NS	NS	**	NS
	V		**	**	**	NS	NS	**	NS
	F×V		NS	**	NS	NS	NS	*	NS
2023	F		**	**	**	**	**	**	**
	V		**	**	**	**	NS	**	NS
	F×V		**	**	**	**	**	**	NS

不同小写字母表示同一施肥模式不同品种在0.05水平上存在显著差异。Different lowercase letters indicate the significant differences among different varieties under the same fertilization mode at 0.05 level. *表示在0.05水平差异显著,**表示在0.01水平差异显著,NS表示差异不显著。* indicates significant difference at 0.05 level, ** indicates significant difference at 0.01 level, and NS indicates no significant difference.

2.4 不同类型玉米品种的各农艺性状耦合协调度分析

对各类型玉米品种上述各个指标进行耦合协调度计算,结果发现(图8),2022年品种和2023年品种、施肥、施肥和品种互作均对玉米品种的耦合协调度影响显著($P<0.05$)。2022年在CK条件下,HB型品种的耦合协调度较HNB型品种显著高13.1%,但与SHNB型品种差异不显著;OF条件下,HB型品种的耦合协调度和HNB型品种之间差异不显著($P>0.05$),但二者分别较SHNB型品种显著高21.2%和13.3%。2023年在CK条件下,HB型品种的耦合协调度较HNB型和SHNB型品种分别显著高26.0%和26.1%;OF条件下,HB型品种的耦合协调度和HNB型品种之间差异不显著,但二者分别较SHNB型品种显著高22.0%和26.4%。说明HB型品种各农艺性状之间的耦合协调能力总体明显优于HNB型和SHNB型。

2.5 不同玉米品种农艺性状与产量的关系分析

对10个玉米品种两年的农艺性状与产量结果进行相关性分析发现(图9),穗长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒

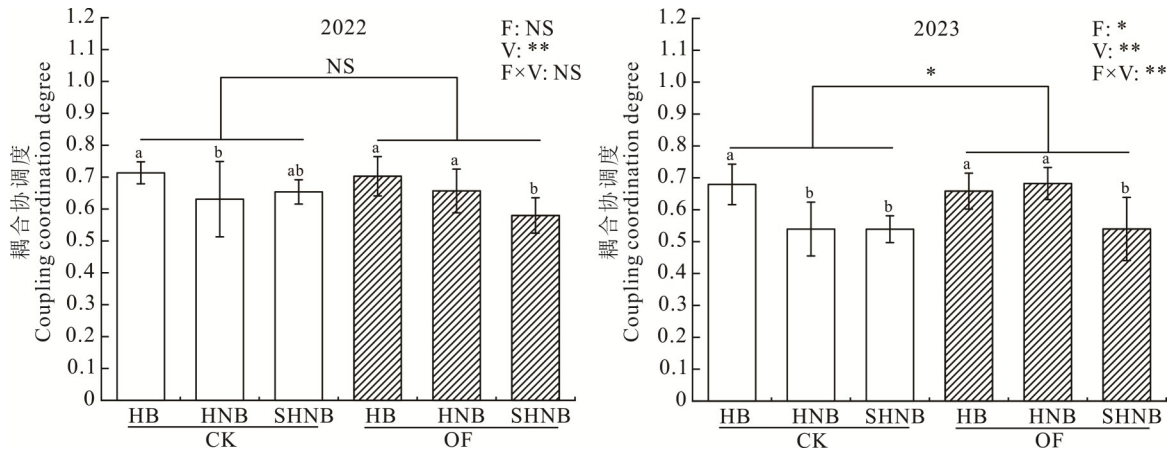


图 8 不同类型玉米品种的耦合协调度
Fig. 8 Coupling coordination degree of different types of maize varieties

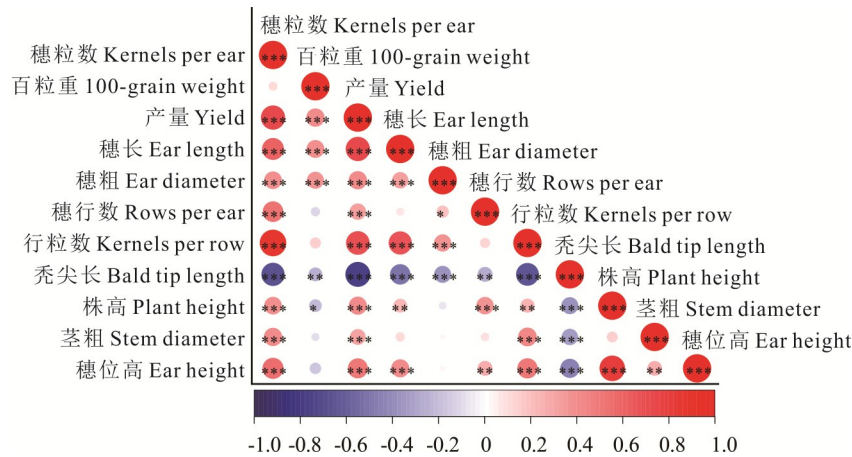


图 9 不同类型玉米品种农艺性状与产量的相关性
Fig. 9 Correlation between agronomic traits and yield of different types of maize varieties (n=120)

*, **, ***分别表示在 0.05, 0.01, 0.001 水平显著相关。*, **, and *** indicate significant correlations at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

数、百粒重、株高、茎粗、穗位高与产量均呈极显著正相关关系，而秃尖长与产量呈极显著负相关关系 ($P \leq 0.001$)。进一步分析各农艺性状对产量的贡献度发现 (图 10)，秃尖长对产量的贡献度最高，为 19.0%，其次依次为穗粒数 (16.5%)、百粒重 (14.7%)、穗长 (12.0%)、行粒数 (10.1%)、穗位高 (6.5%)、株高 (6.5%)、穗行数 (6.4%)、穗粗 (5.7%) 和茎粗 (2.7%)。其中秃尖长、穗粒数、百粒重、穗长、行粒数、穗位高、株高对产量的贡献均达到显著水平。

2.6 耐瘠高产型玉米品种的主要农艺性状特征值分析

将上述对产量贡献达到显著水平的各指标与产量进一步进行边界线拟合分析发现，除了秃尖长与产量呈线性相关外，其余各指标均与产量呈抛物线关系。说明在一定范围内，产量随着各农艺性状特征值的增加而增加，而当各指标达到峰值后，产量又呈下降趋势 (图 11)。

根据上述建立的边界线方程可获得对应 7 个指标的最高预测产量为 12218.0~12666.2 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，95% 最高预测产量为 11607.1~12032.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，95% 最高预测产量平均值为 11816.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3)。以 95% 最高预测

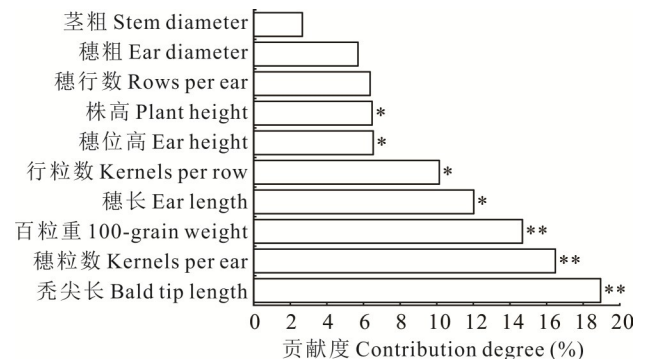


图 10 不同类型玉米品种农艺性状对产量的贡献度
Fig. 10 Contribution degree of agronomic traits of different types of maize varieties to yield

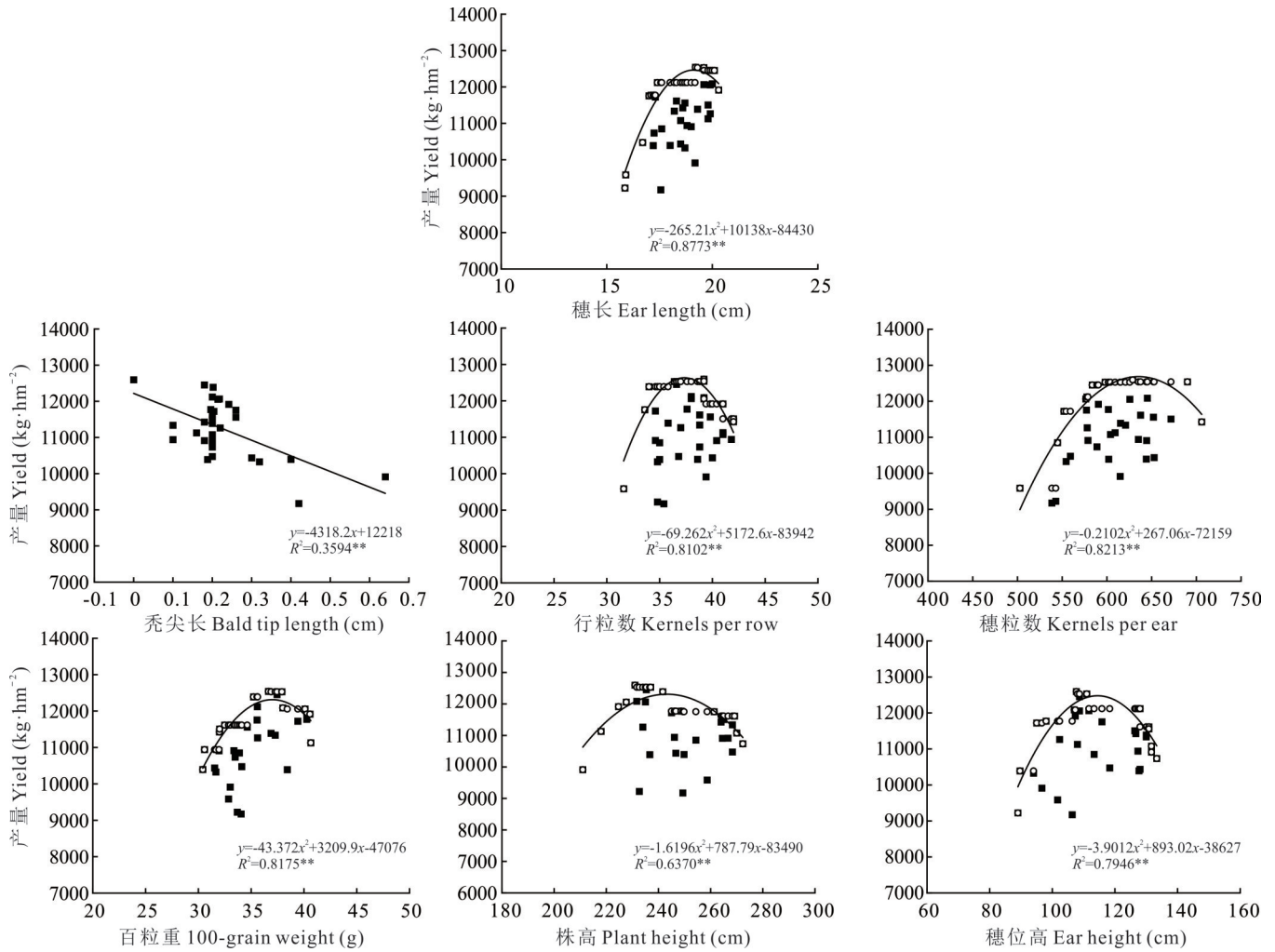


图 11 耐瘠高产型玉米品种农艺性状与产量的关系

Fig. 11 Relationship between agronomic traits and yield of low-fertility-tolerant and high-yielding maize (n=36)

表 3 耐瘠高产型玉米的主要农艺性状指标特征值

Table 3 Characteristic values of main agronomic characters of low-fertility-tolerant and high-yielding maize

指标 Indexes	最高预测产量 Highest forecast yield (kg·hm ⁻²)	95%最高预测产量 95% highest forecast yield (kg·hm ⁻²)	适宜范围 Suitable value
穗长 Ear length	12454.6	11831.9	17.80~20.42 cm
秃尖长 Bald tip length	12218.0	11607.1	<0.05 cm
行粒数 Kernels per row	12632.6	12000.9	34.32~40.36
穗粒数 Kernels per ear	12666.2	12032.9	578.95~691.55
百粒重 100-grain weight	12314.0	11698.3	34.31~39.70 g
株高 Plant height	12307.3	11691.9	229.43~256.98 cm
穗位高 Ear height	12478.1	11854.2	103.38~125.52 cm

产量平均值和实际生产现状为参照标准,将 12000 kg·hm⁻²作为玉米目标产量,根据边界线方程可以计算出达到此目标产量时的玉米主要农艺性状适宜范围,分别是:穗长 17.80~20.42 cm,秃尖长 <0.05 cm,行粒数 34.32~40.36,穗粒数 578.95~691.55,百粒重 34.31~39.70 g,株高 229.43~256.98 cm,穗位高 103.38~125.52 cm。

3 讨论

3.1 耐瘠高产型玉米品种的主要农艺性状分析

不同基因型作物水肥利用效率、抗逆能力等均存在很大差别^[21-22]。选育和推广高产高效、耐瘠抗逆性能优良的玉米品种,可有效提高有限耕地上的单位面积生产力,在保证产量的同时提高肥料利用效率,缓解环境压力^[23]。已有研究表明,不同品种的玉米株型明显不同,而良好的株型可以通过改善群体的冠层结构和光能截获率来促进光合物质的生产,进而促进籽粒形成来获得高产^[24]。株高和穗位高等高度特征是玉米株型重要的表型性状之一,与玉米地上部生物量和产量密切相关,尤其是株高,可以作为单一因子来衡量玉米营养生长及产量潜力^[25]。前人研究表明,株高、穗位高与生物量和产量均呈显著正相关关系^[26]。本研究连续两年的结果也发现,耐瘠高产型玉米品种(HB)的株高、穗位高和产量均显著高于不耐瘠次高产型玉米品种(SHNB)。这可能是因为较高的株高保证了穗位以上较多的叶片数^[27],有效增加了冠层内光的截获量,从而促进了叶片的光合作用和干物质积累^[28-30],同时更有利于籽粒灌浆^[31]。但并不是株高和穗位高越高产量就越高(图11),一方面株高、穗位高持续增加,基部节间会变细,穗位高上移使重心提高,进而增加倒伏风险^[32],另一方面地上部株高、穗位高过高,也会导致玉米因营养生长过旺而降低非结构性碳水化合物向籽粒的转运,同时导致花芽分化缓慢,花芽数量减少等^[33-34],不利于产量的形成。由此可见,玉米生产中平衡营养生长与生殖生长的关系至关重要。

穗长、秃尖长、穗行数、行粒数、穗粒数、百粒重等良好的穗部性状也是保证玉米高产的基础。但本研究两年的结果表明,3类玉米品种的百粒重之间差异不显著,原因是本研究根据10个供试玉米品种的产量结果进行归类,而同一类型内不同玉米品种的百粒重变异较大,因此导致统计分析不显著。但对百粒重与产量的相关性进行分析发现二者呈显著的正相关关系,且对产量的贡献度达14.68%。进一步对产量与百粒重进行边界线分析发现,二者表现为显著的抛物线关系(图11)。说明在养分瘠薄障碍型土壤上,保持较高的百粒重对获得玉米高产仍旧是必要的,但并不是越高越好。

3.2 耐瘠高产型玉米品种的高产机理分析

通过强源扩库协调源库关系是保证玉米高产的关键,但与强源相比较,提高结实率和增加粒重,主攻增加群体总粒数,扩大籽粒库容,可从内源方面为提高花后干物质积累量实现强源,同时促进光合产物向库器官的分配,是不同生态区不同品种共同增产的关键途径^[35-36]。戴明宏等^[37]研究发现,不同生态区和不同品种的玉米产量与穗粒数的相关性均明显大于粒重。本研究发现,由于2022年临近收获时的短时间疾风骤雨使得玉米倒伏严重,限制了花后干物质质量的积累和灌浆,导致百粒重明显低于2023年,但2022年各类型品种的穗粒数明显高于2023年,体现出了产量构成要素之间的相互制约和协调关系。对3类品种的穗粒数具体分析可见,在瘠薄土壤上(不施肥的CK条件下),不耐瘠高产型品种(HNB)和不耐瘠次高产型品种(SHNB)的穗粒数基本相当,但耐瘠高产型玉米品种(HB)的穗粒数2022和2023年比另两类品种分别平均显著提高了18.6%和32.0%。而在施肥条件下(OF),HNB的穗粒数得到了明显改善,两年的结果与HB差异均不显著,但HB型2022和2023年分别显著高于SHNB 14.8%和8.8%。进一步分析发现,HB型品种较高穗粒数的获得是通过穗长显著提高,秃尖长显著降低,导致行粒数明显提高的结果。而在2022年的土壤地力条件下,无论施肥还是不施肥,3类品种的穗粗和穗行数差异均不大。但在2022年基础上于2023年继续不施肥,此时HB型玉米品种的穗粗和穗行数也均显示出了明显优势。由此可见,通过保持良好的穗部性状保证较高的穗粒数也是HB型品种在瘠薄土壤上获得高产的关键,与陆卫平等^[35]、王永宏等^[36]、戴明宏等^[37]在其他条件下的研究结果一致,进一步证明了通过增加穗粒数增加库容对提高玉米产量的重要性。但产量构成因素以及各农艺性状指标对产量的影响程度都不是孤立的,由于光合产物的分配和竞争导致它们之间存在着一定的相互制约和相互补偿关系,很难实现同步增长^[34]。因此,各农艺性状指标的相互协调程度对玉米最终产量的形成也至关重要。对各类型品种各农艺性状进行综合分析可见,HB型玉米品种在瘠薄土壤上不施肥条件下的耦合协调度显著高于HNB和SHNB型,而在施肥条件下,HB和HNB也显著高于SHNB,说明耐瘠高产型玉米品种各农艺性状之间有良好的相互协调能力,从而保证了群体冠层内光照条件充足,花后干物质积累量大,无效花和败育粒下降,有效促进了库潜力的发挥。

4 结论

根据在氮磷含量明显偏低的瘠薄土壤上不施肥(CK)和施肥(OF)条件下的平均产量,将供试品种划分为耐瘠高产型、不耐瘠高产型和不耐瘠次高产型3类。耐瘠高产型玉米品种的株高、穗位高、穗长、行粒数和穗粒数显著提高,而秃尖长显著降低,同时该类型品种的各农艺性状耦合协调度显著提高,最终表现出了明显的产量优势。耐瘠高产型品种在瘠薄土壤上获得 $12000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 目标产量的主要农艺性状适宜范围分别为:穗长 $17.80\sim 20.42\text{ cm}$,秃尖长 $<0.05\text{ cm}$,行粒数 $34.32\sim 40.36$,穗粒数 $578.95\sim 691.55$,百粒重 $34.31\sim 39.70\text{ g}$,株高 $229.43\sim 256.98\text{ cm}$,穗位高 $103.38\sim 125.52\text{ cm}$ 。

参考文献 References:

- [1] Niu L L, Qin W F, You Y L, *et al.* Effects of precipitation variability and conservation tillage on soil moisture, yield and quality of silage maize. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1198649.
- [2] Bai J, Tian W C, Qiu Z J, *et al.* Effects of different nitrogen types and levels on the yield and forage quality of silage maize in saline-alkali soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(9): 1683–1693.
白炬, 田伟辰, 仇子健, 等. 不同氮肥类型及用量对盐碱耕地青贮玉米产量及饲用品质的影响. *植物营养与肥科学报*, 2024, 30(9): 1683–1693.
- [3] Rizzo G, Monzon J P, Tenorio F A, *et al.* Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(4): 1–6.
- [4] Li A Q, Zhang J, Cui X L, *et al.* Nitrogen fertilizer synergist in urea under irrigation for high yield of summer maize at the filling stage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 99–110.
李澳旗, 张俊, 崔晓路, 等. 不同灌水量下尿素添加适宜氮肥增效剂促进夏玉米灌浆增产. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 99–110.
- [5] Liu H, Zhu X M, Zhuo F Y, *et al.* Evaluation of the contribution of pest control to three major grain crops in China in 2023. *China Plant Protection*, 2024, 44(1): 62–66, 103.
刘慧, 朱晓明, 卓富彦, 等. 2023年全国三大粮食作物病虫害防控植保贡献率评价研究报告. *中国植保导刊*, 2024, 44(1): 62–66, 103.
- [6] Dai J R, E L Z. Scientific and technological innovation of maize breeding in China. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(1): 1–5.
戴景瑞, 鄂立柱. 我国玉米育种科技创新问题的几点思考. *玉米科学*, 2010, 18(1): 1–5.
- [7] Yang D. Contribution analysis of driving factors for maize yield growth in China. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
杨笛. 中国玉米产量增长的驱动因素分析. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [8] Sun B, Zhu A N, Yao R J, *et al.* Research progress on barrier remediation technology and productivity enhancement model for fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkali soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1231–1247.
孙波, 朱安宁, 姚荣江, 等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1231–1247.
- [9] Zhao G, Wang S Y, Fan T L, *et al.* Effects of planting density of different plant type maize on yield in northwest dry highland of loess plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 101–108.
赵刚, 王淑英, 樊廷录, 等. 西北旱塬区不同株型玉米密播对产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 101–108.
- [10] Department of Seed Industry Management, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. On the publicity of varieties approved by the Third Variety Approval Meeting of the Fifth National Crop Variety Approval Committee. (2023-08-03)[2024-09-01]. http://www.zys.moa.gov.cn/gsgg/202308/t20230803_6433424.htm.
中华人民共和国农业农村部种业管理司. 关于第五届国家农作物品种审定委员会第三次品种审定会议通过品种的公示. (2023-08-03)[2024-09-01]. http://www.zys.moa.gov.cn/gsgg/202308/t20230803_6433424.htm.
- [11] Xu T J, Lü T F, Li Z H, *et al.* Comparison of heat tolerance of maize hybrids and their parental inbreds with different genotypes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(2): 403–415.
徐田军, 吕天放, 李自豪, 等. 不同玉米杂交种及其亲本自交系耐热性的差异比较. *中国农业科学*, 2024, 57(2): 403–415.

- [12] Cui R, Wang T Y, Wang C Y, *et al.* Effects of drought stress on growth characters and yield of different maize varieties. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(S1): 94–100.
崔蓉, 王天野, 王呈玉, 等. 干旱胁迫对不同玉米品种生长性状及产量的影响. *华北农学报*, 2021, 36(S1): 94–100.
- [13] Zhang J M. Evaluation of adaptability of different maize varieties in medium saline-alkali land. Yinchuan: Ningxia University, 2024.
张晋美. 不同品种玉米在中度盐碱地适应性评价. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [14] Cao C Y, Dang H K, Li J, *et al.* Responses of yield traits and grain filling characteristics of maize to sowing dates and their relationships with meteorological factors. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(5): 710–724.
曹彩云, 党红凯, 李佳, 等. 一年一作玉米产量性状和籽粒灌浆特性对播期的响应及其与气象因子的关系. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5): 710–724.
- [15] Zhang J J, Chen J P, Tang Y L, *et al.* Effects of drought stress before and after anthesis on photosynthetic characteristics and yield of summer maize after re-watering. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(5): 1397–1409.
张俊杰, 陈金平, 汤钰镂, 等. 花期前后干旱胁迫对复水后夏玉米光合特性与产量的影响. *作物学报*, 2023, 49(5): 1397–1409.
- [16] Zhang Y H, Wang R, Xu Z G, *et al.* Responses of yield traits to planting density and cultivar of spring maize in drylands under different rainfall types. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 136–144.
张元红, 王瑞, 徐宗贵, 等. 不同降水年型下旱地玉米产量性状对种植密度和品种的反应. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 136–144.
- [17] Department of Agriculture and Rural Affairs of Hebei Province. Classification diagnosis of main indexes of cultivated land fertility: DB 13/T 5406-2021. <https://www.guoturen.com/wenku-1244>.
河北省农业农村厅. 耕地地力主要指标分级诊断: DB 13/T 5406-2021. <https://www.guoturen.com/wenku-1244>.
- [18] Bo Q F, Ma T, Wei X X, *et al.* Improvement of maize post-silking agronomic traits contributes to high grain yield under N-efficient cultivars. *Field Crops Research*, 2024, 313: 109417.
- [19] Zhou J, Ma S P. Analysis method and application of SPSSAU scientific research data. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2024.
周俊, 马世澎. SPSSAU 科研数据分析方法与应用. 北京: 电子工业出版社, 2024.
- [20] Wang D, Zhou Y Y, Guo L H, *et al.* Leaf NPK concentration requisite and chemical fertilizer inputs for high yield and quality of peach production in central Hebei Province. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(2): 269–278.
王栋, 周媛媛, 郭路航, 等. 冀中地区桃树优质高产的叶片氮磷钾临界值范围及化肥投入量. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 269–278.
- [21] Xiong S P, Wu K Y, Wang X C, *et al.* Analysis of root absorption characteristics and nitrogen utilization of wheat genotypes with different N efficiency. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2267–2279.
熊淑萍, 吴克远, 王小纯, 等. 不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2267–2279.
- [22] Liu Y E, Hou P, Zhang W Y, *et al.* Drought resistance of nine maize cultivars released from the 1970s through the 2010s in China. *Field Crops Research*, 2023, 302: 109065.
- [23] Zhang P P, Liu J B, Huang L, *et al.* Screening of high nitrogen use efficiency varieties and analysis of yield increase potentials of summer maize in Huang-Huai-Hai region. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(5): 35–44.
张盼盼, 刘京宝, 黄璐, 等. 黄淮海地区夏玉米氮高效品种筛选及增产潜力分析. *玉米科学*, 2022, 30(5): 35–44.
- [24] Feng J X. Effects of plant type characteristics on population structure of maize varieties. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.
冯家兴. 玉米品种株型特征对群体结构的影响. 保定: 河北农业大学, 2021.
- [25] Sharma L K, Bu H, Franzen D W, *et al.* Use of corn height measured with an acoustic sensor improves yield estimation with ground based active optical sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124: 254–262.
- [26] Lindsey A J, Barker D J, Metzger J D, *et al.* Physiological and morphological response of a drought-tolerant maize hybrid to agronomic management. *Agronomy Journal*, 2018, 110: 1354–1362.
- [27] Sun J Y, Li S M, Dong L P. Analysis on plant characteristics, yield structure and yield-increasing potential of different maize varieties. *China Seed Industry*, 2014(4): 44–46.
孙君艳, 李淑梅, 董丽平. 不同玉米品种的植株特性与产量结构及其增产潜力分析. *中国种业*, 2014(4): 44–46.

- [28] Xue H Y, Han Y C, Li Y B, *et al.* Spatial distribution of light interception by different plant population densities and its relationship with yield. *Field Crops Research*, 2015, 184: 17–27.
- [29] Wang M, Zhou G Y, Gao J L, *et al.* Distribution and matching characteristics of light and nitrogen in maize canopy of high-density tolerance varieties. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(12): 3179–3191.
王梦, 周光远, 高聚林, 等. 玉米耐高密品种冠层光氮分布及匹配特征研究. *作物学报*, 2022, 48(12): 3179–3191.
- [30] Kang C R, Xie J H, Li L L, *et al.* Effects of planting density and nitrogen fertilizer rate on maize yield and photosynthetic characteristics in arid areas of central Gansu, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(5): 141–149.
康彩睿, 谢军红, 李玲玲, 等. 种植密度与施氮量对陇中旱农区玉米产量及光合特性的影响. *草业学报*, 2020, 29(5): 141–149.
- [31] Subedi K D, Ma B L. Ear position, leaf area, and contribution of individual leaves to grain yield in conventional and leafy maize hybrids. *Crop Science*, 2005, 45: 2246–2256.
- [32] Zhao Y, Zhang S, Lv Y, *et al.* Optimizing ear-plant height ratio to improve kernel number and lodging resistance in maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Research*, 2022, 276: 108376.
- [33] Tang Q, Ren J H, Du X, *et al.* Reduced stem nonstructural carbohydrates caused by plant growth retardant had adverse effects on maize yield under low density. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1035254.
- [34] Cao W X. General introduction of crop cultivation (second edition). Beijing: Science Press, 2011.
曹卫星. 作物栽培学总论(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [35] Lu W P, Chen G P, Guo J L, *et al.* Study on the source and sink in relation to grain yield under different ecological areas in maize (*Zea mays* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 1997(6): 727–733.
陆卫平, 陈国平, 郭景伦, 等. 不同生态条件下玉米产量源库关系的研究. *作物学报*, 1997(6): 727–733.
- [36] Wang Y H, Wang K R, Zhao R L, *et al.* Relationship between the source and sink of spring maize with high yield. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(2): 257–269.
王永宏, 王克如, 赵如浪, 等. 高产春玉米源库特征及其关系. *中国农业科学*, 2013, 46(2): 257–269.
- [37] Dai M H, Zhao J R, Yang G H, *et al.* Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1585–1595.
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. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1585–1595.