

网络出版时间:2015-06-10 08:40

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.07.005

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150610.0840.005.html

不同基因型谷子叶片衰老及活性氧代谢研究

刘凤琴¹,冯强强¹,妙佳源¹,苏旺¹,
王孟²,董孔军³,冯佰利¹

(1 西北农林科技大学 旱区作物逆境生物学国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2 榆林市农业科学研究院,陕西 榆林 719000;

3 甘肃省农业科学院作物研究所,甘肃 兰州 730070)

[摘要] **【目的】**探讨谷子叶片衰老的生理机制,为谷子生产与栽培技术研究提供理论依据。**【方法】**以 3 个抗旱性不同的谷子品种为材料,研究了谷子开花至成熟期叶片叶绿素含量、可溶性蛋白含量、酶促防御系统保护酶(SOD、CAT、POD)活性及 MDA 和 O_2^- 积累量的动态变化。**【结果】**谷子开花后功能叶片叶绿素含量以及 SOD、POD、CAT 活性均在开花 7 d 达到最大值,其后逐渐下降,各叶位表现为旗叶>倒二叶>倒三叶,不同品种表现为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号;功能叶片可溶性蛋白含量随生育进程的推进逐渐下降,各叶位表现为旗叶>倒二叶>倒三叶,不同品种表现为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号;功能叶片 O_2^- 和 MDA 含量随叶片衰老而增高,各叶位表现为倒三叶>倒二叶>旗叶,不同品种表现为白谷 9 号>太选 1 号>大同 32;3 个谷子品种产量表现为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号。**【结论】**生产实践中,选择绿叶功能期长、抗逆丰产的品种是旱区谷子丰产的重要因素。

[关键词] 谷子;叶片衰老;活性氧代谢

[中图分类号] S515.01

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)07-0095-06

Leaf senescence and reactive oxygen metabolism of foxtail millet with different genotypes

LIU Feng-qin¹, FENG Qiang-qiang¹, MIAO Jia-yuan¹, SU Wang¹,
WANG Meng², DONG Kong-jun³, FENG Bai-li¹

(1 State Key Laboratory of Crop Biology Adversity and Arid Regions, Northwest A&F University, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 2 Yulin Research Institute of Agricultural Science, Yulin, Shaanxi 719000, China;

3 Gansu Research Institute of Agricultural Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: **【Objective】**This study investigated the physiological mechanism for leaf senescence of foxtail millet to provide theoretical basis for production and cultivation of foxtail millet varieties. **【Method】**Three foxtail millet varieties with different drought resistances were used to explore contents of chlorophyll and soluble protein, activities of enzymatic defense system protective enzymes (SOD, CAT and POD), and dynamic changes of MDA and O_2^- accumulations in leaves during flowering to ripening stages. **【Result】**Chlorophyll content and activities of SOD, POD, and CAT reached maximum 7 d after flowering, and then gradually decreased. The performances of leaves were in a decreasing order of flag leaf>top second leaf>top third leaf, while different varieties had a decreasing order of Datong 32>Taixuan 1>Baigu

[收稿日期] 2014-04-24

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31371529);国家谷子糜子产业技术体系项目(CARS-07-12.5-A9);农业部公益性行业(农业)科研专项(200903007);陕西省攻关项目

[作者简介] 刘凤琴(1987—),女,河南项城人,硕士,主要从事作物优质高产生态生理技术研究。E-mail:zkfengqin@gmail.com

[通信作者] 冯佰利(1966—),男,陕西耀县人,教授,博士生导师,主要从事作物高产生态生理技术及小杂粮栽培、育种研究。
E-mail:7012766@163.com

9. The soluble-protein of different foxtail millet varieties gradually decreased and performances of leaves had the order of flag leaf>top second leaf>top third leaf, while different varieties had the order of Datong 32>Taixuan 1>Baigu 9. O_2^- and MDA contents increased along with the senescence, performances in leaves had the order of top third leaf>top second leaf>flag leaf, while different varieties performed in the order of Baigu 9>Taixuan 1>Datong 32. Yields of millet varieties were in the decreasing order of Datong 32>Taixuan 1>Baigu 9. 【Conclusion】 The variety with strong resistance and long lasting green leaf was suggested to improve yield.

Key words: foxtail millet; leaf senescence; antioxidant metabolism

谷子(*Setaria italica* (L.) Beauv) 是世界上古老农作物之一,它生长于中国、印度及北非和美洲的干旱半干旱地区,因其耐旱性而广泛种植^[1],是干旱半干旱地区的重要粮食作物。同时,谷子是 C4 植物,与柳枝稷、珍珠粟等生物燃料作物一样,耐受性极强,可作为一种替代物种参与未来生物燃料的研究^[2]。因此,筛选抗旱谷子品种,探索谷子抗旱生理特性,对于提高谷子的产量和品质,实现产区农民增收具有重要的现实意义。

活性氧是植物细胞正常新陈代谢的产物,过度产生会钝化保护酶的活性,破坏细胞的稳定性^[3],对细胞组分、结构及新陈代谢造成氧化伤害^[4]。作物在生长过程中,可通过多种途径产生活性氧,而为了保护自身免受伤害,作物细胞内也存在清除这些活性氧的多种途径^[5-6],其中超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)等是活性氧清除系统的重要保护性酶^[7]。这些保护性酶能有效地阻止高浓度活性氧积累,防止膜脂过氧化,延缓植物衰老,使植物维持正常的生长和发育^[4]。目前,关于谷子的研究多集中在谷子种质资源^[8]、营养价值^[9]、高产栽培模式^[10]等方面,关于叶片衰老与活性氧代谢方面的研究则以小麦^[11]、玉米^[12]、水稻^[13]等大宗作物居多。在植物衰老过程中,活性氧的积累对植物产生伤害的一个重要机制是直接或间接启动膜脂的过氧化作用,导致膜的损伤和破坏,引起膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)的增加,叶绿素的降解和光合酶活性下降,使植物光合能力下降,进而影响籽粒产量的形成。但目前有关不同基因型谷子在生长发育过程中叶片衰老以及活性氧代谢的研究尚未见报道。本研究以不同基因型谷子为材料,分析不同类型谷子开花期至成熟期叶片衰老过程中叶绿素含量, SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量的变化,探讨谷子叶片衰老的生理机制,为谷子生产与栽培技术研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试谷子材料为大同 32、太选 1 号和白谷 9 号,经甘肃省农业科学院敦煌试验站田间鉴定,参试品种抗旱指数分别为 2.13, 1.39 和 0.09,品种间抗旱性差异明显。

1.2 试验设计

试验于 2013 年在陕西省榆林市现代农业科技示范区进行。该示范区位于黄土高原北部半干旱易旱区(109.77° E, 38.36° N),海拔 1 050 m,年平均降水量为 420 mm,其中 60%集中在 7—9 月,为中温带干旱半干旱大陆性季风气候。小区面积 15 m² (2 m×7.5 m),6 行区,行距 33.3 cm,种植密度 30 万株/hm²。05-08 整地,05-09 施入磷酸二胺 300 kg/hm²,尿素 150 kg/hm²,05-10 开沟条播,6 月上旬定苗。试验为单因素(品种)随机区组排列,设 3 次重复。田间管理按照国家谷子品种区域试验要求进行。

1.3 田间取样

自谷子开花期(08-09)起,选择生长基本一致且无病虫害的植株,挂牌标记,每隔 7 d 于上午 10:00 取样,剪下旗叶、倒二叶、倒三叶及时放入冰壶并带回实验室,置于-40℃超低温冰箱保存待测。

1.4 测定项目及方法

(1) 叶绿素含量。采用丙酮浸提法^[14];用 UV-2012 分光光度计进行比色测定,按 Inskeep 法计算其含量。

(2) 可溶性蛋白含量。采用考马斯亮蓝-250 蛋白染色法^[14]测定。

(3) 氧离子自由基 O_2^- 含量。参照王爱国等^[15]的方法测定。

(4) SOD、CAT、POD 活性。分别取叶片 0.500 g 剪碎,置于预冷研钵内,取 8 mL 预冷的提取介质(0.05 mol/L pH 7.8 的 Na_2HPO_4 - NaH_2PO_4 缓冲

液)及少量石英砂,在冰浴中研磨,匀浆后于 2 ℃、20 000×g 冷冻离心 30 min,上清液即为酶提取液。用此酶液并参照王爱国等^[15]和刘道宏^[16]的改进法测定 SOD 活性,用姜春明等^[17]的方法测定 POD 和 CAT 活性。

(5) MDA 含量的测定。采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[12]测定。

(6) 产量及其构成因素。谷子成熟时随机取样 20 株进行考种,分别测定株高、穗长、穗码数、穗粗、穗粒数、千粒质量,按照小区实收计产。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS V7.0 统计软件进行试验数据处理和统计分析,用 Duncan 新

复极差法进行样本间的多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同基因型谷子叶片叶绿素含量的变化

由表 1 可知,随着生育进程的推进,谷子叶片叶绿素含量逐渐增大,花后 7 d(08-16)达最大值,之后随叶片衰老呈明显的下降趋势,不同叶位叶片叶绿素含量依次为旗叶>倒二叶>倒三叶,不同基因型品种差异显著,同一叶位叶绿素含量大小依次为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号。与干旱敏感品种白谷 9 号相比,抗旱品种大同 32 各功能叶片的叶绿素衰减过程较为缓慢。

表 1 不同基因型谷子叶片叶绿素含量的变化
Table 1 Changes of chlorophyll content in leaves of different foxtail millet genotypes mg/g

叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	2.42 b	3.19 b	2.19 b	1.77 c	1.18 b	0.70 c	0.21 b
	太选 1 号 Taixuan 1	3.89 a	4.18 a	2.82 a	2.08 b	1.53 a	0.84 b	0.23 b
	大同 32 Datong 32	4.13 a	4.30 a	3.12 a	2.47 a	1.65 a	0.99 a	0.40 a
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	2.34 c	2.83 c	2.01 c	1.68 c	1.06 c	0.64 b	0.13 b
	太选 1 号 Taixuan 1	3.30 b	3.67 b	2.88 b	2.06 b	1.44 b	0.81 a	0.15 b
	大同 32 Datong 32	3.93 a	4.39 a	2.94 a	2.23 a	1.43 a	0.95 a	0.35 a
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	2.29 c	2.68 c	1.84 c	1.55 c	0.98 c	0.51 c	0.09 c
	太选 1 号 Taixuan 1	2.97 b	3.33 b	2.53 b	1.94 b	1.21 b	0.73 b	0.14 b
	大同 32 Datong 32	3.36 a	4.15 a	2.94 a	2.17 a	1.37 a	0.89 a	0.28 a

注:同叶位同时期栏中不同小写字母表示差异在 0.05 水平上显著。表 2~7 同。
Note:Different small letters in each column for same leaf position indicate significant difference at 0.05 level. The same table 2~7.

2.2 不同基因型谷子叶片可溶性蛋白含量的变化

植株叶片可溶性蛋白含量的高低,不仅反映植株氮代谢水平,而且常被作为叶片衰老程度的重要指标^[18]。由表 2 可知,谷子开花至成熟期叶片可溶性蛋白含量逐渐降低,不同叶位可溶性蛋白含量表

现为旗叶>倒二叶>倒三叶,不同基因型谷子各叶位可溶性蛋白含量在开花初期差异不显著,随植株的衰老差异增大至显著水平,且相同叶位可溶性蛋白含量表现为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号。

表 2 不同基因型谷子叶片可溶性蛋白含量的变化
Table 2 Changes of soluble protein content in leaves of different foxtail millet genotypes mg/g

叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	22.27 b	20.34 b	15.40 b	12.02 b	8.82 b	5.31 b	2.25 b
	太选 1 号 Taixuan 1	23.65 a	22.18 a	16.15 a	13.30 b	10.18 a	6.45 b	3.83 b
	大同 32 Datong 32	24.31 a	23.28 a	17.92 a	14.15 a	11.65 a	8.17 a	5.30 a
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	20.34 b	18.85 b	13.19 c	9.51 c	6.51 c	4.27 c	1.86 b
	太选 1 号 Taixuan 1	22.04 a	20.03 a	14.23 b	10.89 b	7.56 b	5.06 b	2.74 a
	大同 32 Datong 32	23.51 a	21.32 a	15.92 a	11.29 a	8.71 a	6.65 a	4.08 a
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	18.49 b	16.31 b	11.90 b	7.46 b	5.50 c	4.07 b	1.27 c
	太选 1 号 Taixuan 1	19.70 a	18.86 a	13.60 a	9.73 a	6.45 b	4.72 b	2.11 b
	大同 32 Datong 32	20.86 a	19.22 a	14.79 a	10.36 a	7.51 a	5.54 a	3.78 a

2.3 不同基因型谷子叶片 O₂⁻ 含量的变化

在植株生长发育过程中,体内会产生并积累一定量的活性氧^[19]。由表 3 可知,自谷子开花后,随着生育进程的推进,谷子叶片 O₂⁻ 含量逐渐增加,旗叶中 O₂⁻ 含量与倒二叶、倒三叶变化趋势一致,不同

叶位 O₂⁻ 含量表现为倒三叶>倒二叶>旗叶,但不同基因型谷子各叶位 O₂⁻ 含量上升幅度存在差异,其中,白谷 9 号增幅最大,太选 1 号次之,大同 32 最小,且同一叶位 O₂⁻ 含量表现为白谷 9 号>太选 1 号>大同 32。

表 3 不同基因型谷子叶片 O₂⁻ 含量的变化

Table 3 Changes of O ₂ ⁻ content in leaves of different foxtail millet genotypes		μg/g						
叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	7.37 a	10.19 a	14.64 a	18.60 a	22.90 a	26.80 a	31.58 a
	太选 1 号 Taixuan 1	6.66 b	9.92 b	13.48 a	16.30 b	19.11 b	24.00 b	29.78 b
	大同 32 Datong 32	5.91 c	8.91 c	11.17 b	15.23 c	18.84 c	21.41 c	25.13 c
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	8.58 a	12.26 a	17.75 a	20.79 a	25.75 a	30.14 a	34.42 a
	太选 1 号 Taixuan 1	8.23 a	12.01 a	16.21 b	18.74 b	23.25 b	28.15 b	33.97 a
	大同 32 Datong 32	7.62 b	10.21 b	14.82 c	17.34 c	21.15 c	26.13 c	30.90 b
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	9.19 a	14.29 a	19.44 a	23.96 a	27.21 a	31.26 a	35.87 a
	太选 1 号 Taixuan 1	8.79 b	13.51 a	17.36 b	20.28 b	24.70 b	30.74 a	35.00 a
	大同 32 Datong 32	8.30 b	11.46 b	14.93 c	18.81 c	23.70 c	28.72 b	32.69 b

2.4 不同基因型谷子叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的变化

SOD、POD 和 CAT 作为细胞内的重要保护酶,对防止超氧自由基对生物膜系统的氧化,以及细胞的抗氧化、衰老具有重要意义,其活性的高低标志着植物细胞自身抗衰老能力的强弱^[20]。由表 4~6 可

知,谷子开花至成熟阶段叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均在花后 7 d 达到最大值,之后随叶片衰老呈下降趋势,表现为旗叶>倒二叶>倒三叶。不同基因型品种差异显著,同一叶位 SOD、POD 及 CAT 活性大小依次为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号。

表 4 不同基因型谷子叶片 SOD 活性的变化

Table 4 Changes of SOD activity in leaves of different foxtail millet genotypes		U/g						
叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	1 641.64 b	2 061.53 b	1 631.46 c	1 440.98 c	1 421.11 c	825.53 b	691.93 b
	太选 1 号 Taixuan 1	1 860.41 a	2 101.04 b	1 780.06 b	1 534.57 b	1 233.35 b	1 089.36 a	700.44 b
	大同 32 Datong 32	1 940.72 a	2 260.05 a	1 808.16 a	1 629.93 a	1 308.05 a	1 104.68 a	822.35 a
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	1 688.64 c	1 826.59 c	1 511.65 b	1 200.29 c	906.14 b	723.40 c	410.86 b
	太选 1 号 Taixuan 1	1 708.03 b	1 940.54 b	1 680.87 a	1 475.11 b	1 020.72 b	813.62 b	515.94 b
	大同 32 Datong 32	1 814.83 a	2 077.60 a	1 730.29 a	1 566.89 a	1 215.94 a	998.09 a	754.96 a
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	1 516.06 b	1 773.19 b	1 464.85 b	1 068.85 b	862.79 c	501.70 b	339.32 b
	太选 1 号 Taixuan 1	1 672.02 a	1 848.66 a	1 596.89 a	1 339.39 a	946.22 b	639.15 b	422.35 b
	大同 32 Datong 32	1 761.28 a	1 919.46 a	1 630.87 a	1 409.98 a	1 022.44 a	878.30 a	667.48 a

表 5 不同基因型谷子叶片 POD 活性的变化

Table 5 Changes of POD activity in leaves of different foxtail millet genotypes		U/g						
叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	671.56 b	801.85 c	702.07 b	569.71 b	426.62 c	327.45 b	136.06 c
	太选 1 号 Taixuan 1	803.02 a	942.57 b	793.21 b	621.41 b	503.28 b	349.59 b	193.10 b
	大同 32 Datong 32	813.31 a	1 044.08 a	887.83 a	754.32 a	610.87 a	467.19 a	280.88 a
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	538.48 c	764.08 c	623.70 b	512.22 b	421.99 c	274.34 b	123.37 b
	太选 1 号 Taixuan 1	686.46 b	810.84 b	682.68 b	531.67 b	451.97 b	294.76 b	168.61 b
	大同 32 Datong 32	706.46 a	974.12 a	778.18 a	633.85 a	485.46 a	361.05 a	235.53 a
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	523.26 b	688.55 c	568.88 b	450.01 b	337.68 b	228.17 c	116.55 b
	太选 1 号 Taixuan 1	640.44 a	786.32 b	595.70 b	477.57 b	360.52 a	265.82 b	144.39 b
	大同 32 Datong 32	697.43 a	953.38 a	709.46 a	588.61 a	376.91 a	294.84 a	188.55 a

表 6 不同基因型谷子叶片 CAT 活性的变化								
Table 6 Changes of CAT activity in leaves of different foxtail millet genotypes								U/g
叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	191.87 b	267.28 c	194.75 c	142.35 c	106.66 c	61.40 b	31.10 b
	太选 1 号 Taixuan 1	229.52 a	314.19 b	238.74 b	185.43 b	125.82 b	81.64 b	45.22 a
	大同 32 Datong 32	232.29 a	348.03 a	253.64 a	209.58 a	152.72 a	109.30 a	48.28 a
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	171.84 b	230.28 b	179.65 b	132.92 b	105.50 b	53.59 c	26.38 b
	太选 1 号 Taixuan 1	193.85 a	254.69 b	184.13 b	148.06 b	112.99 b	73.69 b	30.84 a
	大同 32 Datong 32	201.84 a	324.71 a	204.78 a	168.46 a	121.37 a	90.23 a	32.15 a
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	159.27 b	212.11 b	156.76 b	109.39 b	72.23 c	37.13 c	22.14 b
	太选 1 号 Taixuan 1	179.50 a	229.52 b	169.71 b	112.15 b	80.13 b	46.46 b	25.10 b
	大同 32 Datong 32	182.98 a	317.79 a	186.70 a	132.50 a	94.42 a	63.71 a	29.90 a

2.5 不同基因型谷子叶片 MDA 含量的变化

表 7 表明,谷子开花至成熟阶段,随叶片衰老 MDA 积累量持续上升,且表现为倒三叶>倒二

叶>旗叶,不同基因型品种之间有显著差异,同一测定时期各叶位 MDA 积累量表现为白谷 9 号>太选 1 号>大同 32。

表 7 不同基因型谷子叶片 MDA 含量的变化								
Table 7 Changes of MDA content in leaves of different foxtail millet genotypes								mmol/g
叶位 Leaf position	基因型 Genotype	日期(月-日) Date (month-day)						
		08-09	08-16	08-23	08-30	09-06	09-13	09-20
旗叶 Flag leaf	白谷 9 号 Baigu 9	6.63 a	8.55 a	12.72 a	16.64 a	20.34 a	24.13 a	28.77 a
	太选 1 号 Taixuan 1	5.44 b	6.94 b	10.02 b	14.93 b	18.76 a	21.50 b	25.10 b
	大同 32 Datong 32	4.41 c	6.67 b	9.53 b	11.73 c	14.92 b	17.41 c	19.43 c
倒二叶 Top second leaf	白谷 9 号 Baigu 9	7.08 a	9.44 a	13.31 a	17.05 a	21.34 a	25.75 a	29.80 a
	太选 1 号 Taixuan 1	5.78 b	7.99 b	12.47 b	15.93 b	19.95 a	23.26 a	26.69 a
	大同 32 Datong 32	5.46 b	7.11 b	12.04 b	14.43 b	15.60 b	16.86 b	22.01 b
倒三叶 Top third leaf	白谷 9 号 Baigu 9	8.50 a	10.11 a	16.21 a	19.08 a	23.37 a	27.12 a	31.76 a
	太选 1 号 Taixuan 1	7.57 b	9.02 b	12.79 b	16.16 b	20.80 b	23.41 b	27.12 b
	大同 32 Datong 32	6.31 c	8.10 c	12.64 b	15.02 b	18.85 c	20.46 c	23.64 c

2.6 不同基因型谷子产量性状的比较

由表 8 可知,大同 32 株高较低,而谷子产量构成因素的穗长、穗码数、穗粗、穗粒数及千粒质量显著高于太选 1 号和白谷 9 号。3 种不同基因型谷子产量差异显著($P<0.05$),表现为大同 32>太选 1 号>白谷 9 号。

表 8 不同基因型谷子的产量及其构成因素							
Table 8 Yield and the components of different foxtail millet genotypes							
基因型 Genotype	株高/cm Plant height	穗长/cm Ear length	穗码数 Spike number	穗粗/cm Ear diameter	穗粒数 Spike grain number	千粒质量/g 1000-grain weight	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield
白谷 9 号 Baigu 9	144.33 a	20.20 b	90.20 c	2.04 b	2 983.90 c	2.91 c	5 406.70 c
太选 1 号 Taixuan 1	140.93 b	22.06 b	116.67 b	2.17 b	3 697.50 b	3.30 b	6 283.30 b
大同 32 Datong 32	135.73 c	25.83 a	120.60 a	2.59 a	4 692.70 a	3.66 a	7 211.10 a

注:同列不同小写字母表示差异在 0.05 水平上显著。
Note:Different small letters in each column indicate significant difference at 0.05 level.

3 讨 论

叶绿素含量是影响光合作用的物质基础。在一定范围内,叶绿素含量与光合作用呈正相关关系,叶绿素含量越高,光合作用也就越强。在实际生长发育过程中,随着玉米^[12]、糜子^[21]、小豆^[22]等生育期的推进,其叶绿素含量呈下降趋势,同时伴随着一系列生理生化变化,如叶片内可溶性蛋白含量的降低、活性氧含量的增加、清除活性氧自由基的保护酶

(POD、SOD、CAT)活性的降低以及丙二醛(MDA)积累量的增加。本研究结果表明,开花至成熟期谷子功能叶片的叶绿素含量呈现出先增后减的趋势,其中抗旱高产品种大同 32 叶片叶绿素含量降低速度最慢,衰老延缓。

植物衰老过程中,活性氧积累对植物产生伤害的一个重要机制是直接或间接启动膜脂的过氧化作用,导致膜的损伤和破坏,引起膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量的增加,叶绿素降解,从而加速植株

的衰老^[23]。本研究结果表明,从开花到成熟期,谷子叶片 SOD、CAT、POD 活性随着生育进程都呈现出先增后减的趋势,而 MDA 和 O₂⁻ 的含量则呈现出上升的趋势。尽管参试品种衰老过程中总体趋势表现基本一致,但抗旱品种在生育后期功能叶片 SOD、CAT、POD 活性下降缓慢,MDA 含量较少。

[参考文献]

[1] Jayaraman A,Puranik S,Rai N K,et al. cDNA-AFLP analysis reveals differential gene expressioin response to salt stress in foxtail millet (*Setaria italica* L.) [J]. Mol Biotechnol,2008,40:241-251.

[2] Zhang G Y,Liu X,Quan Z W,et al. Genome sequence of foxtail millet (*Setaria italica*) provides insights into grass evolution and biofuel potential [J]. Nature Biotechnology,2012,30:549-554.

[3] Sreenivasulu N,Ramanjulu S,Ramachandra-Kini K,et al. Total peroxidase activity and peroxidase isoforms as modified by salt stress in two cultivars of foxtail millet with differential salt tolerance [J]. Plant Sci,1999,141:1-9.

[4] Wang W B,Kim Y H,Lee H S,et al. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses [J]. Plant Physiol Biochem,2009,47:570-577.

[5] 段俊,梁承邨,张明永,等. 水稻结实期间叶片衰老与膜脂过氧化的关系 [J]. 中国水稻科学,1997,11(3):190-192.
Duan J,Liang C Y,Zhang M Y,et al. Relationship between rice leaf senescence and membrane lipid peroxidation during grain growth [J]. Chinese J Rice Sci,1997,11(3):190-192. (in Chinese)

[6] 王空军,胡昌浩,董树亭,等. 我国不同年代玉米品种开花后叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用的演进 [J]. 作物学报,1999,25(6):700-706.
Wang K J,Hu C H,Dong S T,et al. Changes of the protective enzyme activities and lipid per oxidation after anthesis among maize varieties planted in different years [J]. Acta Agron Sin,1999,25(6):700-706. (in Chinese)

[7] Bartels D,Sunkar R. Drought and salt tolerance in plants [J]. Crit Rev Plant Sci,2005,24:23-58.

[8] 温琪汾,王纶,王星玉. 山西省谷子种质资源及抗旱种质的筛选利用 [J]. 山西农业科学,2006,33(4):32-33.
Wen Q F,Wang L,Wang X Y. The foxtail millet germplasm resources and screening and utilization of drought resistance germplasm in Shanxi [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2006,33(4):32-33. (in Chinese)

[9] 颜孙安,钱爱萍,宋永康,等. 晋谷蛋白中氨基酸的含量与营养分析 [J]. 中国农学通报,2009,25(18):113-117.
Yan S A,Qian A P,Song Y K,et al. Content of amino acid in cereal protein and its nutritive evaluation [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(18):113-117. (in Chinese)

[10] 柴世伟,刘文兆,李秧秧. 伤根对谷子叶片光合速率及其产量

的影响 [J]. 西北植物学报,2005,24(13):2215-2220.

Chai S W,Liu W Z,Li Y Y. Root cutting influence on the leaf photosynthetic rate and millet yield [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2005,24(13):2215-2220. (in Chinese)

[11] 冯佰利,高小丽,王长发,等. 干旱条件下不同温型小麦叶片衰老与活性氧代谢特性的研究 [J]. 中国生态农业学报,2005,13(4):74-76.
Feng B L,Gao X L,Wang C F,et al. Leaf senescence and active oxygen metabolism of different-type wheats under drought [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2005,13(4):74-76. (in Chinese)

[12] 李健,赵宇,李锦锦,等. 不同基因型玉米叶片衰老与活性氧代谢的关系及其调控 [J]. 华北农学报,2011,26(1):131-135.
Li J,Zhao Y,Li J J,et al. A study on the relationship between the leaf senescence and activate oxygen metabolism of different maize varieties and their regulation [J]. Acta Agriculture Boreali-Sinica,2011,26(1):131-135. (in Chinese)

[13] 张荣萍,马均,王贺正,等. 不同灌水方式对水稻结实期一些生理性状和产量的影响 [J]. 作物学报,2008,34(3):486-495.
Zhang R P,Ma J,Wang H Z,et al. Effects of different irrigation regimes on some physiology characteristics and grain yield in paddy rice during grain filling [J]. Acta Agron Sin,2008,34(3):486-495. (in Chinese)

[14] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术 [M]. 北京:科学出版社,2002:95-97,197-199.

Chen Y Q. The experimental means and technology of biochemistry [M]. Beijing: Science Press,2002:95-97,197-199. (in Chinese)

[15] 王爱国,罗广华,邵从本,等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究 [J]. 植物生理学报,1983,9(1):77-83.
Wang A G,Luo G H,Shao C B,et al. A study on the superoxide dismutase of soybean seeds [J]. Acta Phytophysiol Sin,1983,9(1):77-83. (in Chinese)

[16] 刘道宏. 植物叶片的衰老 [J]. 植物生理学通讯,1983,2(1):14-19.
Liu D H. Leaf senescence of plant [J]. Plant Physiology Communications,1983,2(1):14-19. (in Chinese)

[17] 姜春明,伊燕杆,刘霞,等. 不同耐热性小麦品种旗叶膜脂过氧化和保护酶活性对花后高温胁迫的响应 [J]. 作物学报,2007,33(1):143-148.
Jiang C M,Yin Y G,Liu X,et al. Response of flag leaf lipid peroxidation and protective enzyme activity of wheat cultivars with different heat tolerance to high temperature stress after anthesis [J]. Acta Agron Sin,2007,33(1):143-148. (in Chinese)

[18] 邵艳军,山仑. 植物耐旱机制研究进展 [J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):16-20.
Shao Y J,Shan L. Advances in the studies on drought tolerance mechanism of plants [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2006,14(4):16-20. (in Chinese)

trials [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(4): 207-210. (in Chinese)

[20] 严威凯. 双标图分析在农作物品种多点试验中的应用 [J]. 作物学报, 2010, 36(11): 1805-1819.

Yan W K. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data [J]. Acta Agron Sin, 2010, 36(11): 1805-1819. (in Chinese)

[21] 严威凯, 盛庆来, 胡跃高, 等. GGE 叠图法: 分析品种 $\times$ 环境互作模式的理想方法 [J]. 作物学报, 2001, 27(1): 21-28.

Yan W K, Sheng Q L, Hu Y G, et al. GGE biplot: An ideal tool for studying genotype by environment interaction of regional yield trial data [J]. Acta Agron Sin, 2001, 27(1): 21-28. (in Chinese)

[22] 张志芬, 付晓峰, 刘俊青, 等. 用 GGE 双标图分析燕麦区域试验品系产量稳定性及试点代表性 [J]. 作物学报, 2010, 36(8): 1377-1385.

Zhang Z F, Fu X F, Liu J Q, et al. Yield stability and testing-site representativeness in national regional trials for oat lines based on GGE-Biplot analysis [J]. Acta Agron Sin, 2010, 36(8): 1377-1385. (in Chinese)

[23] 张志芬, 付晓峰, 刘俊青, 等. 裸燕麦区域试验中地点鉴别力和育成品种稳定性分析 [J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 515-519.

Zhang Z F, Fu X F, Liu J Q, et al. Analysis on site discrimination and yield stability of oat varieties [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(3): 515-519. (in Chinese)

[24] 李琴琴, 高乙萍, 张志芬, 等. 甜荞品种稳定性和试验地点相似性的 GGE 双标图分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 67-70.

Li Q Q, Gao Y P, Zhang Z F, et al. Stability and testing-site similarity for common buckwheat lines based on GGE-Biplot analysis [J]. Agric Res in the Arid Areas, 2013, 31(1): 67-70. (in Chinese)

(上接第 100 页)

[19] 程 量, 林良斌. 作物耐旱性生理生化指标研究进展 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 27-31.

Cheng L, Lin L B. The research progress of physiological and biochemical indexes about drought tolerance in crop [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(3): 27-31. (in Chinese)

[20] 苗雨晨, 白 玲, 苗 琛, 等. 植物谷胱甘肽过氧化物酶研究进展 [J]. 植物学通报, 2005, 22(3): 350-356.

Miao Y C, Bai L, Miao C, et al. Progress in plant glutathione peroxidase [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2005, 22(3): 350-356. (in Chinese)

[21] 戴惠萍, 冯佰利, 高金锋, 等. 糜子叶片衰老与活性氧代谢研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 217-220.

Dai H P, Feng B L, Gao J F, et al. Senescence and activate oxygen metabolism of leaf in *Panicum miliaceum* L. [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 217-220. (in Chinese)

[22] 宋 慧, 冯佰利, 高小丽, 等. 不同小豆品种(系)叶片衰老与活性氧代谢 [J]. 作物学报, 2010, 36(2): 347-353.

Song H, Feng B L, Gao X L, et al. Leaf senescence and reactive oxygen metabolism in different adzuki bean cultivars (lines) [J]. Acta Agron Sin, 2010, 36(2): 347-353. (in Chinese)

[23] Hodgson R A J, Raison J K. Lipid peroxidation and superoxide dismutase activity in relation to photoinhibition induced by chilling in moderate light [J]. Planta, 1991, 185: 215-219.