



刘猷文,王君涵,屈子人,孟庆锋,王璞.近20年玉米品种花丝花药颜色变化对产量的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(03):13-24.

LIU Youwen, WANG Junhan, QU Ziren, MENG Qingfeng, WANG Pu. Impact of silk and anther color variation in maize varieties on yield over the past two decades[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03): 13-24.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.02

近20年玉米品种花丝花药颜色变化对产量的影响

刘猷文 王君涵 屈子人 孟庆锋* 王璞

(中国农业大学农学院,北京100193)

摘要 为挖掘玉米花丝和花药颜色在育种中的潜在价值,基于2003—2022年我国北方春播玉米区和黄淮海夏播玉米区玉米审定品种信息,构建品种数据库,通过线性拟合分析花丝和花药颜色演变趋势,利用多重比较分析不同颜色花丝和花药的玉米品种产量及相关农艺性状的特征。结果表明:1)在北方春播玉米区,紫色、红色和绿色花丝品种占比分别为35.2%、25.5%和25.3%,总占比86.0%。紫色、黄色和绿色花药品种占比分别为47.1%、42.8%和4.6%,总占比94.5%。在黄淮海夏播玉米区,紫色、红色和绿色花丝品种占比分别为46.6%、28.2%和19.9%,总占比94.7%。紫色、黄色和绿色花药品种占比分别为45.3%、38.3%和8.2%,总占比91.8%。2)2003—2022年,在北方春播玉米区,紫色花丝品种占比由0.0%上升到44.8%,红色花丝品种占比由75.0%下降至25.4%;紫色花药品种占比由12.5%上升至71.6%,黄色花药品种占比由75.0%下降至14.9%。在黄淮海夏播玉米区,紫色花丝品种占比由0.0%上升至73.1%,红色花丝品种占比由75.0%下降至1.5%;紫色花药品种占比由12.5%上升至41.8%,黄色花药品种占比由87.5%下降至43.3%。绿色花丝品种和绿色花药品种占比在2个种植区域均无显著变化。3)在北方春播玉米区,紫色和绿色花丝品种平均产量分别为12.04和11.84 t/hm²,均显著高于红色花丝品种,紫色花药品种平均产量为12.14 t/hm²,显著高于黄色和绿色花药品种。在黄淮海夏播玉米区,不同花丝颜色的品种间产量无显著差异,紫色花药品种平均产量为9.80 t/hm²,显著高于黄色花药品种。4)在北方春播玉米区,紫色花丝品种平均种植密度和单位面积粒数分别为6.4万株/hm²和3.9×10⁷粒/hm²,分别比红色花丝品种高4.9%和2.6%;紫色花药品种的平均种植密度和单位面积粒数分别为6.4万株/hm²和3.9×10⁷粒/hm²,分别比黄色花药品种高4.9%和5.4%。在黄淮海夏播玉米区,紫色花丝品种平均种植密度和单位面积粒数分别为6.7万株/hm²和3.6×10⁷粒/hm²,分别比红色花丝品种高4.7%和2.9%。紫色与黄色花药品种间的种植密度和单位面积粒数均无显著差异。综上,2003—2022年,北方春播玉米区和黄淮海夏播玉米区审定的玉米品种花丝和花药主要颜色分别由红色和黄色演变为紫色,紫色花丝和花药的品种产量、耐密植性和单位面积粒数更高。

关键词 玉米;花丝颜色;花药颜色;种植密度;单位面积粒数

中图分类号 S32

文章编号 1007-4333(2026)03-0013-12

文献标志码 A

Impact of silk and anther color variation in maize varieties on yield over the past two decades

LIU Youwen, WANG Junhan, QU Ziren, MENG Qingfeng*, WANG Pu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract This study aimed to explore the potential significance of maize silk and anther colors in breeding. Information from maize varieties approved in the North China spring maize region and Huang-Huai-Hai summer maize region between 2003 and 2022 were adopted to constructed database. Linear regression analysis was employed to examine temporal trend in the proportions of silk and anther colors over the year. Multiple comparison analyses were conducted to evaluate yield and related agronomic traits among varieties with different

收稿日期:2025-04-18;接受日期:2025-07-23

基金项目:国家重点研发计划(2023YFE0105000);中国农业大学2115人才工程资助;北京市大学生创新创业训练项目(S202410019035)

第一作者:刘猷文(ORCID:0009-0001-9264-9880),本科生,E-mail:liuyouwen@cau.edu.cn

通讯作者:孟庆锋(ORCID:0000-0003-0047-3089),教授,主要从事作物高产高效栽培理论和技术研究,E-mail:mengqf@cau.edu.cn

silk and anther colors. The results showed that: 1) In the North China spring maize region, purple, red, and green silk accounted for 86.0% of varieties (35.2%, 25.5%, and 25.3%, respectively), while purple, yellow, and green anther comprised 94.5% (47.1%, 42.8%, and 4.6%, respectively). In the Huang-Huai-Hai summer maize region, purple, red, and green silks represented 94.7% (46.6%, 28.2%, and 19.9%, respectively), and purple, yellow, and green anthers accounted for 91.8% (45.3%, 38.3%, and 8.2%, respectively). 2) From 2003 to 2022, the proportion of purple silk varieties increased from 0.0% to 44.8%, the proportion of purple anther varieties increased from 12.5% to 71.6%, while red silk declined from 75.0% to 25.4% and yellow anther declined from 75.0% to 14.9% in the North China spring maize region. As far as in the Huang-Huai-Hai summer maize region, the proportion of purple silk varieties increased from 0.0% to 73.1%, the proportion of purple anther varieties increased from 12.5% to 41.8%, while red silk declined from 75.0% to 1.5% and yellow anther declined from 87.5% to 43.3%. The proportions of green silk and green anther varieties showed no significant changes in either region. 3) In the North China spring maize region, purple (12.04 t/hm^2) and green (11.84 t/hm^2) silk varieties showed significantly higher yields than red silk varieties, and purple anther varieties (12.14 t/hm^2) outperformed yellow and green anther varieties. In the Huang-Huai-Hai summer maize region, purple anther varieties yielded (9.80 t/hm^2) significantly higher than yellow anther varieties. 4) In the North China spring maize region, purple silk varieties achieved 4.9% higher density ($6.4 \times 10^4 \text{ plants/hm}^2$) and 2.6% greater kernel number per unit area ($3.9 \times 10^7 \text{ grains/hm}^2$) compared to red silk varieties. Purple anther varieties showed 4.9% higher density ($6.4 \times 10^4 \text{ plants/hm}^2$) and 5.4% higher kernel number per unit area ($3.9 \times 10^7 \text{ grains/hm}^2$) than yellow anther varieties. In the Huang-Huai-Hai summer maize region, purple silk varieties exhibited 4.7% higher density ($6.7 \times 10^4 \text{ plants/hm}^2$) and 2.9% greater kernel number per unit area ($3.6 \times 10^7 \text{ grains/hm}^2$) than red silk varieties, while no significant differences were observed between purple and yellow anther varieties in component of density and kernel number per unit area. In summary, from 2003 to 2022, the predominant silk and anther colors of maize varieties in both the North China spring maize region and the Huang-Huai-Hai summer maize region shifted from red and yellow to purple. Varieties with purple silk and anther exhibit higher yield, greater tolerance to high planting density, and a higher kernel number per unit area.

Keywords maize; silk color; anther color; planting density; kernel number per unit area

玉米作为我国播种面积最大、总产量最高的作物,产量稳定提升对于我国粮食安全具有重要意义。种子是农业的芯片,在我国玉米单产增长的诸因素中,遗传改良的贡献率约占35%~40%^[1]。从20世纪50年代—21世纪初,我国玉米总产量增加的56%源于品种改良^[2],优良品种选育对于玉米生产具有重要意义。农业农村部全国重点农产品市场信息平台统计数据显示,北方春播玉米区和黄淮海夏播玉米区是我国重要的玉米产区,占全国玉米播种面积的48%和29%,总产量也占据了全国玉米总产量的近80%。因此,解析这2个区域玉米品种的选育特征十分重要。花瓣色素沉积对全球臭氧和温度变化响应显著^[3]。已有研究显示,花对紫外线的吸收影响花朵微环境并保护花粉免受中波紫外线(UVB)的胁迫^[4],深色花粉能够降低高温对花粉萌发的不利影响^[5]。花器官各部分的颜色影响着授粉和生殖适应性,全球变暖过程中的玉米花丝和花药颜色变化及其影响需要关注,对于玉米新品种选育具有重要

价值。

花丝和花药是玉米花器官的重要组成部分,是有性繁殖的关键器官。高温会抑制花药开裂、引发花丝枯萎进而影响结实率^[6],而干旱胁迫会抑制花丝伸长导致减产^[7]。在玉米密植栽培条件下,玉米花丝分化会延迟,结构及养分运输功能会受到影响^[8]。同时,温度、密度、干旱等都会对花丝和花药的生长产生影响,最终影响产量。已有研究发现,花丝和花药颜色受花青甙浓度的影响^[9-10]。相较于绿色的雄穗,粉红色和紫色雄穗具有更高的花青甙浓度和更强的1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力^[11]。进一步研究发现,花青甙累积主要受遗传因素影响^[11]。花青甙可作为非酶抗氧化剂,起到强于抗坏血酸(VC)和维生素E(VE)的抗氧化作用^[12-14],能够维持活性氧(reactive oxygen species, ROS)稳态^[15],与植物的抗寒性、抗旱性以及抗氧化能力等相关^[16]。Mittler等^[17]研究发现,各类生物和非生物逆境胁迫均会破

坏植物 ROS 稳态。在水稻花药发育过程中,破坏 ROS 稳态会导致花粉育性降低^[18-19]。玉米籽粒发育过程中的 ROS 稳态破坏会阻碍营养物质从营养器官向生殖器官的转运,导致籽粒变小、干瘪^[20]。

在我国玉米品种选育进程中,品种抗逆性逐渐增强^[21]。与此相同,美国玉米品种选育过程中最显著的农艺性状变化均与对各种生物或非生物逆境的抵抗力相关^[22]。对于被子植物花器官来说,可通过改变颜色来适应环境变化^[3]。当前,玉米品种选育过程中,与花青甙累积密切相关的玉米花丝和花药颜色性状变化及对产量影响的研究鲜有报道。本研究通过解析 2003—2022 年我国北方春播玉米区和黄淮海夏播玉米区玉米品种选育过程中花丝和花药颜色性状变化趋势,分析不同花丝和花药颜色玉米品种间的产量及产量构成因素的变化,旨在挖掘玉米花丝和花药颜色在抗逆育种中的潜在价值,以期为玉米品种选育和制定适应性栽培措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

从农业农村部种业管理司种业数据大平台(<http://202.127.42.145>)检索 2003—2022 年 8 259 个北方春播玉米区玉米品种的审定信息和 3 318 个

黄淮海夏播玉米区玉米品种的审定信息。

1.2 数据筛选及整理

利用 R 软件,根据正则表达式将文本数据转换成数据框形式,主要包含品种名称、审定年份、审定区域、花丝颜色、花药颜色、产量、单株穗粒数、种植密度和千粒重。数据筛选与归类主要遵循以下原则:1)为确保分析结果的一致性,品种以上指标信息应当完整,筛选出 1 455 个北方春播玉米区玉米品种和 843 个黄淮海夏播玉米区玉米品种。2)部分数据中花丝和花药颜色描述为花青甙显色强度(如弱、中、强等)的,依据参考文献[10,23-25]的方法进行转换。3)将花丝和花药颜色中相近的颜色归为同一类,如将浅红色、红色、深红色归类为红色。4)排除青贮玉米、甜糯玉米和爆裂玉米等特殊用途玉米。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2021、RStudio 进行数据分析和作图,线性拟合用 stats 包的 lm 函数,多重比较用 agricolae 包的最小显著差数法($P<0.05$,LSD)。

2 结果与分析

2.1 玉米审定品种花丝和花药颜色

由表 1 可知,2003—2022 年,北方春播玉米区的紫色、红色和绿色花丝玉米品种占比分别为

表 1 玉米品种审定区域及花丝和花药颜色情况
Table 1 Maize varieties distribution of approve region and the colors of silk and anther

种植区域 Planting region	审定区域 Approve region	花丝颜色 Silk color				花药颜色 Anther color				合计 Total
		红色	绿色	紫色	其他	黄色	绿色	紫色	其他	
		Red	Green	Purple	Other	Yellow	Green	Purple	Other	
北方春播玉米区 North China spring maize region	内蒙古 Inner Mongolia	127	191	294	141	350	21	355	27	753
	陕西 Shaanxi	96	66	84	27	102	15	137	19	273
	山西 Shanxi	61	56	64	15	65	14	98	19	196
	吉林 Jilin	52	24	21	18	64	3	38	10	115
	其他 Other	35	31	49	3	42	14	58	4	118
	总计 All	371	368	512	204	623	67	686	79	1 455
黄淮海夏播玉米区 Huang-Huai-Hai summer maize region	河南 Henan	43	88	251	24	146	45	209	6	406
	山东 Shandong	161	66	99	11	137	14	128	58	337
	安徽 Anhui	25	5	19	5	26	3	21	4	54
	河北 Hebei	6	4	7	3	9	1	10	0	20
	国家 Country	3	5	17	1	5	6	14	1	26
	总计 All	238	168	393	44	323	69	382	69	843

35.2%、25.5%和25.3%，为排名前三的颜色。花药颜色排在审定品种前三位的为紫色、黄色和绿色，占比分别为47.1%、42.8%和4.6%。在黄淮海夏播玉米区，花丝和花药颜色前三位的品种与北方春播玉米区类似。紫色、红色和绿色花丝占比分别为46.6%、28.2%和19.9%。紫色、黄色和绿色花药占比分别为45.3%、38.3%和8.2%。

2.2 花丝和花药颜色变化趋势

2003—2022年，2个种植区域的玉米审定品种花丝主要颜色均已由红色演变为紫色(图1)，花药主要颜色均已由黄色演变为紫色(图2)。在北方春

播玉米区，紫色花丝品种占比由0.0%上升到44.8%，红色花丝品种占比由75.0%下降至25.4%。紫色花药品种占比由12.5%上升至71.6%，黄色花药品种占比由75.0%下降至14.9%。绿色花丝和绿色花药的品种占比均无显著变化。在黄淮海夏播玉米区，紫色花丝品种占比由0.0%上升至73.1%，红色花丝品种占比由75.0%下降至1.5%。紫色花药品种占比由12.5%上升至41.8%，黄色花药品种占比由87.5%下降至43.3%。绿色花丝和绿色花药的品种占比均无显著变化。

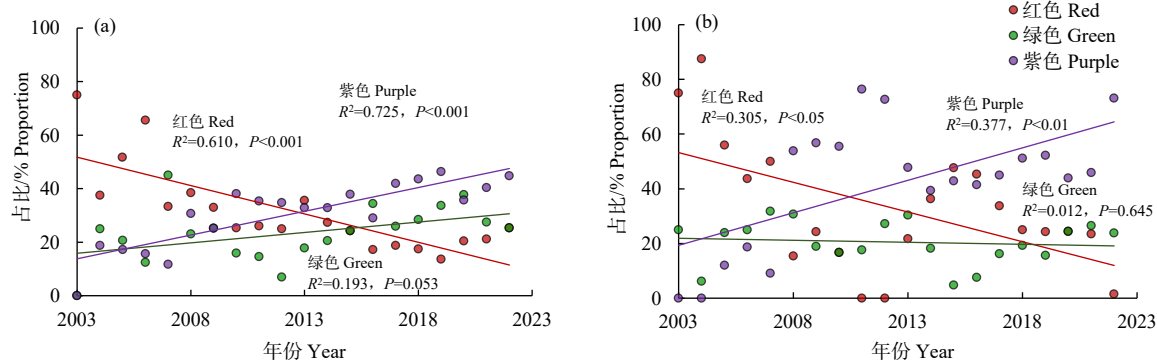


图1 2003—2022年北方春播玉米区(a)和黄淮海夏播玉米区(b)玉米品种花丝主要颜色的变化

Fig. 1 Changes of the predominant color evolution of maize varieties silks in the North China spring maize region (a) and Huang-Huai-Hai summer maize region (b) from 2003 to 2022

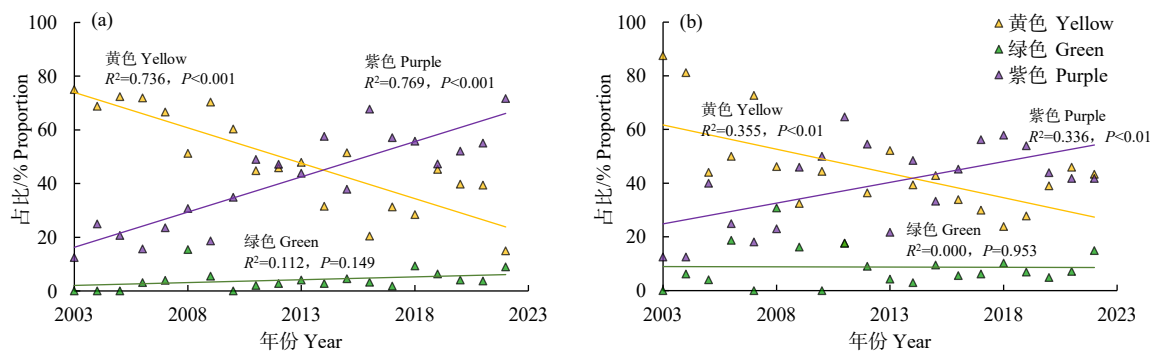


图2 2003—2022年北方春播玉米区(a)和黄淮海夏播玉米区(b)玉米品种花药主要颜色的变化

Fig. 2 Changes of the predominant color evolution of maize varieties anthers in the North China spring maize region (a) and Huang-Huai-Hai summer maize region (b) from 2003 to 2022

2.3 不同颜色花丝和花药的玉米品种产量差异

由图3可知，2003—2022年，2个区域不同审定年份品种的产量均呈增加的趋势，北方春播玉米区审定品种的产量普遍高于黄淮海夏播玉米区。在北方春播玉米区，紫色和绿色花丝品

种的产量均显著高于红色品种，紫色花药品种的产量显著高于黄色和绿色花药的品种。在黄淮海夏播玉米区，不同颜色花丝的品种间产量无显著差异，紫色花药品种产量显著高于黄色品种(图4)。

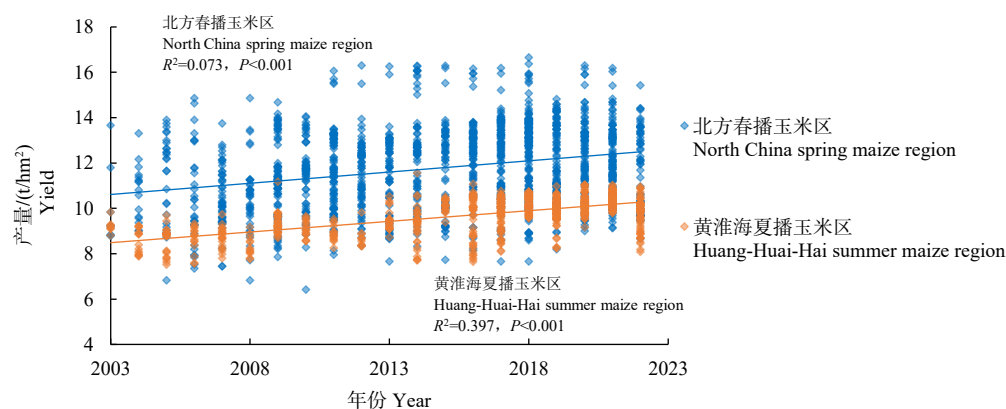
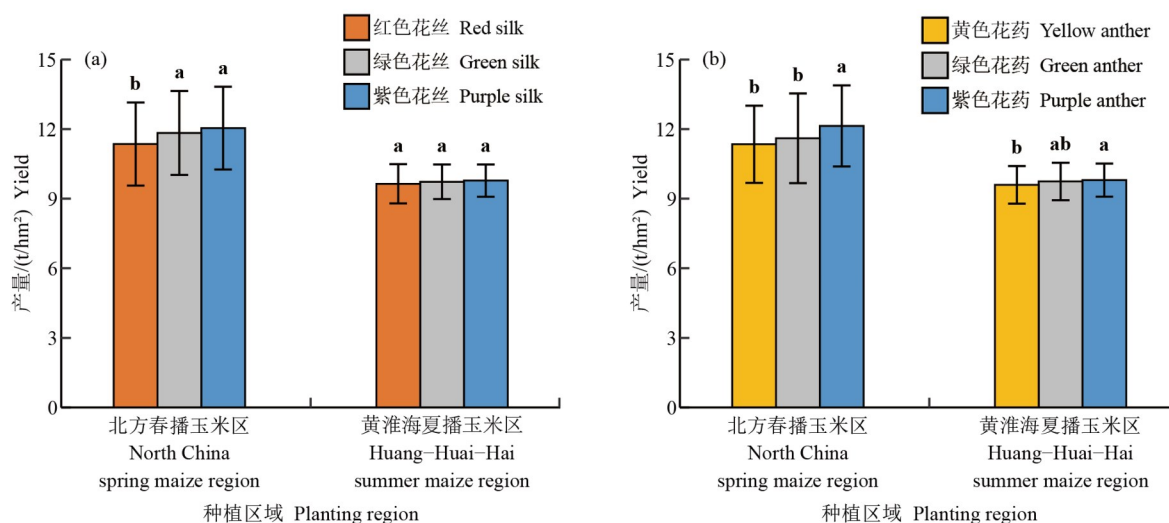


图3 2003—2022年审定玉米品种的产量变化

Fig. 3 Changes of yield of approved varieties from 2003 to 2022



不同小写字母表示不同组间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among groups ($P<0.05$). The same below.

图4 2个种植区域不同颜色花丝(a)和花药(b)品种的产量

Fig. 4 Yield of varieties with different colors of silk (a) and anther (b) in two planting regions

2.4 不同颜色花丝和花药的玉米品种产量构成差异

2.4.1 不同颜色花丝和花药的玉米品种产量构成

由图5、图6和图7可知,在北方春播玉米区,紫色花丝品种的平均种植密度为6.4万株/hm²,比红色品种高4.9%,紫色花丝品种的平均穗粒数为605.9,比红色品种低3.0%,紫色花药品种的平均种植密度为6.4万株/hm²,比黄色品种高4.9%,存在显著差异。红色和紫色花丝品种的千粒重、黄色和紫色花药品种的穗粒数及千粒重间均无显著差异。在黄淮海夏播玉米区,紫色花丝品种的平均种植密度为6.7万株/hm²,比红色品种高4.7%,紫色花丝品种的平均穗粒数为534.3,比红色品种低

1.7%,存在显著差异。红色和紫色花丝品种的千粒重之间、黄色和紫色花药品种的产量构成之间均无显著差异。

2.4.2 不同颜色花丝和花药的玉米品种耐密性

由图8可知,2002—2023年,我国不同审定年份的玉米品种种植密度均呈上升趋势,且北方春播玉米区的种植密度增幅更大。在北方春播玉米区,紫色花丝品种的平均单位面积粒数为 3.9×10^7 粒/hm²,显著高于红色花丝品种,紫色花药品种的平均单位面积粒数为 3.9×10^7 粒/hm²,显著高于黄色花药品种。在黄淮海夏播玉米区,紫色花丝品种的平均单位面积粒数为 3.6×10^7 粒/hm²,显著高于红色花丝品种,紫色和黄色花药品种则差异不显著(图9)。

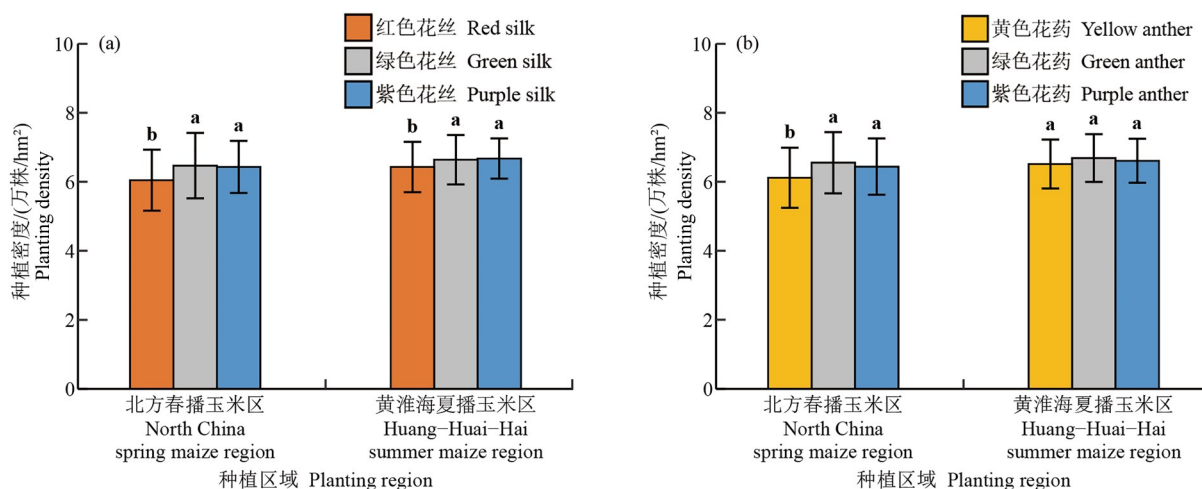


图5 2个种植区域不同颜色花丝(a)和花药(b)品种的种植密度

Fig. 5 Planting density of varieties with different colors of silk (a) and anther (b) in two planting regions

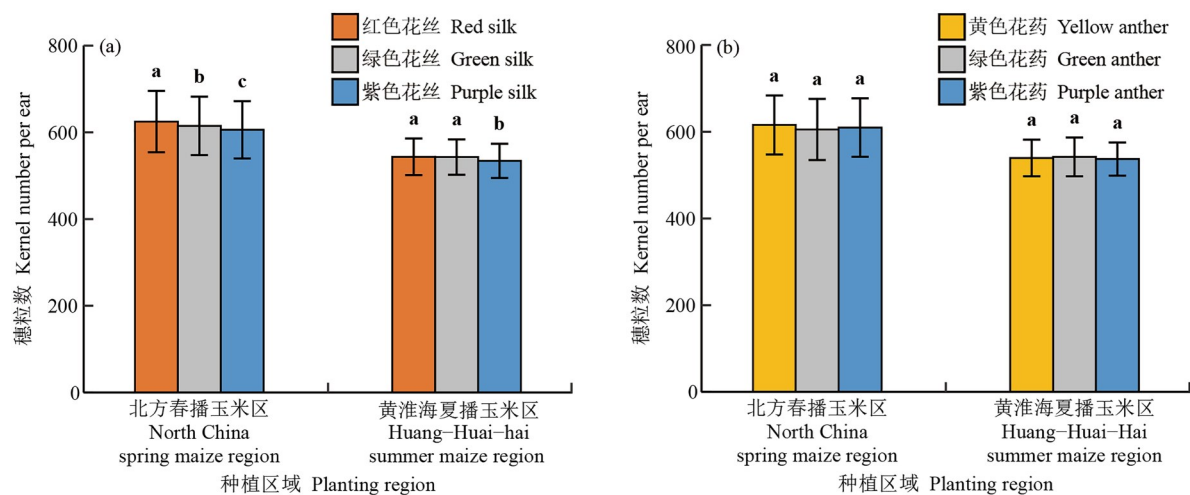


图6 2个种植区域不同颜色花丝(a)和花药(b)品种的穗粒数

Fig. 6 Kernel number per ear of varieties with different colors of silk (a) and anther (b) in two planting regions

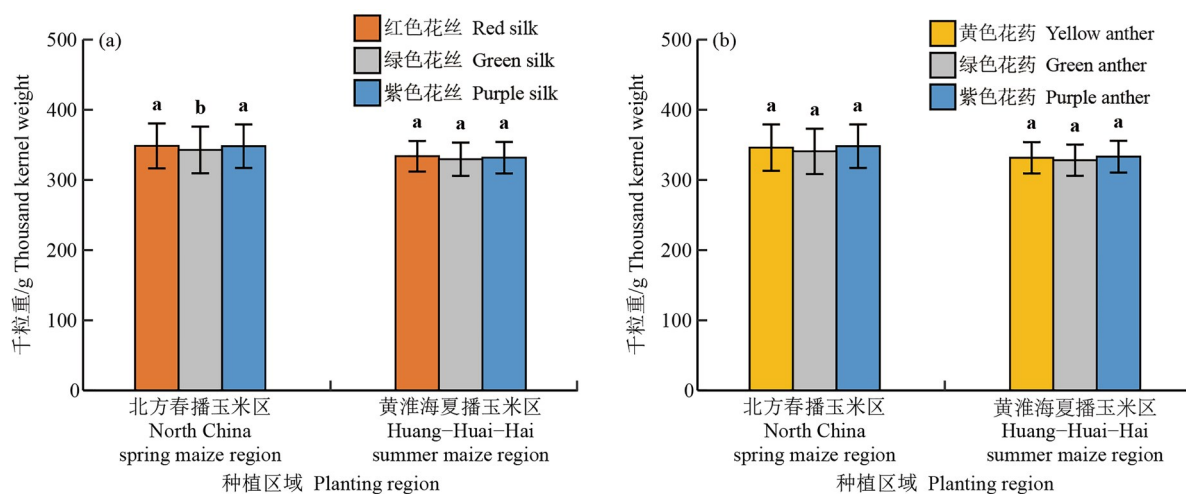


图7 2个种植区域不同颜色花丝(a)和花药(b)品种的千粒重

Fig. 7 Thousand kernel weight of varieties with different colors of silk (a) and anther (b) in two planting regions

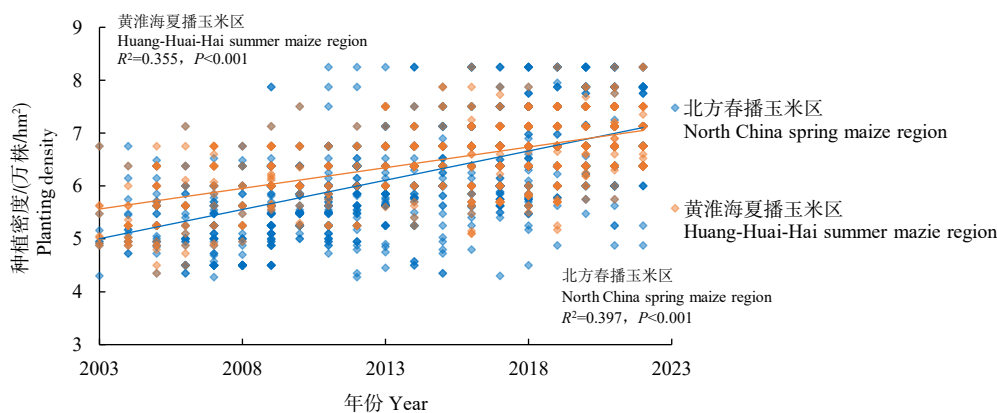


图8 2003—2022年审定品种种植密度的变化趋势

Fig. 8 Planting density trends of approved varieties from 2003 to 2022

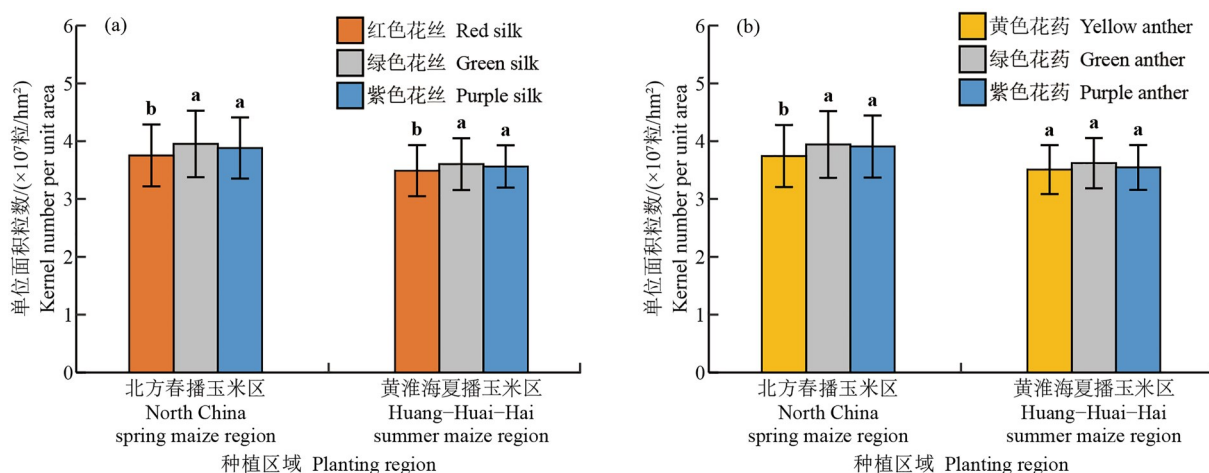


图9 2个种植区域不同花丝(a)和花药(b)颜色品种的单位面积粒数

Fig. 9 Kernel number per unit area of varieties with different colors of silk (a) and anther (b) in two planting regions

由图10和图11可知,北方春播玉米区不同颜色花丝和花药品种的穗粒数均随种植密度增加而呈下降趋势;其中紫色花丝和紫色花药品种的穗粒

数下降速率最小,斜率(k)分别为-25.19和-28.59,红色花丝和黄色花药品种下降速率最快,斜率分别为-34.04和-30.18。在黄淮海夏播玉

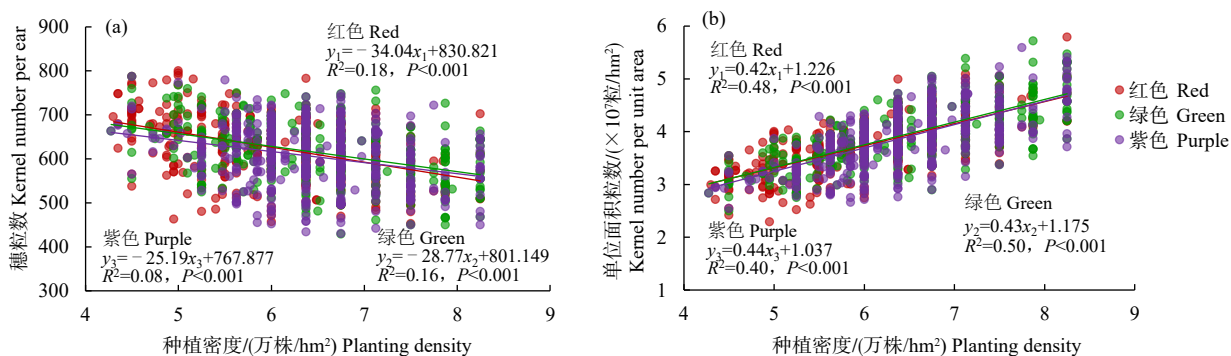


图10 北方春播玉米区不同颜色花丝品种的穗粒数(a)和单位面积粒数(b)随种植密度变化趋势

Fig. 10 Trends of kernel number per ear (a) and kernel number per unit area (b) to density of varieties with different silk colors in the North China spring maize region

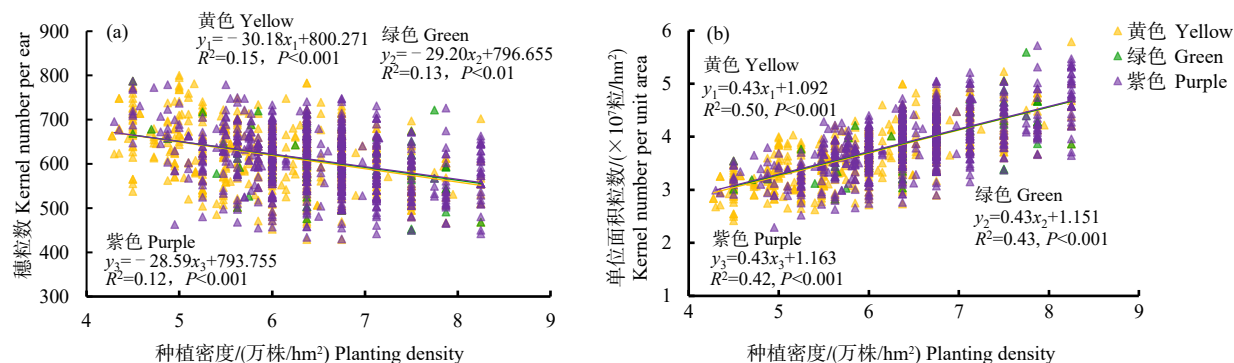


图 11 北方春播玉米区不同颜色花药品种的穗粒数(a)和单位面积粒数(b)随种植密度变化趋势

Fig. 11 Trends of kernel number per ear (a) and kernel number per unit area (b) to density of varieties with different anther colors in the North China spring maize region

米区,除绿色花丝和绿色花药品种的穗粒数均随种植密度变化不显著外,其余颜色类型品种的穗粒数均随种植密度加大而下降,其中紫色花丝品种斜率为 -12.97 ,下降速率大于红色花丝品种,紫色花药品种斜率为 -10.15 ,下降速率小于黄色花药品种

(图 12 和图 13)。可见,虽然种植密度的增加会导致单株穗粒数的减少,但 2 个种植区域各花丝和花药主要颜色品种的单位面积粒数均随种植密度加大呈现增加趋势,且不同颜色花丝和花药品种的斜率相似。

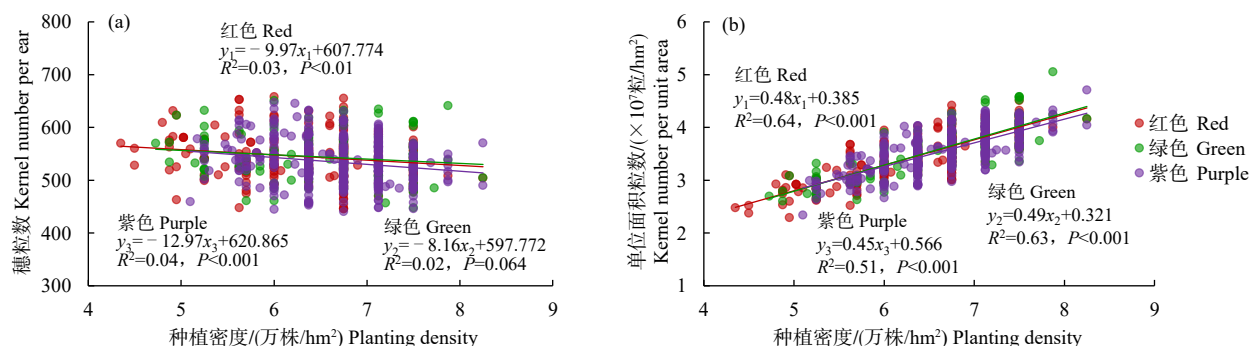


图 12 黄淮海夏播玉米区不同颜色花丝品种的穗粒数(a)和单位面积粒数(b)随种植密度变化趋势

Fig. 12 Trends of kernel number per ear (a) and kernel number per unit area (b) to density of maize varieties with different silk colors in the Huang-Huai-Hai summer maize region

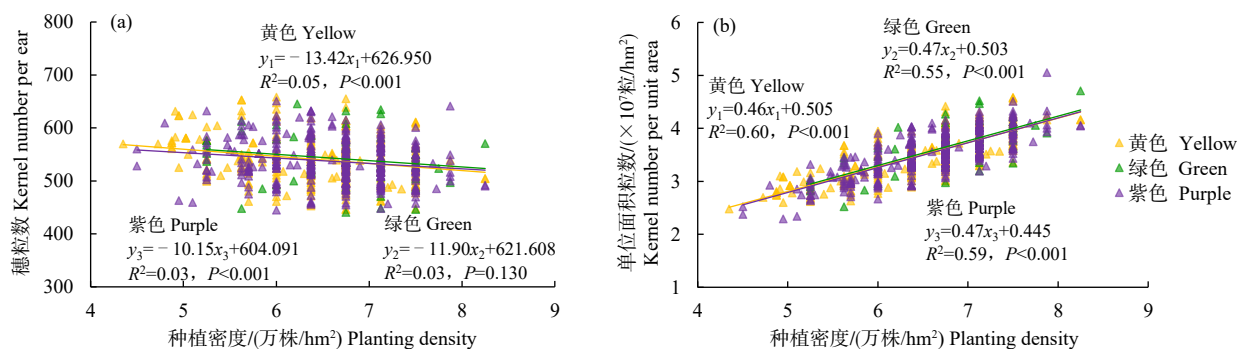


图 13 黄淮海夏播玉米区不同颜色花药品种的穗粒数(a)和单位面积粒数(b)随种植密度变化趋势

Fig. 13 Trends of kernel number per ear (a) and kernel number per unit area (b) to density of maize varieties with different anther colors in the Huang-Huai-Hai summer maize region

由图14和图15可知,2个种植区域中,紫色花丝品种相较于红色花丝品种、紫色花药品种相较于黄色花药品种的产量更高,这是由种植密度和穗粒

数的差异造成的。虽然紫色花丝和紫色花药品种具有较低的穗粒数,但密植生产模式会导致单位面积粒数升高,可弥补穗粒数的不足。

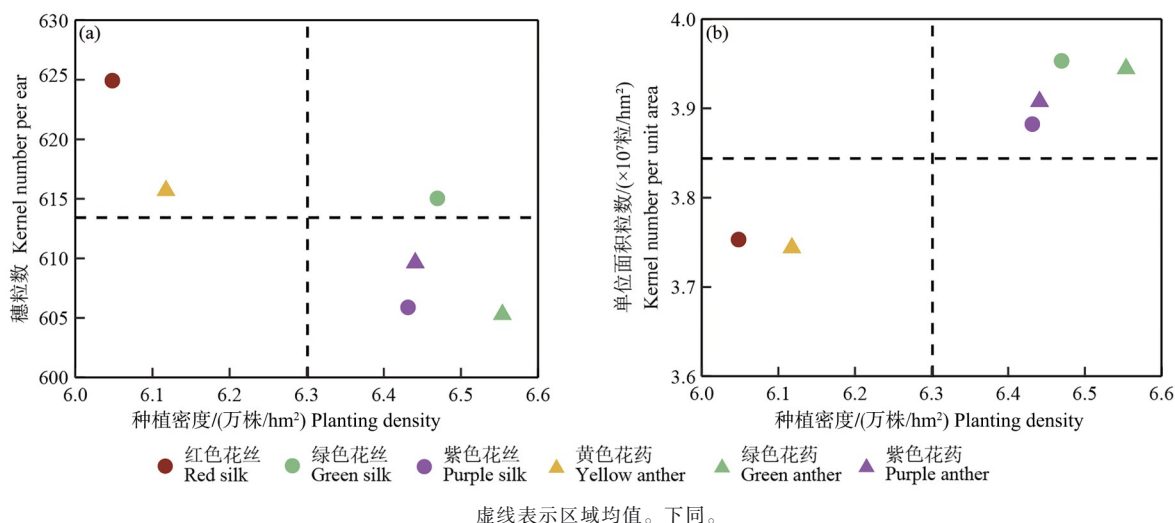


图14 北方春播玉米区不同颜色花丝和花药品种的穗粒数(a)和单位面积粒数(b)与种植密度均值比较

Fig. 14 Comparison of mean kernel number per ear (a), kernel number per unit area (b) and density among varieties with different silk and anther colors in North China spring maize region

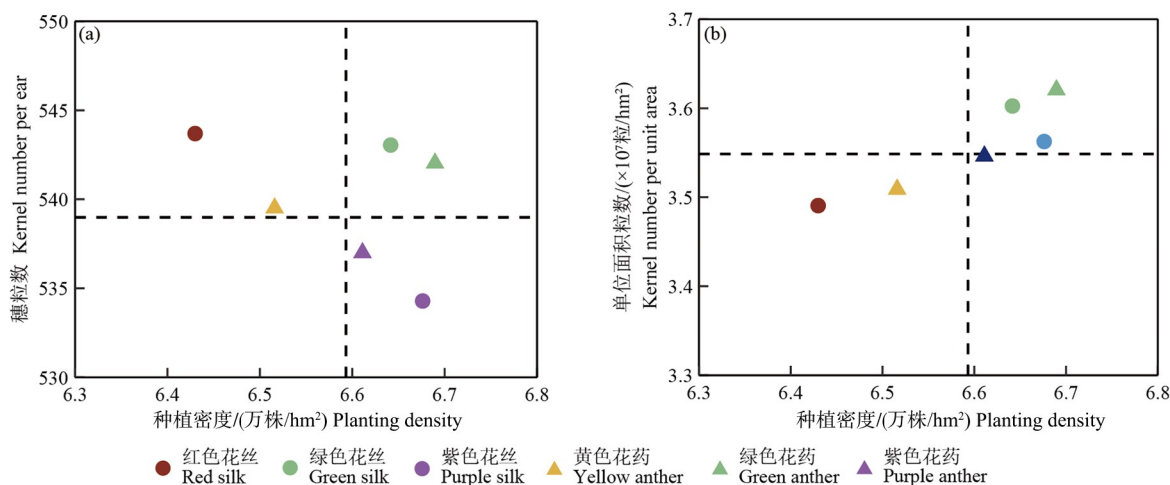


图15 黄淮海夏播玉米区不同颜色花丝和花药品种的穗粒数(a)和单位面积粒数(b)与种植密度均值比较

Fig. 15 Comparison of mean kernel number per ear (a), kernel number per unit area (b) and density among varieties with different silk and anther colors in Huang-Huai-Hai summer maize region

3 讨论

3.1 花丝及花药主要颜色随品种的演变

玉米作为我国播种面积最大、总产量最高的作物,产量提升受到了广泛关注,品种选育和种植密度提升被视作提高产量的重要途径^[26]。近40年我

国玉米品种的遗传改良对玉米增产的平均贡献率已经达到45%以上^[27],而抗病性、抗倒性和耐密性的增强是玉米杂交种产量和品质提升的重要原因^[1]。我国玉米新品种具有更佳的抗旱性^[21]、气候变化适应性^[28]和耐密性^[29]等胁迫耐受性,美国玉米高产品种选育过程中最显著的性状变化也与对各

类生物和非生物胁迫的抗性(如抗旱性、抗倒性以及耐密性等)相关^[22]。与明博等^[30]的研究结果一致,本研究结果表明,我国玉米的种植密度呈现上升趋势(图8),这对玉米品种的耐密性提出了更高的要求^[22,26],与我国新品种选育的需求相符合。

花丝和花药颜色是玉米品种的重要性状,反映品种特异性、一致性和稳定性^[24-25]。然而,花丝和花药颜色并没有作为品种选育的重要指标被重视。本研究结果表明,2003—2022年2个区域的玉米审定品种的花丝主要颜色已由红色演变为紫色,花药主要颜色已由黄色演变为紫色(图1和2)。

玉米穗轴颜色和籽粒颜色等性状受人工选择的影响^[31-32]。本研究发现紫色花丝品种与红色花丝品种相比、紫色花药品种与黄色花药品种相比,产量更高且耐密性更好(图4和5)。花丝和花药颜色的演变可能是与高产、耐密等性状连锁的特性,未来需要进一步的试验验证。

玉米花丝和花药颜色是花青甙累积的结果^[9-10]。世界气象组织2023年发布的《十年气候状况报告》指出,2011—2022年是人类有气象记录以来最温暖的10年,由于全球变暖和气候变化,植物在生长和发育过程中越来越容易受到干旱、盐碱、洪涝和极端温度等多种环境胁迫的影响^[33]。已有研究表明,这些非生物胁迫会促进植物中花青甙的积累^[15],Ambasht等^[34]研究发现,田间种植的玉米在紫外线照射后会积累花青甙。Jaakola等^[35]研究认为,太阳辐射、光周期和温度是与基因型相互作用影响花青甙合成的关键环境因子。Koski等^[3]的研究表明,花卉色素对全球臭氧和温度变化做出了反应,玉米花丝和花药颜色的演变可能也是对气候变暖等环境变化响应的结果。

3.2 花丝花药颜色与植株抗性

玉米花丝和花药的颜色受花青甙积累的影响,花青甙作为非酶抗氧化剂可以清除包括过氧化氢(H_2O_2)在内的多种活性氧分子^[12],发挥强于抗坏血酸(VC)和维生素E(VE)的抗氧化作用^[36],能够有效维持ROS稳态^[16-17]。ROS可作为信号分子参与对生物和非生物逆境胁迫的响应^[17],各类生物和非生物胁迫都会造成ROS的大量累积,ROS平衡对于植物体正常生长发育具有重要作用^[15]。

已有大量关于花青甙与植物抗性关系的研究。作为重要的生殖器官,玉米紫色雄穗和粉红色雄穗

相较于绿色雄穗具有更高的花青甙浓度和DPPH自由基清除活性^[11], H_2O_2 会抑制玉米雌花序分生组织生长,玉米花药发育过程中的ROS稳态破坏也导致花粉育性降低^[20]。经过诱导合成花青甙的玉米幼苗具有更强的抗旱性^[37]。花青甙含量较高的彩色小麦品种对花后高温胁迫的耐受性更强^[38]。

本研究发现,紫色花丝品种产量和种植密度显著高于红色花丝品种,紫色花药品种产量和种植密度显著高于黄色花药品种(图4和5),这可能是由于紫色花丝和紫色花药具有更高的花青甙浓度,能够更好地应对高密度种植模式带来的各类生物和非生物逆境胁迫,但其具体影响途径仍有待进一步研究。

已有很多研究表明,高温、干旱等环境胁迫会对玉米花丝、花药和有性生殖造成不利影响进而导致产量下降,玉米的穗粒数和千粒重受开花吐丝期的环境影响较大^[39],花期极端高温对玉米产量的影响占整个生育期高温胁迫总影响的23%左右^[40],高温会抑制花药开裂,导致花丝失水枯萎,造成花粉萌发能力下降或失去萌发能力,使得植物体内活性氧浓度升高,导致籽粒败育率增加^[6,41],干旱胁迫则会显著抑制花丝伸长^[7]。在高温和干旱等胁迫多发的背景下,玉米花丝和花药颜色对逆境下有性生殖和产量的影响也有待研究。今后在玉米品种选育过程中,应注重培育紫色花丝和紫色花药的品种。

4 结 论

2003—2022年的玉米品种选育的进程中,我国北方春播玉米区和黄淮海夏播玉米区紫色花丝品种占比均由0.0%分别上升至44.8%和73.1%,红色花丝品种占比均由75.0%分别下降至25.4%和1.5%,紫色花药品种占比均由12.5%分别上升至71.6%和41.8%,黄色花药品种占比分别由75.0%和87.5%下降至14.9%和43.3%,花丝和花药的主要颜色均已分别由红色和黄色演变为紫色。北方春播玉米区紫色花丝品种平均产量为12.04 t/hm²,显著高于红色花丝品种,北方春播玉米区和黄淮海夏播玉米区紫色花药品种平均产量分别为12.14和9.80 t/hm²,显著高于黄色花药品种,这是由于其具有更高的耐密性,提高了群体单位面积粒数,从而使产量得到了2.1%~7.0%的提升。综上,2003—2022年,北方春播玉米区和黄淮

海夏播玉米区的玉米审定品种花丝和花药主要颜色分别由红色和黄色演变为紫色,紫色花丝和花药的品种产量、耐密植性和单位面积粒数更高。

参考文献 References

- [1] 戴景瑞, 鄂立柱. 我国玉米育种科技创新问题的几点思考[J]. 玉米科学, 2010, 18(1): 1-5
- Dai J R, E L Z. Scientific and technological innovation of maize breeding in China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(1): 1-5 (in Chinese)
- [2] Ma D L, Xie R Z, Yu X F, Li S K, Gao J L. Historical trends in maize morphology from the 1950s to the 2010s in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(8): 2159-2167
- [3] Koski M H, MacQueen D, Ashman T L. Floral pigmentation has responded rapidly to global change in ozone and temperature[J/OL]. *Current Biology*, (2020-11-16). DOI:doi. org/10. 1016/j. cub. 2020. 08. 077
- [4] Koski M H, Ashman T L. Floral pigmentation patterns provide an example of Gloger's rule in plants[J/OL]. *Nature Plants*, (2015-01-08). DOI:doi. org/10. 1038/NPLANTS. 2014. 7
- [5] Koski M H, Galloway L F. Geographic variation in pollen color is associated with temperature stress[J]. *New Phytologist*, 2018, 218(1): 370-379
- [6] 樊廷海. 温度对玉米生长发育及产量的影响[J]. 种子科技, 2022, 40(14): 17-19
- Fan T H. Effect of temperature on growth, and yield of maize[J]. *Seed Science & Technology*, 2022, 40(14): 17-19 (in Chinese)
- [7] Li Y Y, Zhang P P, Wang Z W, Zhang Y H, Zhu F, Liu Y H, Jones A, Wu L M, Song Y H. Coordinated regulation of sucrose and lignin metabolism for arrested silk elongation under drought stress in maize[J/OL]. *Environmental and Experimental Botany*, (2023-08-21). DOI: 10. 1016/j. envexpbot. 2023. 105482
- [8] 李芸. 不同密度对夏玉米花丝发育和产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010
- Li Y, Effect of different planting density on yield and the development of summer-maize silks[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [9] 黄缓缓, 安洪周, 李魁英, 王延兵, 谷亦, 乔亚科, 高增玉. 玉米花生花青甙显色性状的QTL定位[J]. 华北农业学报, 2024, 39(4): 31-36
- Huang H H, An H Z, Li K Y, Wang Y B, Gu Y, Qiao Y K, Gao Z Y. QTL mapping of silk coloring characteristics of anthocyanins in maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 38(4): 31-36 (in Chinese)
- [10] 山东省农业科学院作物研究所. 黄淮海地区玉米品种DUS测试技术手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019
- Shandong Academy of Agricultural Science, Crop Research Institute. *Technical Manual of DUS Tests in Huanghuaihai Region for Maize Varieties* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019 (in Chinese)
- [11] Duangpapeng P, Suriharn K, Lertrat K, Lomthaisong K, Scott M P. Pigmentation and genotype effects, phenotypic stability for anthocyanins, phenolic compounds and antioxidant activity in the corn tassel [J]. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 2023, 45(1): 110-123
- [12] Gould K S, McKelvie J, Markham K R. Do anthocyanins function as antioxidants in leaves? Imaging of H₂O₂ in red and green leaves after mechanical injury[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(10): 1261-1269
- [13] Bi X L, Zhang J L, Chen C S, Zhang D, Li P M, Ma F W. Anthocyanin contributes more to hydrogen peroxide scavenging than other phenolics in apple peel[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 205-209
- [14] Acero N, Gradillas A, Beltran M, García A, Muñoz Míngarro D. Comparison of phenolic compounds profile and antioxidant properties of different sweet cherry (*Prunus avium* L.) varieties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 279: 260-271
- [15] Zhang L, Wang L, Fang Y C, Gao Y H, Yang S L, Su J, Ni J B, Teng Y W, Bai S L. Phosphorylated transcription factor PuHB40 mediates ROS-dependent anthocyanin biosynthesis in pear exposed to high light[J/OL]. *The Plant Cell*, 2024, 36(9): 3562-3583
- [16] Chalker-Scott L. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses[J]. *Photochemistry & Photobiology*, 1999, 70(1): 1-9
- [17] Mittler R, Zandalinas S I, Fichman Y, Van Breusegem F. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses[J]. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*, 2022, 23(10): 663-679
- [18] Zheng S Y, Li J, Ma L, Wang H L, Zhou H, Ni E D, Jiang D G, Liu Z L, Zhuang C X. OsAGO2 controls ROS production and the initiation of tapetal PCD by epigenetically regulating OshXK1 expression in rice anthers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(15): 7549-7558
- [19] Yi J, Moon S, Lee Y S, Zhu L, Liang W Q, Zhang D B, Jung K H, An G. Defective tapetum cell death 1 (DTC1) regulates ROS levels by binding to metallothionein during tapetum degeneration[J]. *Plant Physiology*, 2016, 170(3): 1611-1623
- [20] Xie S Y, Luo H B, Huang W, Jin W W, Dong Z B. Striking a growth-defense balance: Stress regulators that function in maize development[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2024, 66(3): 424-442
- [21] Liu Y E, Hou P, Zhang W Y, Xing J F, Lv T F, Zhang C Y, Wang R H, Zhao J R. Drought resistance of nine maize cultivars released from the 1970s through the 2010s in China[J/OL]. *Field Crops Research*, (2023-08-02). DOI:doi. org/10. 1016/j. fcr. 2023. 109065
- [22] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 86: 83-145
- [23] 王艳平, 沈奇, 潘红, 吴燕, 李华勇, 王显生, 汪鸿星. 玉米花丝的多样性及其颜色变化[J]. 大麦与谷类科学, 2022, 39(3): 3-13
- Wang Y P, Shen Q, Pan H, Wu Y, Li H Y, Wang X S, Wang H X. The diversity and color changes of maize tassels[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2022, 39(3): 3-13 (in Chinese)
- [24] GB/T 19557. 24-2018. 植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 玉米[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- GB/T 19557. 24-2018. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability. Maize (*Zea mays* L.) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese)
- [25] NY/T 2232-2012. 植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 玉米[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2012
- NY/T 2232-2012. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability-Maize (*Zea mays* L.) [S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2012 (in Chinese)
- [26] Ci X K, Li M S, Xu J S, Lu Z Y, Bai P F, Ru G L, Liang X L, Zhang D G, Li X H, Bai L, Xie C X, Hao Z F, Zhang S H, Dong S T. Trends of grain yield and plant traits in Chinese maize cultivars from the 1950s to the 2000s [J]. *Euphytica*, 2012, 185(3): 395-406
- [27] 白岩, 高婷婷, 卢实, 郑淑波, 路明. 近四十年来我国玉米大品种的历史沿革与发展趋势[J]. 作物学报, 2023, 49(8): 2064-2076
- Bai Y, Gao T T, Lu S, Zheng S B, Lu M. A retrospective analysis of the historical evolution and developing trend of maize mega varieties in China from 1982 to 2020[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(8): 2064-2076 (in Chinese)
- [28] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981-2009 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(7): 1111-1122

- [29] Niu X K, Xie R Z, Liu X, Zhang F L, Li S K, Gao S J. Maize yield gains in Northeast China in the last six decades [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(4): 630-637
- [30] 明博, 谢瑞芝, 侯鹏, 李璐璐, 王克如, 李少昆. 2005—2016年中国玉米种植密度变化分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1960-1972
Ming B, Xie R Z, Hou P, Li L L, Wang K R, Li S K. Changes of maize planting density in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1960-1972 (in Chinese)
- [31] 梁星伟, 杨文亭, 金雨, 胡莉, 傅小香, 陈先敏, 周顺利, 申思, 梁效贵. 玉米穗轴的颜色变化, 是偶然还是与农艺性状存在关联: 以历年国审普通品种为例[J]. 作物学报, 2024, 50(3): 771-778
Liang X W, Yang W T, Jin Y, Hu L, Fu X X, Chen X M, Zhou S L, Shen S, Liang X G. Is cob color variation in maize accidental or incidental to any agronomic traits: An example of nationally approved common hybrids over the years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(3): 771-778 (in Chinese)
- [32] Morohashi K, Casas M I, Falcone Ferreyra M L, Falcone Ferreyra, Mejia-Guerra M K, Pourcel L, Yilmaz A, Feller A, Carvalho B, Emiliani J, Rodriguez E, Pellegrinet S, McMullen M, Casati P, Grotewold E. A genome-wide regulatory framework identifies maize pericarp color1 controlled genes [J]. *The Plant Cell*, 2012, 24(7): 2745-2764
- [33] Yang Z R, Cao Y B, Shi Y T, Qin F, Jiang C F, Yang S H. Genetic and molecular exploration of maize environmental stress resilience: Toward sustainable agriculture[J]. *Molecular Plant*, 2023, 16(10): 1496-1517
- [34] Ambasht N K, Agrawal L M. Physiological responses of field grown *Zea mays* L plants to enhanced UV-B radiation[J]. *Biotronics*, 1995, 29: 15-23
- [35] Jaakola L, Hohtola A. Effect of latitude on flavonoid biosynthesis in plants [J]. *Plant, Cell & Environment*. 2010, 33(8): 1239-1247
- [36] Castañeda-Ovando A, de Lourdes Pacheco-Hernández M, Pérez- Hernández M E, Rodríguez J A, Galán-Vidal C A. Chemical studies of anthocyanins: A review[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(4): 859-871
- [37] Ronchi A, Farina G, Gozzo F, Tonelli C. Effects of a triazolic fungicide on maize plant metabolism: Modifications of transcript abundance in resistance-related pathways[J]. *Plant Science*, 1997, 130(1): 51-62
- [38] 唐宇, 雷华欣, 王传伟, 严轩韬, 王浩, 郑杰, 张文静, 马尚宇, 黄正来, 樊永惠. 彩色小麦花青素积累对花后高温胁迫的响应机理[J]. 中国农业科学, 2025, 58(6): 1083-1101
Tang Y, Lei B X, Wang C W, Yan X T, Wang H, Zheng J, Zhang W J, Ma S Y, Huang Z L, Fan Y H. Response mechanism of anthocyanin accumulation in colored wheat to post-anthesis high temperature stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(6): 1083-1101 (in Chinese)
- [39] Dong X, Guan L, Zhang P H, Liu X L, Li S J, Fu Z J, Tang L, Qi Z Y, Qiu Z G, Jin C, Huang S B, Yang H. Responses of maize with different growth periods to heat stress around flowering and early grain filling [J/OL]. *Agricultural and Forest Meteorology*, (2021-03-06). DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108378
- [40] Luo N, Mueller N, Zhang Y, Feng P Y, Huang S B, Liu D L, Yu Y H, Wang X Y, Wang P, Meng Q F. Short-term extreme heat at flowering amplifies the impacts of climate change on maize production [J/OL]. *Environmental Research Letters*, (2023-07-27). DOI: 10.1088/1748-9326/ace7e3
- [41] 张韶昀. 高温胁迫对夏玉米生殖器官发育及产量的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2019
Zhang S Y. Effects of high temperature stress on reproductive organ development and yield of summer maize[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 刘献文, 中国农业大学农学院农学专业本科生。负责北京市大学生创新创业训练项目(S202410019035)。



通讯作者简介: 孟庆锋, 博士, 中国农业大学农学院教授, 博士生导师, 一直致力于作物高产高效栽培理论和技术科研教学工作。国家级人才计划青年学者, 绿色农业生产方向青年科学家创新团队负责人, 近年连续入选斯坦福大学联合爱思唯尔数据库发布的全球前2%科学家榜单。担任 *Crop Science*、《中国农业科学》、*Farming System* 等多个国内外学术期刊编委。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划、河北省重点研发计划等科研项目10余项。在 *Nature Communications*、*Nature Food*、*Field Crops Research* 等国际知名期刊发表论文70多篇, 应邀为作物栽培领域著名综述期刊 *Advances in Agronomy* 等撰写综述文章多篇。开发了基于AI的高产玉米智慧群体构建技术, 揭示了我国玉米实现大面积高产的栽培学机制, 入选中央电视台2024年“农业新质生产力典型案例”, 助力玉米等作物单产提升国家工程。