

高粱品种成熟期抗性生理指标及可溶性糖与 SS 和 SPS 活性相关性研究

商靖, 陆劲羽, 黄禹翕, 陈钰, 王晓雪, 项阳, 吴迪, 李玥莹* (沈阳师范大学生命科学学院, 辽宁沈阳 110034)

摘要 [目的]通过研究不同品种杂交高粱抗性生理指标的差异并探索其可溶性糖的含量与 SS 酶及 SPS 酶活性的关系, 建立高效精确选育抗性强产量高的优质高粱种质资源的重要途径。[方法]选用愈创木酚比色法、靛蓝四唑光还原法、紫外分光光度计法分别提取并测定 POD、SOD、CAT 活性; 采用优化后的蒽酮比色法测定叶片可溶性糖含量并以硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量; SS 及 SPS 活性的测定均采用间苯二酚比色法。[结果]辽糯 10 号同时具有抗逆性强、可溶性糖含量高的双重优势; 辽糯 15 号 SOD 和 CAT 活性最高但 MDA 含量最低, 表明其抗逆性在所有品种中最强; 辽杂 66 号具有较高的 SS 及 SPS 活性, 从而对糖分积累有促进作用, 利于实现高产。[结论]从多角度阐明了高粱抗旱、耐盐碱机制, 丰富其抗性生理内容; 进一步发掘并了解高粱糖分积累机制, 明确高粱糖分积累分子调节机制的内在机理, 建立了精确选育抗性强、产量高的优质高粱种质资源的重要途径, 并制定强化高粱抗性及其产量的技术措施, 为筛选近缘农作物的优质种质资源、提高农作物的育种技术水平、筛选其差异表达基因后再进行蛋白质组和转录组关联分析、挖掘调控高粱抗性强弱及糖分积累的关键基因及解析其分子调控机制奠定坚实的理论基础。

关键词 高粱; SOD; POD; SPS; 种质资源

中图分类号 S514 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)01-0046-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Correlation between the Soluble Sugar and the SS and SPS Activities of Different Sorghum Varieties at Maturity and Analysis of Physiological Indexes of Resistance

SHANG Jing, LU Jin-yu, HUANG Yu-xi et al (College of Life Science, Shenyang Normal University, Shenyang, Liaoning 110034)

Abstract [Objective] To explore the relationship between soluble sugar content and SS and SPS enzyme activities in sorghum, and to establish an effective way to select high-quality sorghum germplasm resources with strong resistance and high yield. [Method] The activities of POD, SOD and CAT were extracted and determined by guaiacol colorimetry, azoblu tetrazole photoreduction and UV spectrophotometer, respectively. The contents of total available sugar and acetaldehyde were determined by antraton non-color optimization method and mercaptan acid non color method, respectively. The activities of SS and SPS were determined by isophthalic phenol colorimetry. [Result] Liaonuo 10 had the double advantages of strong stress resistance and high soluble sugar content at the same time; Liaonuo 15 had the highest SOD activity, CAT activity and the lowest MDA content, which indicated that it had the strongest stress resistance; Liaozha 66 had the highest SS and SPS enzyme activities, which promoted sugar accumulation and achieved high yield. [Conclusion] The mechanism of drought resistance and saline alkali tolerance of sorghum was revealed from many aspects, and the physiological content of stress resistance of sorghum was enriched; the mechanism of sugar accumulation in sorghum was explored and further understood, and the internal mechanism of molecular regulation mechanism of sugar accumulation in sorghum was clarified. An important way to accurately select high-quality sorghum germplasm resources with strong resistance and high yield was established, and technical measures to strengthen sorghum resistance and yield were formulated, so as to screen the high-quality germplasm resources of related crops, to enhance crop breeding level, to screen different expressed genes, to carry out proteome and transcriptome association analysis, to explore the regulation of sorghum resistance, and to find out the key genes of sexual strength and sugar accumulation and their molecular regulation mechanism.

Key words Sorghum; SOD; POD; SPS; Germplasm resources

高粱又称蜀黍, 是全球第五大粮食作物^[1]。因较高的二氧化碳固定效率, 使其同时具有抗旱、耐涝、耐瘠薄、光合效率高显著特点, 是目前干旱、瘠薄和盐碱等农田种植的主要经济作物之一。与玉米相比, 高粱叶片较窄、叶面积较小、气孔数目较少且叶表面具有一层蜡质层起到保护作用, 使得高粱水分蒸发大幅度减少, 因此抗旱、耐涝、抗盐碱等能力均强于其他夏季农作物, 并能在干旱条件下保持体内水分平衡, 并且生长周期的需水量都远小于其他的作物^[2]。此外, 高粱也极其耐涝, 只要所处生存环境中的水没有将高粱穗淹没, 都对其生长和发育的影响不太大。同时高粱对水肥要求低, 在肥力不足时也能获得高产^[3]。

我国高粱品种较多, 应用的途径也多种多样, 既可直接食用、饲用, 又可加工利用, 对食品工业、畜牧业等方面均具

有广泛的现实和潜在价值^[4-5], 可以满足我国各类产业的不同需求, 减少各行业消费对国际市场的过度依赖。因此高粱的合理开发利用对于解决国家能源短缺问题、改善生态环境、促进国民经济的可持续发展至关重要。

综上所述, 为深入了解并解决高粱在育种上存在的问题, 笔者测定不同高粱主栽品种在不同时期 SOD、POD、CAT 活性变化和 MDA、可溶性糖含量并比较各指标间的差异, 探究并揭示糖分积累的规律与其糖代谢机理, 根据研究结果从多方面筛选出抗逆性强、光合效率高、生物产量高的优良品种, 为提高作物育种水平建立选育优质高粱品种的方法, 为培养更优质的高产高抗粮食作物与品种奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料 来源于辽宁省农业科学院提供的 12 个不同高粱品种, 分别为辽糯 10 号、辽糯 11 号、辽糯 15 号、辽杂 37 号、辽杂 57 号、辽杂 58 号、辽杂 61 号、辽杂 62 号、辽杂 66 号、辽杂 73 号、辽杂 79 号。成熟期随机取材, 取材部位为高粱倒 2 叶, 每个样品进行 3 次重复。

基金项目 辽宁省教育厅重点攻关项目(LZD201901)。**作者简介** 商靖(1996—), 女, 辽宁北票人, 硕士研究生, 研究方向: 植物基因工程。*通信作者, 教授, 博士, 从事植物基因工程研究。**收稿日期** 2021-05-03; **修回日期** 2021-06-08

1.2 方法

1.2.1 酶液制备。

1.2.1.1 抗性指标酶液制备。取 0.5 g 新鲜叶片,置于液氮预冷后的研钵中,加入适量的液氮(不超过研钵容积的 1/3),快速研磨至磨成粉末状,再加入 5 mL 预冷的以 50 mmol/L 磷酸缓冲液(pH 7.8)配制而成的酶提取液^[6]。在冰浴条件下静置 10 min,4 ℃,9 915 r/min 离心 20 min,弃沉淀后收集的上清液,即为试验用酶提取液,冰箱低温保存,用于测定 SOD、POD、ACT 活性和 MDA 含量。

1.2.1.2 可溶性糖含量溶液制备。称取 0.5 g 新鲜高粱叶片,剪碎后放于研钵中,放入适当的石英砂和蒸馏水,仔细研磨成匀浆状后,转移到带刻度的试管中,再用 10 mL 蒸馏水分数次冲洗研钵。将试管置于 80 ℃ 水浴锅中,恒温加热 30 min 后取出,待试管冷却后,将溶液过滤 2 次至 100 mL 容量瓶中,用热的蒸馏水冲洗残渣数次,最后定容至 100 mL。

1.2.1.3 蔗糖合成酶(SS)及蔗糖磷酸酶(SPS)溶液制备。称取新鲜高粱叶片 1 g,置于液氮预冷的研钵中,研磨同时加入 6 mL Hepes-NaOH 缓冲液,将叶片匀浆转至离心管中,在 4 ℃ 下,10 000 转离心 10 min,提取上清液。

1.2.2 指标测定。采用愈创木酚比色法、氮蓝四唑光还原法、紫外分光光度计法分别提取并测定 POD、SOD、CAT 活性^[7];采用优化的蒽酮比色法和硫代巴比妥酸法分别测定可溶性糖总含量及 MDA 含量^[8];采用间苯二酚比色法测定 SS 和 SPS 的活性^[6]。上述数据测定均进行重复试验 3 次。

1.3 数据分析 采用 Origin 8.6 和 Excel 2016 软件进行试验数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同品种成熟期 SOD 活性比较 不同品种高粱成熟期 SOD 活性具有明显差距,辽糯 10 号的 SOD 活性在成熟期最高并显著高于其余品种,辽杂 58 号的 SOD 活性次之;辽糯 15、辽糯 11、辽粘 03、辽杂 37 的 SOD 活性没有明显差别。而辽杂 57 号的 SOD 活性在成熟期最低,甚至接近无活性,辽杂 66 号次之,辽杂 62、辽杂 61、辽杂 73 的 SOD 活性均大幅低于辽糯 10 等高 SOD 活性品种且相互之间不存在明显差异(图 1)。

2.2 不同品种成熟期 POD 活性比较 不同品种高粱在成熟期(除个别品种外)POD 活性差异不明显:成熟期 POD 活性最高的品种是辽糯 10 号,辽杂 73 的 POD 活性次之,但两者间差距甚微并显著高于其余品种;而辽杂 61 的成熟期 POD 活性最低且仅为辽糯 10 的 50%,辽杂 66、辽糯 11 等其余品种 POD 活性稍高于辽杂 61,但不存在显著差异(图 2)。

2.3 不同品种成熟期 CAT 活性比较 不同高粱品种在成熟期时 CAT 活性存在显著差异,辽杂 73 成熟期的 CAT 活性最高且明显高于其余品种,辽糯 15 成熟期的 CAT 活性次之;辽粘 03、辽糯 10、辽杂 61 在成熟期的 CAT 活性不存在显著差异;而辽杂 66 在成熟期的 CAT 活性最低,仅为辽杂 73 号

的 10%(图 3)。

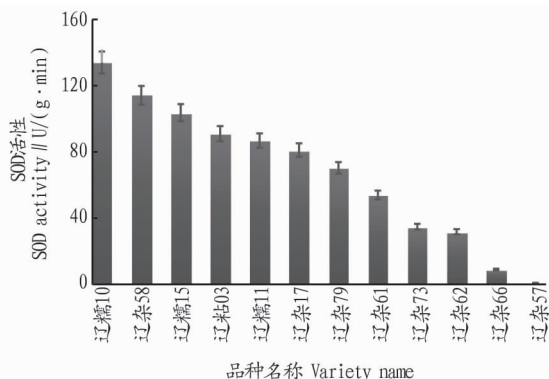


图 1 不同高粱品种 SOD 活性比较

Fig. 1 Comparison of the SOD activity of different sorghum varieties

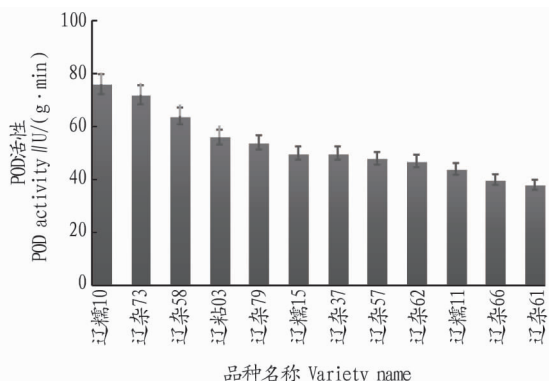


图 2 不同高粱品种 POD 活性比较

Fig. 2 Comparison of the POD activity of different sorghum varieties

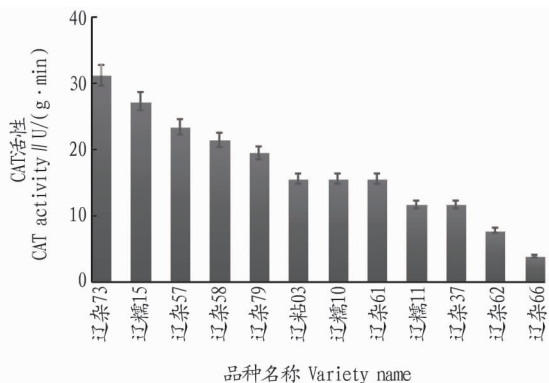


图 3 不同高粱品种 CAT 活性比较

Fig. 3 Comparison of the CAT activity of different sorghum varieties

2.4 不同品种成熟期 MDA 含量比较 不同品种高粱的 MDA 活性在成熟期差异显著,辽杂 66 和辽杂 57 的 MDA 活性在成熟期显著高于其余各品种,但两者间差距甚微。而辽糯 15 的 MDA 活性最低,仅为辽杂 66 的 25%(图 4)。

2.5 不同品种可溶性糖含量比较 12 个高粱品种间成熟期叶片的可溶性糖含量有差异性,其中辽杂 66、辽杂 79、辽糯 10 叶片可溶性糖含量均显著高于其余品种;辽杂 66 的可溶性糖含量最高,是辽杂 61 的 2 倍以上;辽杂 73、辽糯 15、辽糯

11、辽杂 37 品种间可溶性糖含量差异不大(图 5)。

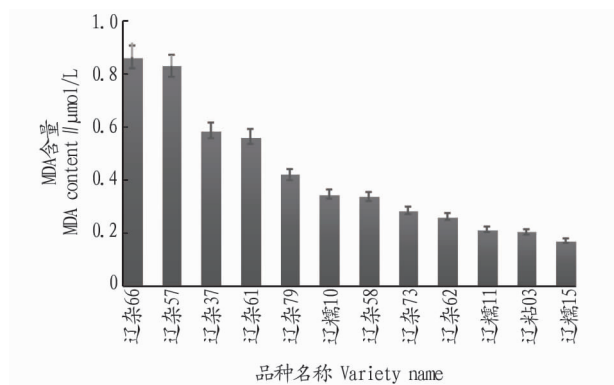


图 4 不同高粱品种 MDA 含量比较

Fig. 4 Comparison of the MDA content of different sorghum varieties

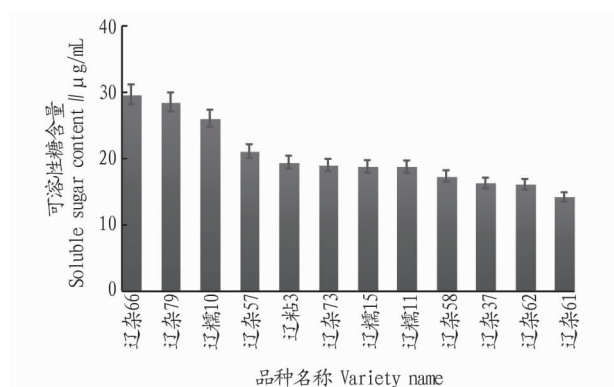


图 5 不同高粱品种可溶性糖含量比较

Fig. 5 Comparison of the soluble sugar content of different sorghum varieties

2.6 高粱蔗糖磷酸合成酶(SS)活性分析 成熟期不同高粱品种叶片的SS活性存在显著差异,其中辽杂66的SS活性最高,为39.3 mg/(g·h),活性显著高于其他品种;辽杂61的SS活性最低(图6)。

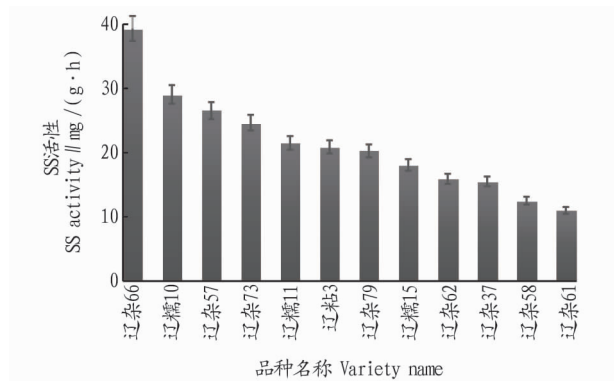


图 6 不同高粱品种 SS 活性比较

Fig. 6 Comparison of SS activity of different sorghum varieties

结果表明,高粱叶片可溶性糖含量与其SS活性呈显著正相关($R=0.7947, P<0.01$)的关系,这说明高粱叶片SS活性的提高可直接促进体内可溶性糖的积累。其次,进行SS活性与可溶性糖含量之间的相关性分析,结果表明SS活性与可溶性糖含量之间的相关系数为 $R^2=0.6315$,在范围中线

性关系好(图7),回归方程为 $y=0.5049x+9.733$ 。

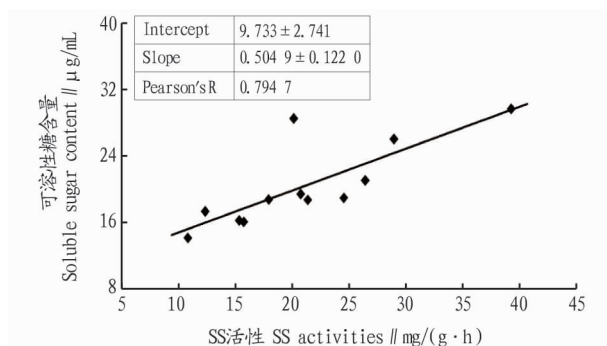


图 7 SS 活性与可溶性糖含量相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between SS activity and soluble sugar content

2.7 高粱蔗糖合成酶(SPS)活性分析 成熟期不同高粱品种叶片的SPS活性存在显著性差异,在12个品种高粱叶中,辽杂66的SPS活性最大,为33.93 mg/(g·h),显著高于其他各品种,而辽杂61的SPS活性最低(图8)。

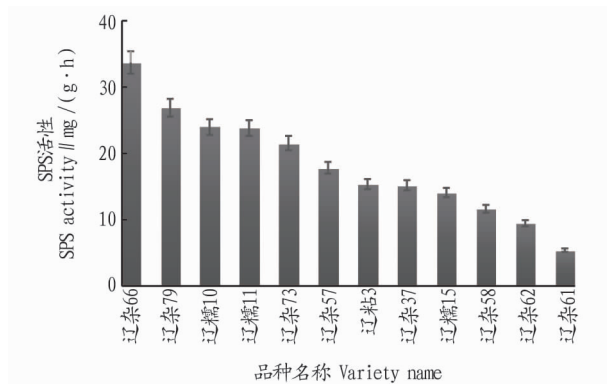


图 8 不同高粱品种 SPS 活性比较

Fig. 8 Comparison of SPS activity of different sorghum varieties

结果表明,叶片中SPS活性与可溶性糖含量呈显著正相关($R=0.8854, P<0.01$)关系,表明高粱叶片SPS活力对可溶性糖含量具有正向直接关系。其次,进行上述2个指标间的相关性分析后可知,SPS活性与可溶性糖含量之间的相关系数为 $R^2=0.784$,在范围中线性关系好(图9),回归方程为 $y=0.5534x+10.25$ 。

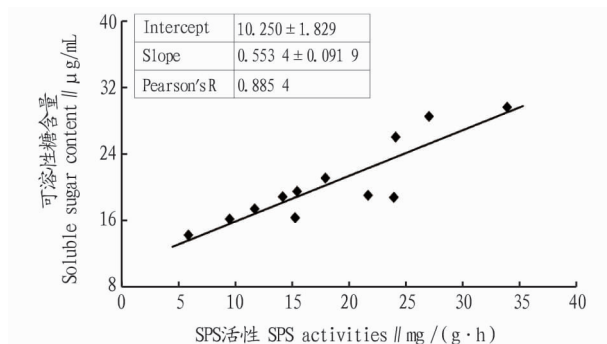


图 9 SPS 活性与可溶性糖含量相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between SPS activity and soluble sugar content

2.8 高粱SS及SPS活性相关性分析 分析成熟期高粱叶

片 SPS 活性与 SS 活性的相关性可知,除辽杂 79、辽糯 11 外,其余各品种的 SS 活性均高于 SPS 活性,品种间不存在显著差异(图 10)。SS 活性与 SPS 活性变化趋势相同,呈显著正相关($R=0.855\ 0, P<0.01$)关系,范围内线性关系良好,回归方程为 $y=0.869\ 2x-0.025$ (图 11)。

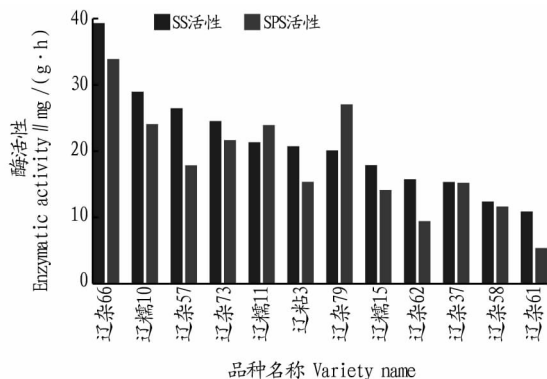


图 10 不同高粱品种 SS 和 SPS 活力比较

Fig. 10 Comparison of SPS and SS activities of different sorghum varieties

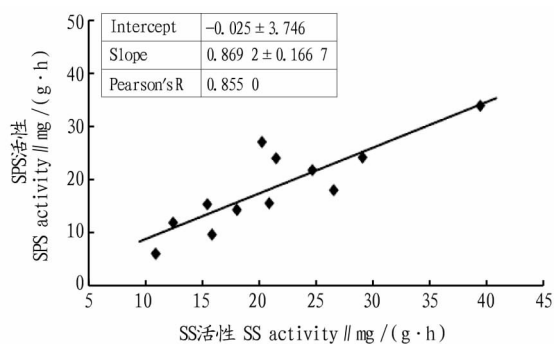


图 11 SPS 与 SS 酶活力相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis between SPS and SS activities

3 结论

高粱是我国极为重要的旱粮作物,对食品工业、畜牧业等方面具有广泛的现实和潜在价值,因此高粱的改良、有效利用和开发具有重要意义^[9]。而优良种质资源的选育则是进一步提高产量最佳途径。同时,植物对逆境的耐受能力与生长发育和产量之间存在着密切的联系。

抗氧化酶类是清除植物体内活性氧的重要组成部分,是确保植物体正常生长的重要酶类^[10]。植物体内的抗氧化酶类主要有 SOD、POD 和 CAT 等。其中,SOD 是植物面对氧化胁迫时的第一道防线,当植物体内保持较高 SOD 活性时,说明此时植物体拥有较强的抗逆境伤害能力^[11];POD 是植物细胞内清除 H_2O_2 的主要酶类,可减轻 H_2O_2 积累对植物体造成的伤害^[12];CAT 能够避免活性氧自由基对植物造成伤害,其主要作用途径在于清除 β -脂脂肪酸氧化、线粒体电子传递和光呼吸等过程中产生的过氧化氢(H_2O_2)^[13],同时 MDA 含量在一定程度上反映膜脂过氧化作用水平和膜结构的受害程度^[14]。可溶性糖含量是评价高粱利用价值的重要指标;蔗糖磷酸合成酶(SPS)和蔗糖合成酶(SS)是参与高等植物调控蔗糖代谢的 2 种关键酶,其中 SPS 可催化蔗糖的合成,

SS 既可催化蔗糖的合成又可催化蔗糖的分解^[15]。

该研究以 12 种高粱品种为试验材料,在成熟期对叶片随机取材,测定其抗性生理生化指标(SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、MDA 含量)及糖代谢途径相关指标(SPS 活性、SS 活性、可溶性糖含量),综合分析上述指标的测定结果可得出以下结论:

(1) 辽糯 10 号、辽杂 58 号、辽糯 15 号 SOD 活性最高,表明此时植物可有效清除自由基,减少超氧阴离子对植物体的伤害,有效抵抗外界氧化胁迫。

(2) 辽糯 10 号、辽杂 73 号、辽杂 58 号 POD 活性最强,而辽杂 73 号、辽糯 15 号、辽杂 57 号 CAT 活性达到最高值,表明此时植物可快速分解清除体内 H_2O_2 ,从而在一定程度上减轻 H_2O_2 对植物体的毒害。

(3) 辽糯 15 号、辽粘 03 号、辽糯 11 号的 MDA 含量最低,MDA 是膜脂过氧化的重要产物之一,其含量高低在一定程度上反映膜脂过氧化作用水平和膜结构的受害程度,含量越低时,其抗逆性越强。

(4) 辽杂 66 号、辽杂 79 号、辽糯 10 号 3 个品种叶片中的可溶性糖含量最高而且明显高于其他品种。

(5) 辽杂 66 号、辽糯 10 号、辽杂 57 号 3 个品种叶片中的 SS 活性最高,说明高粱叶片 SS 活性对可溶性糖含量具有正向直接关系。

(6) 辽杂 66 号、辽杂 79 号、辽糯 10 号高粱叶片中 SPS 活性最大,分析其与可溶性糖含量之间的相关性,得出高粱叶片 SPS 活性对可溶性糖含量具有正向直接关系。

(7) 辽杂 66 号、辽糯 10 号 SPS 活性、SS 活性及可溶性糖含量均显著高于其余品种,可推测 SS 和 SPS 共同参与了植物体内糖代谢过程的调控,通过改变其活性进而共同调节糖分的积累。

综上所述,辽糯 10 号同时具有抗逆性强、可溶性糖含量高的双重优势,因此是 12 个不同品种高粱中生物学性能最优异且均衡的品种,可在大规模农业生产中保证其存活率并提高单位面积产量;辽糯 15 号 SOD 和 CAT 活性最高,同时 MDA 含量最低,说明辽糯 15 号具有最强的抗逆性;辽杂 66 号 SS 和 SPS 活性最高,从而对糖分积累有促进作用,利于实现高产。筛选出上述拥有不同优良性状的品种可用于农业生产上因地制宜的种植,定位相关性状基因,杂交育种制备作物优质新品种等研究领域,为更有效地获得理想作物种质资源奠定理论基础。

4 讨论

该试验旨在通过研究不同高粱品种间抗性生理生化指标的差异,探索高粱中可溶性糖的含量与 SS 和 SPS 活性的关系,以期从多维度揭示高粱抗旱耐盐碱机制,丰富其抗逆生理内容;发掘并进一步地了解高粱糖分积累机制,明确高粱糖分积累分子调节机制的内在机理。

以该试验结果为理论依据,建立有效选育抗性强、产量高的优质高粱种质资源的重要途径,为后续制定强化高粱抗

2030年耕地和建设用地面积不断增加,林地、草地面积都有不同程度减少。

参考文献

- [1] BROGAARD S,ZHAO X Y. Rural reforms and changes in land management and attitudes; A case study from Inner Mongolia, China[J]. *Ambio*, 2002,31(3):219-225.
- [2] LAMBIN E F. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions[J]. *Progress in physical geography*, 1997,21(3):375-393.
- [3] 陈佑启,杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J]. *经济地理*,2001,21(1):95-100.
- [4] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*,2014,69(1):3-14.
- [5] 刘纪远,张增祥,徐新良,等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*,2009,64(12):1411-1420.
- [6] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等. 黄河河口镇—潼关区间1998—2010年土地利用变化特征[J]. *地理学报*,2014,69(1):42-53.
- [7] 马才学,孟芬,赵利利. 1990—2005年武汉市土地利用时空变化及其政策驱动因素分析[J]. *水土保持研究*,2015,22(2):117-122.
- [8] 王薇,王昕,黄乾,等. 黄河三角洲土地利用时空变化及驱动力研究[J]. *中国农学通报*,2014,30(32):172-177.
- [9] 佟光臣,林杰,陈杭,等. 1986—2013年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析[J]. *水土保持研究*,2017,24(2):240-245.
- [10] 高凌寒,赵鹏祥,张晓莉,等. 西宁市主城区土地利用时空变化驱动力分析[J]. *水土保持研究*,2017,24(2):234-239.
- [11] 张月,郗睿卿,张蔚,等. 吉林市土地利用时空变化及驱动力分析[J]. *测绘科学*,2015,40(7):73-77.
- [12] 张军辉,顾蕾,岳永兵. 沧州市土地利用时空变化及驱动力分析[J]. *中国国土资源经济*,2014,27(12):69-72.

- [13] 于海影,韦安胜,陈竹君. 基于RS和GIS的杨凌区土地利用变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*,2014,21(5):79-83.
- [14] 吕桐,吴永波. 基于RS的崇明岛土地利用变化及驱动力分析[J]. *中国农学通报*,2014,30(5):203-207.
- [15] 史利江,王圣云,姚晓军,等. 1994~2006年上海市土地利用时空变化特征及驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*,2012,21(12):1468-1479.
- [16] 郭年冬,陈召亚,李恒哲,等. 基于土地利用变化下的县域生态敏感性及其灰色预测:以河北省平山县为例[J]. *水土保持研究*,2016,23(5):229-234.
- [17] 李正,王军,白中科,等. 贵州省土地利用及其生态系统服务价值与灰色预测[J]. *地理科学进展*,2012,31(5):577-583.
- [18] 闫沛祿. 基于信息熵的酒泉市土地利用结构分析及其灰色预测[J]. *甘肃农业大学学报*,2011,46(6):129-134.
- [19] 王晓娇,陈英,齐鹏,等. 基于信息熵的张掖市土地利用结构分析及其灰色预测[J]. *干旱区研究*,2011,28(1):92-97.
- [20] 严明,廖铁军. 基于Excel的灰色预测模型在土地利用规划中的应用[J]. *安徽农业科学*,2007,35(12):3627-3628.
- [21] 李宁,岳彩荣. 基于GIS与RS的肇源县土地利用变化分析[J]. *中国农学通报*,2011,27(29):224-228.
- [22] 唐家荣,张世熔,吴光碧,等. 基于RS和GIS的土地利用时空动态变化分析:以重庆永川区为例[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*,2014,45(4):552-558.
- [23] 李志锋,王一谋,冯毓芬,等. 基于RS与GIS的榆林地区土地利用变化分析[J]. *水土保持学报*,2003,17(2):97-99,140.
- [24] 韩会然,杨成凤,宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制[J]. *经济地理*,2015,35(5):148-154,197.
- [25] 徐建华. *现代地理学中的数学方法*[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2002:342-344.

(上接第49页)

性及提高产量的技术措施,筛选近缘作物优质种质资源,提高作物育种水平,筛选差异表达基因,进而完成蛋白质组和转录组关联分析,最终挖掘调控高粱抗性强弱及糖分积累的关键基因及解析其分子调控机制奠定坚实的理论基础。

从未来发展的角度而言,随着分子生物学与分子遗传学的迅猛发展及其在农业育种方面的广泛利用,传统的育种方案已不能满足当今对优质农作物选育的需求,而通过利用比较基因组学与功能基因组学等近些年来兴起的生物技术手段,加强对高粱高产高抗等相关优质性状的基因定位、基因克隆和分子标记等方面研究,在不久的将来,有理由相信优质高粱育种工作必将焕发新的活力。

参考文献

- [1] 阮班普,田福宽,马伯军,等. 水稻粒重的遗传与分子生物学研究进展[J]. *中国稻米*,2013,19(6):17-20,22.
- [2] 于晓宇. 辽宁地区高粱高产栽培技术[J]. *农业开发与装备*,2021(1):219-220.
- [3] 周其宣. 优质高粱“红缨子”高产栽培技术[J]. *安徽农学通报*,2014,20(15):47-48.

- [4] 邹剑秋,朱凯,张志鹏,等. 国内外高粱深加工研究现状与发展前景[J]. *杂粮作物*,2002,22(5):296-298.
- [5] 寇兴凯,徐同成,宗爱珍,等. 高粱的营养价值以及应用现状[J]. *安徽农业科学*,2015,43(21):271-273.
- [6] 薛薇,崔江慧,孙爱芹,等. 高粱可溶性糖含量与SS、SPS酶活性的相关性研究[J]. *中国农业科技导报*,2009,11(2):124-128.
- [7] 卢晓霞,康晓慧,付菊梅,等. 油菜根肿病对油菜光合作用及酶活性的影响[J]. *广东农业科学*,2013,40(24):71-73,81.
- [8] 朱广龙,韩蕾,陈婧,等. 酸枣生理生化特性对干旱胁迫的响应[J]. *中国野生植物资源*,2013,32(1):33-37,44.
- [9] 刘燕,伊伟贞,焦连魁,等. 高效液相色谱法测定地黄蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶活性[J]. *中国农学通报*,2011,27(15):245-248.
- [10] 丁霖,刘馨,钱美玲,等. 5个国外主栽甜高粱品种的抗性生理指标分析[J]. *贵州农业科学*,2017,45(6):34-36.
- [11] 李君,葛跃,孙向武,等. 硫对镉胁迫下蓖麻生理生化特性的影响[J]. *常州大学学报(自然科学版)*,2016,28(3):48-53.
- [12] 王丽红,陈惠茹,周青. 铜与锌对香樟、广玉兰及榉树生理生化特性的复合影响[J]. *生态环境学报*,2013,22(11):1819-1824.
- [13] 刘云芬,王薇薇,祖艳侠,等. 过氧化氢酶在植物抗逆中的研究进展[J]. *大麦与谷类科学*,2019,36(1):5-8.
- [14] 宋新华,赵凤云. 植物体内过氧化氢酶的研究进展[J]. *安徽农业科学*,2007,35(31):9824-9827.
- [15] 刘海波,魏玉清,周维松,等. 土壤盐胁迫对甜高粱茎秆糖分积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2017,45(5):41-47.