

大麦钾高效基因型钾吸收和生理生化特性研究

吴金涛, 张锡洲*, 李廷轩, 余海英

(四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014)

摘要: 盆栽试验研究了大麦钾高效基因型的吸钾特性和生理生化特性。结果表明,在不同供钾水平下,大麦钾高效基因型(Sandime)含钾量均小于低效基因型(AC Westech);但生物量显著大于低效基因型,在苗期和分蘖期,两基因型生物量最大差异分别为2.4和2.1倍。大麦钾高效基因型(Sandime)根系活力小于低效基因型(AC Westech),并随供钾水平的提高,其变化趋势不及低效基因型明显。两基因型叶绿素含量在正常供钾水平下达最大值,且高效基因型含量大于低效基因型;钾高效基因型的SOD活性大于低效基因型,基因型差异在苗期最大为2.74倍,分蘖期最大为3.26倍;而POD活性则为高效基因型小于低效基因型,基因型差异在苗期为2.94~4.98倍,分蘖期为2.12~2.76倍,在各供钾水平下均达显著差异水平。高效基因型的MDA和可溶性糖含量小于低效基因型,并随供钾水平的提高逐渐减少。

关键词: 大麦; 钾; 基因型; 生理生化; 差异

中图分类号: S512.3.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)04-0906-07

Study on K absorption and its physiological and biochemical characteristics of K-efficient barley genotype

WU Jin-tao, ZHANG Xi-zhou*, LI Ting-xuan, YU Hai-ying

(College of Resources and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: The experiments of soil culture with different potassium (K) levels were carried out to study K absorption and its physiological and biochemical characteristics of K-efficient barley genotype. The results show that K content of the K-efficient barley genotype (Sandime) is lower than that of the K-inefficient genotype (AC Westech) under the K levels, while biomass of the K-efficient barley genotype is significantly higher than that of the AC Westech ($p < 0.05$). At seedling and tillering stages, the biggest differences in biomass of these two genotypes are 2.4 times and 2.1 times respectively. Root vigor of the K-efficient barley genotype is lower than that of the AC Westech. The chlorophyll contents of the two genotypes reach their maximums when the K is offered normally, and the chlorophyll content of the K-efficient genotype is higher than that of the K-inefficient genotype. SOD activity of the K-efficient genotype is higher than that of the K-inefficient genotype, and the biggest difference is 2.74 times at seedling stage, and 3.26 times at tillering stage. However, POD activity of the K-efficient barley genotype is lower than that of the K-inefficient genotype, and the biggest difference is 2.94-4.98 times at seedling stage and 2.12-2.76 times at tillering stage. MDA and soluble sugar contents of the K-efficient genotype are lower than those of the K-inefficient genotype at the two stages.

Key words: barley; genotype; potassium; physiological and biochemical characteristics

收稿日期: 2009-09-21 接受日期: 2010-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(40901138); 四川省青年基金(06ZQ026-020); 四川省教育厅重点项目(07ZA059); 四川省教育厅青年基金(07ZB063)资助。

作者简介: 吴金涛(1983—),女,四川蒲江人,硕士研究生,主要从事植物钾素营养方面的研究。E-mail: pjcherry@163.com

* 通讯作者 Tel: 0835-2885862, E-mail: zhangxzhou@163.com

自 1866 年 Bimer 和 Lucanus 最先提出钾是高等植物生长所必需的营养元素以来,钾素研究取得了很大进展。钾是作物生长发育所需的大量元素之一,土壤中供应不足,将会严重影响作物产量和品质^[1],近年来土壤缺钾问题在我国大麦生产区越来越严重^[2]。对土壤中的缺钾问题,传统的解决方法是大量施用钾肥,但是,目前我国钾肥资源严重缺乏,供需矛盾日益突出。因此,筛选钾高效的大麦种质资源,进行大麦钾营养性状遗传改良,是缓解大麦对钾需求的有效途径之一。钾营养性状遗传改良的基础在于获得钾营养高效的种质资源,但需弄清钾高效基因型适应低钾环境的生理生化机制^[3]。有关作物钾营养效率的生理生化特性研究已有大量报道,主要集中在水稻、小麦、棉花等作物上^[4-9]。Mengel^[10]的研究表明,由于黑麦草的根系发达、活力大、阳离子交换量高,因此能在低钾环境下正常生长。籽粒苋生物量大,含钾量高,钾富集能力强,可能也与其根系形态学和生理学特性及钾离子吸收动力学过程有关^[11]。此外,大量的研究表明,植物体内钾素的缺乏会引起细胞内活性氧产生与清除之间的平衡遭到破坏,积累起来的活性氧就会对细胞产生伤害^[12-13]。所以,植株体内的抗氧化酶活性的增强以及对活性氧的清除能力,对植株适应低钾环境有重要作用。但关于大麦的相关研究鲜见报道。为此,本研究在土培条件下,选取大麦钾高效基因型和钾低效基因型,设定不同的施钾水平,研究大麦对钾的吸收利用特性以及与钾素有关的生理生化特性,以期为进一步开展大麦钾效率营养性状的遗传改良研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽用土壤为青衣江河流冲积物发育而来的潮土,采自四川省雅安市雨城区大兴镇。其基本理化性质为:有机质 14.74 g/kg、全氮 1.29 g/kg、全磷 1.41 g/kg、全钾 2.90 g/kg、速效氮 30.42 mg/kg、速效磷 18.02 mg/kg、速效钾 20.63 mg/kg、pH 7.23。

供试品种为 Sandrime(大麦钾高效基因型)和 AC Westech(大麦钾低效基因型),均为六棱皮大麦,由四川农业大学小麦研究所提供。

试验设 4 个钾(K₂O)水平:不施钾(K₀)、低钾(60 mg/kg, K₁)、正常供钾(120 mg/kg, K₂)和高钾(240 mg/kg, K₃),每个处理 4 次重复,随机排列。采用规格为 19 cm × 19 cm × 29 cm 的塑料盆进行试

验,每盆装潮土 15kg。按 N 180 mg/kg、P₂O₅ 90 mg/kg 分别施用尿素、磷酸二氢铵,其中 70% 尿素和全部磷酸二氢铵作为基肥施入,30% 尿素在拔节期作为追肥施入。所用尿素含 N 46.7%、磷酸二氢铵含 P₂O₅ 61.0%、N 11.8%、硫酸钾含 K₂O 50.0%。其中尿素为市场购买,磷酸二氢铵和硫酸钾为分析纯试剂。试验在有防雨设施的网室中进行,采用自然光照。2008 年 11 月 11 日播种,种子用 50% 多菌灵喷洒并堆闷 6 h,阴干后每盆均匀播种 12 粒,苗期定苗 10 株,常规管理。

1.2 样品采集与测定

分别于苗期(播后 54 d)和分蘖期(播后 92 d)采样,每个处理采 3 次重复,将土和植株全部倒出,以免破坏植株完整根系。所有植株用自来水冲洗干净,蒸馏水润洗,吸水纸擦干,每个重复中的 4 株植株装入纸袋,于 105℃ 下杀青 30min,再将温度降至 75℃ 烘干至恒重称量并粉碎过 2 mm 筛,测定植株含钾量;剩余 6 株植株取根尖 1 cm 测定根系活力,将所有叶片剪碎、混匀测定生理生化指标。

土壤基本理化性质按常规方法测定;植株含钾量采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,火焰光度计法测定^[14];根系活力采用 TTC 法测定^[15];叶绿素含量采用乙醇-丙酮混合液直接浸提法测定^[16];SOD 采用氮蓝四唑比色法测定;POD 采用愈创木酚法测定^[17];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[18]。

数据均为 4 次重复平均值,采用 DPS(v 6.55)软件中 LSD 法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 大麦钾高效基因型钾吸收利用特性

2.1.1 含钾量差异 由图 1 可知,在苗期和分蘖期,大麦钾高效基因型 Sandrime 含钾量均小于低效基因型 AC Westech。在苗期,不施钾处理两基因型含钾量差异达显著水平,低效基因型含钾量比高效基因型高 14%;而在施钾条件下均无显著差异。分蘖期则相反,高效基因型含钾量在施钾条件下均显著小于低效基因型,以正常供钾水平(K₂)下基因型差异最大,低效基因型比高效基因型高 25%;而不施钾处理则无显著差异。显著性分析表明,两基因型含钾量均随施钾水平的提高而显著增大。

2.1.2 生物量差异 各供钾水平下,大麦钾高效基因型 Sandrime 生物量均大于低效基因型 AC Westech(图 2)。苗期随供钾水平的提高,两基因型生物量差异逐渐减小,在不施钾(K₀)、低钾(K₁)和正常

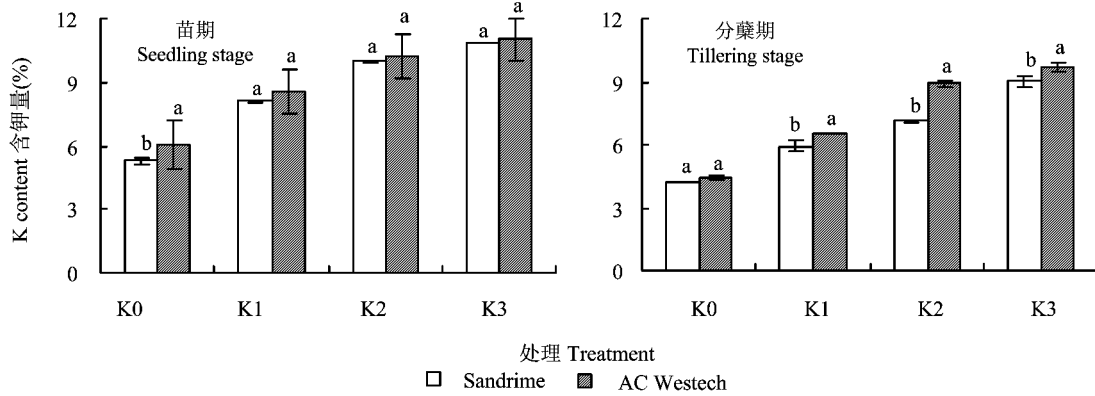


图 1 不同供钾水平下大麦含钾量的基因型差异

Fig. 1 Difference in K content of barley genotypes under different K treatments

[注 (Note): 方柱上不同字母表示相同钾水平下不同基因型间差异达 5% 显著水平

Different letters above bars indicate significant at 5% levels among different genotypes under the same K level.]

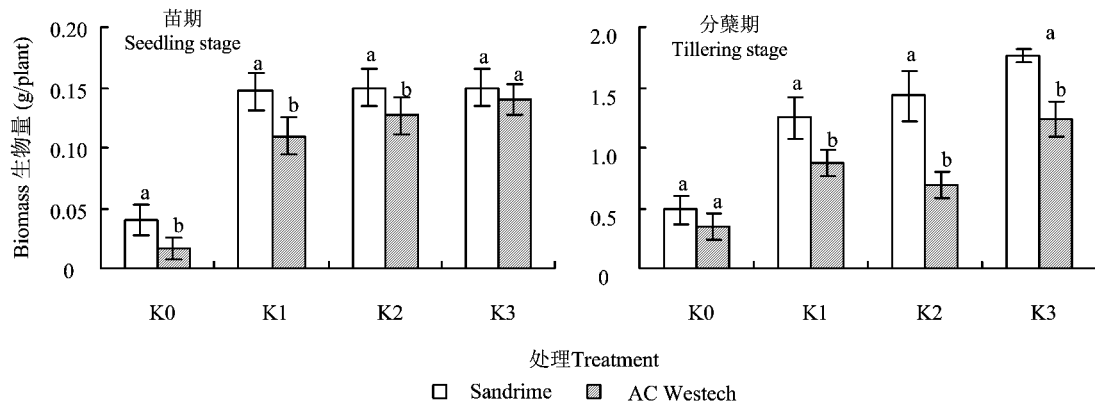


图 2 不同供钾水平下大麦生物量的基因型差异

Fig. 2 Difference in biomass of barley genotypes under different K treatments

[注 (Note): 方柱上不同字母表示相同钾水平下不同基因型间差异达 5% 显著水平

Different letters above bars indicate significant at 5% levels among different genotypes under the same K level.]

供钾 (K2) 水平下分别为 2.40、1.33 和 1.18 倍, 均达显著水平; 分蘖期则在 K1、K2 和 K3 水平下, 两基因型差异达显著水平, 高效基因型分别是低效基因型的 1.43、2.06 和 1.42 倍。显著性检验表明, 苗期随供钾水平的提高, 两基因型生物量在施钾条件下均显著大于不施钾水平; 在分蘖期, 高效基因型也呈现逐渐增大的趋势, 而低效基因型生物量在分蘖期则表现为在正常供钾水平下反而小于低钾水平, 表明供钾水平的提高对大麦钾高效基因型生物量有稳定的增产作用, 而对钾低效基因型生物量的增产作用则因生育期而异。

2.2 大麦钾高效基因型生理生化特性

2.2.1 根系活力差异 在各供钾水平下, 大麦钾高效基因型 Sandrime 根系活力均小于低效基因型 AC Westtech (表 1)。苗期低效基因型的根系活力在 K1、K2 和 K3 水平下分别为高效基因型的 1.99、1.43 和

1.36 倍, 均达显著水平; 分蘖期则在 K0、K1 和 K3 水平下, 两基因型差异达显著水平, 低效基因型分别是高效基因型的 1.62、1.17 和 1.53 倍。供钾水平对两基因型的根系活力均有影响, 但钾低效基因型的变化趋势更明显。在苗期, 低效基因型根系活力在 K1 水平下均显著大于其它供钾水平, 比 K0 迅速增加了 79%, 在 K2 水平下又急剧降低 41%; 在分蘖期, 低效基因型根系活力随供钾水平的提高显著减小, 其中 K1 水平下根系活力比 K0 时急剧降低 62%; 而高效基因型根系活力在两个时期整体表现为随供钾水平的提高没有显著变化, 并与供钾水平呈显著的负相关关系 (苗期 $r = -0.9159^*$; 分蘖期 $r = -0.9528^*$), 变化较缓慢。说明大麦钾低效基因型的根系活力更易受供钾水平的影响, 对土壤中的钾含量更敏感; 而钾高效基因型无论在何种钾素水平下, 均能保持相对稳定的根系活力, 受土壤中钾含量的影响较小。

表 1 不同供钾水平下大麦根系活力的基因型差异[$\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,FW]

Table 1 Difference in root vigor of barley genotypes under different K treatments

基因型 Genotype	苗期 Seedling stage				分蘖期 Tillering stage			
	K0	K1	K2	K3	K0	K1	K2	K3
Sandrime	119.05 aA	121.52 bA	99.94 bAB	91.44 bB	164.24 bA	163.64 bA	106.73 aAB	72.60 bB
AC Westech	134.94 aB	242.06 aA	143.29 aB	124.36 aB	265.73 aA	191.30 bB	130.06 aC	110.81 aC

注(Note): 数值后不同小写字母表示同一时期、同一供钾水平不同基因型差异达 5% 显著水平; 数值后不同大写字母表示同一基因型在同一时期、不同供钾水平差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean genotypic difference significant at 5% level at the same stage under the same K level; and the different capital letters mean significant at 5% level of the different K level at the same stage for the same genotype.

2.2.2 叶绿素含量差异 表 2 看出,叶绿素 a 和叶绿素 b 在各供钾水平下都表现为大麦钾高效基因型 Sandrime 大于钾低效基因型 AC Westech,并随土壤中钾浓度的增加而增加。当供钾水平正常时,两基因型叶绿素含量均达到最大值,之后呈下降趋势。随生育期的推进,两基因型的叶绿素 a 含量在 K1 和 K2 水平下降低,叶绿素 b 含量在各供钾水平下均增大。在苗期,叶绿素 a 含量的基因型差异在各供钾水平下均达到显著水平,叶绿素 b 仅在 K3 水平下达显著差异;在分蘖期,叶绿素 a 的基因型差异在 K2 和 K3 水平下达显著水平,而叶绿素 b 的基因型差异在任何供钾水平下均未达到显著水平。随供钾水平的提高,苗期,高效基因型叶绿素 a 和叶绿

素 b 含量在 K2 水平下均显著大于其它供钾水平;而低效基因型 K1 和 K2 间没有达显著差异,但显著大于 K0 和 K3;分蘖期两基因型叶绿素含量则并没有在各供钾水平之间达显著差异。

表 2 还表明,在正常供钾水平下,高效基因型叶绿素 a 在总叶绿素含量中所占的比例大于低效基因型。苗期,高效基因型的叶绿素 a/叶绿素 b 比值为 3.20,而低效基因型为 2.75;分蘖期有所降低,分别为 2.41 和 2.22。叶绿素 a 被称为天线色素,在光合作用中起到捕获光能的作用,钾高效基因型叶绿素 a/叶绿素 b 比低效基因型大,说明高效基因型更容易捕获光能,这对于维持正常的光合速率是非常重要的^[19]。

表 2 不同供钾水平下大麦叶绿素含量的基因型差异(mg/g ,FW)

Table 2 Difference in chlorophyll content of barley genotypes under different K treatments

基因型 Genotype	叶绿素 a Chl. a				叶绿素 b Chl. b			
	K0	K1	K2	K3	K0	K1	K2	K3
苗期 Seedling stage								
Sandrime	1.02 aD	1.24 aB	1.31 aA	1.17 aC	0.36 aC	0.39 aB	0.41 aA	0.38 aB
AC Westech	0.92 bB	1.06 bA	1.10 bA	0.97 bB	0.35 aB	0.38 aA	0.40 aA	0.32 bC
分蘖期 Tillering stage								
Sandrime	1.09 aC	1.13 aBC	1.30 aA	1.26 aAB	0.49 aA	0.52 aA	0.54 aA	0.53 aA
AC Westech	0.95 aB	1.03 aAB	1.03 bA	1.01 bAB	0.41 aB	0.47 aAB	0.51 aA	0.44 aB

注(Note): 数值后不同小写字母表示同一时期、同一供钾水平不同基因型差异达 5% 显著水平; 数值后不同大写字母表示同一基因型在同一时期、不同供钾水平差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean genotypic difference significant at 5% level at the same stage under the same K level; and the different capital letters mean significant at 5% level of the different K level at the same stage for the same genotype.

2.2.3 SOD、POD 活性变化 表 3 可知,两基因型 SOD 活性均随供钾水平的提高呈低—高一低的倒“V”字型曲线,且钾高效基因型 Sandrime 大于钾低效基因型 AC Westech,均在正常供钾水平下达最大值。供钾水平的提高对低效基因型影响较大,在分蘖期表现最明显。在低钾水平下,SOD 活性显著大于不施钾水平,迅速增强为不施钾水平下的 3.24 倍;在高钾水平时又急剧降低为正常供钾时的 35%。同一生育期,两基因型 SOD 在 K0 和 K3 水平下达显著差异。在苗期,高效基因型 SOD 活性最大是低效基因型的 2.74

倍,分蘖期最大为 3.26 倍,表明在钾胁迫下,高效基因型对抵抗钾胁迫环境表现出明显的优势,其体内 SOD 清除超氧自由基的功能明显强于低效基因型,保护植株免受毒害。与苗期相比,两基因型 SOD 活性在分蘖期均降低,这是由于酶的活性有一个阈值,SOD 对细胞的保护作用将随时间的延长而逐渐降低,活性氧的产生与清除之间的平衡势必遭到破坏^[20]。但是低效基因型随生育期的推进,其 SOD 活性降低的幅度更大,在不施钾和高钾水平下最明显,分别减少为苗期的 46% 和 47%。

表 3 不同供钾水平下大麦苗期叶片 SOD 和 POD 活性的差异 (U/mg, pro)
Table 3 Differences in SOD and POD activity of barley genotypes under different K treatments

基因型 Genotype	SOD				POD			
	K0	K1	K2	K3	K0	K1	K2	K3
苗期 Seedling stage								
Sandrime	43.73 aB	57.17 aB	80.25 aA	60.08 aA	259.63 bB	310.44 bAB	364.69 bAB	347.80 bA
AC Westech	15.94 bC	36.41 aB	64.64 aA	23.92 bBC	1111.12 aAB	1114.77 aA	1156.52 aAB	1022.81 aB
分蘖期 Tillering stage								
Sandrime	23.78 aB	31.18 aA	37.89 aA	30.38 aAB	282.71 bB	343.92 bAB	408.79 bA	398.99 bA
AC Westech	7.30 bC	23.67 aB	34.78 aA	11.14 bC	780.66 aB	847.53 aA	935.93 aA	846.79 aAB

注 (Note): 数值后不同小写字母表示同一时期、同一供钾水平不同基因型差异达 5% 显著水平; 数值后不同大写字母表示同一基因型在同一时期、不同供钾水平差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean genotypic difference significant at 5% level at the same stage under the same K level; and the different capital letters mean significant at 5% level of the different K level at the same stage for the same genotype.

表 3 还看出, 钾高效基因型 POD 活性在分蘖期大于苗期, 而低效基因型则表现相反, 在分蘖期均降低。表明随生育期的推进, 高效基因型对胁迫环境表现出了较强的适应性, POD 发挥的潜力大于低效基因型, 生育后期有较强的优势。但是在各供钾水平下, 钾高效基因型 POD 均小于钾低效基因型, 这与一些研究结果不同, 其原因还有待进一步研究。POD 的基因型差异在苗期为 2.94~4.98 倍, 分蘖期略有减小, 为 2.12~2.76 倍, 均达显著水平。

2.2.4 MDA、可溶性糖含量变化 在相同的供钾水平下, 大麦钾高效基因型 Sandrime MDA 含量小于钾低效基因型 AC Westech, 说明高效基因型所受的环境胁迫的影响较小 (图 3)。从苗期到分蘖

期, 两基因型 MDA 含量急剧增大, 即随生育期的推进, 植株体内膜脂过氧化作用逐渐增强, 而可溶性糖含量略有降低。显著性检验表明, 在同一生育期, 随供钾水平的提高, 两基因型的 MDA 和可溶性糖含量都显著降低。表明施钾可缓解植株体内膜脂过氧化作用, 并促进可溶性糖的转化, 降低体内的积累量, 维持植株正常的生理代谢。苗期, 两基因型 MDA 含量在 K0 和 K2 水平时, 差异显著, 达 1.26 和 1.18 倍; 而分蘖期没有达到显著水平。可溶性糖含量在苗期的 K1 和 K2 水平下差异达显著水平, 为 1.23 和 1.36 倍; 而分蘖期仅在 K3 水平达到显著差异, 钾低效基因型为高效基因型的 1.13 倍。

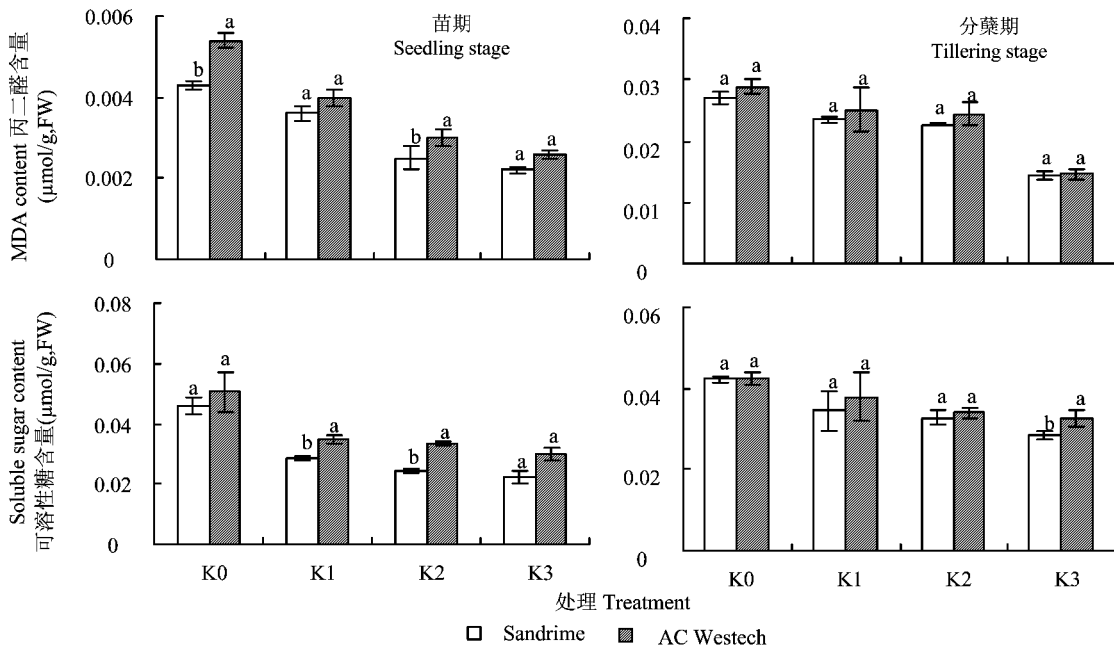


图 3 不同供钾水平下大麦 MDA 和可溶性糖含量的基因型差异

Fig. 3 Differences in soluble sugar and MDA contents of barley genotypes under different K treatments

[注 (Note): 方柱上不同字母表示相同钾水平下不同基因型间差异达 5% 显著水平

Different letters above bars indicate significant at 5% levels among different genotypes under the same K level.]

3 讨论

3.1 大麦钾高效基因型钾吸收特性

不同钾效率基因型作物,最直观的表现就是其生物量的大小^[21]。本试验供试土壤速效钾为 20.63mg/kg,属于严重缺钾土壤。随供钾水平的提高,高效基因型 Sandrime 生物量显著增大;而低效基因型 AC Westech 在分蘖期呈不稳定的变化趋势,表明高效基因型既能耐缺钾胁迫,又具有适钾条件下较大的增长潜力。姜存仓等^[3]研究表明,在钾胁迫条件下,棉花钾高效基因型长势较好,单株干物重最大,而钾含量却比钾低效基因型低。本试验结果也表明,高效基因型植株体内的含钾量小于低效基因型,这可能与高效基因型生物量较大而造成的“稀释效应”有关;也可能是因为钾高效基因型体内细胞进行各种生理活动的需钾量较低,或对钾素的再利用能力较强,能充分利用自身所吸收的有限的钾素生产较多的干物质^[22]。

3.2 大麦钾高效基因型生理生化特性

根系活力对整个植株的生命活力有着重要的影响,根系还原力是根系活力的重要体现^[11,13,23]。本研究看出,在各供钾水平下,大麦钾高效基因型 Sandrime 根系活力均小于钾低效基因型 AC Westech,这与大多数的研究结果略有不同。李廷轩等^[11]研究认为,在相同供钾条件下,籽粒苋富钾基因型的根系活力始终高于一般基因型,这种差异在低钾条件下比在高钾条件下表现得更明显。本试验中,两基因型的根系活力均在低钾或不施钾水平下达最大值,表明低钾胁迫能促使植株根系活力的增强;但是钾低效基因型的变化趋势更明显,对钾水平更敏感。

一般认为,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)是植物体内保护系统组成的重要成分,能消除植物在各种代谢中产生的有害物质,清除产生的自由基,抑制膜脂过氧化作用^[3]。钾供应不足会抑制植物叶片中抗氧化酶的活性^[24-25]。本研究表明,大麦 SOD 表现为钾高效基因型 Sandrime 大于钾低效基因型 AC Westech,且高效基因型 SOD 受供钾水平的影响较小,增大或减小的趋势都较低效基因型缓慢,表明高效基因型 SOD 较低效基因型稳定;并且 SOD 活性在分蘖期小于苗期,这与宋美珍等^[23]对棉花的研究结果不同,可能因作物不同而对钾的反应不同。钾高效基因型 POD 活性显著小于钾低效基因型,这与前人的研究也有出入,可能与大麦体内清除氧自由基的机制有关,具体原因还有待进一步研究。

钾高效基因型 Sandrime 叶绿素 a/叶绿素 b 比值大于钾低效基因型 AC Westech,这是钾高效基因型能维持正常光合速率的主要原因,与王伟等^[19]对大豆的研究结果一致。大麦钾高效基因型 MDA 和可溶性糖含量均小于钾低效基因型,且随供钾水平的提高逐渐降低。因为植物在胁迫环境下,体内 MDA 和可溶性糖含量会发生相应的变化,这是作物在逆境条件下的一种生理反应^[26-27]。但 MDA 含量在降低的过程中,高效基因型降低的幅度更大,说明随供钾水平的提高更易使高效基因型的膜脂过氧化作用得到缓解,使植株能够较大程度地免受逆境环境所带来的危害。由于钾高效基因型植株对钾利用能力较强,体内的代谢活动也相对较强,从而促进植株体内可溶性糖向蛋白质和淀粉转化^[9,28-30],因此大麦钾高效基因型体内可溶性蛋白含量始终比低效基因型低。

参考文献:

- [1] 郭英,孙学振,宋宪亮,等. 钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(3): 363-368.
Guo Y, Sun X Z, Song X L *et al.* Effects of potassium nutrition on growth and leaf physiological characteristics at seedling stage of cotton[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006,12(3): 363-368.
- [2] 尹金来,周春霖,卞同祥. 国内大麦营养与施肥研究近况[J]. 大麦科学,1999,44(3): 1-3.
Yin J L, Zhou C L, Bian T X. Recent development of the research on barley nutrition and fertilization [J]. *Barley Sci.*, 1999, 44(3): 1-3.
- [3] 姜存仓,高祥照,王运华,等. 不同基因型棉花苗期钾效率差异及其机制的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(6): 781-786.
Jiang C C, Gao X Z, Wang Y H *et al.* Potassium efficiency of various cotton genotypes and its nutritional mechanisms [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005,11(6): 781-786.
- [4] George M S, Lu G Q, Zhou W J. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *Field Crops Res.*, 2002,77(1): 7-15.
- [5] Yang X E, Liu J X, Wang W M *et al.* Genotypic differences and some associated plant traits in potassium internal use efficiency of lowland rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2003,67: 273-282.
- [6] 吕世华,邱古彬,张福锁. 耐低钾小麦品种筛选及其吸钾特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报,1996,2(4): 337-342.
Lü S H, Qiu G B, Zhang F S. Screening of wheat varieties with low potassium endurance and study on their potassium uptake characteristics [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1996,2(4): 337-342.
- [7] Brouder S M, Cassman K G. Root development of two cotton cultivars in relation to potassium uptake and plant growth in a vermiculite soil [J]. *Field Crops Res.*, 1990,23: 187-203.

- [8] Dessougi H E, Claassen N, Steingrobe B. Potassium efficiency mechanisms of wheat, barley, and sugar beet grown on a K fixing soil under controlled conditions[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2002,165: 732-737.
- [9] 马新明,王小纯,丁军. 钾肥对砂姜黑土不同粒型冬小麦穗粒发育及生理特性的影响[J]. 中国农业科学,2000,33(3): 67-72.
Ma X M, Wang X C, Ding J. Effects of potassium on spike and grain development and physiological characteristics for different grain type of winter wheat in shajiang black soil[J]. Sci. Agric. Sin.,2000,33(3): 67-72.
- [10] Mengel K. Response of various crop species and cultivars to fertilizer application[J]. Plant Soil,1983,72: 305-319.
- [11] 李廷轩,马国瑞. 籽粒苋富钾基因型的根系形态和生理特性[J]. 作物学报,2004,30(11): 1145-1151.
Li T X, Ma G R. Physiological and morphological characteristics of roots in grain amaranth genotypes enrichment in potassium[J]. Acta Agron. Sin.,2004,30(11): 1145-1151.
- [12] 项虹艳,丁洪,郑金贵,李卫华. 低钾胁迫对水稻部分生理生化特性的影响[J]. 仲恺农业技术学院学报,2004,17(3): 12-18.
Xiang H Y, Ding H, Zheng J G, Li W H. Effects of low potassium stress on some physiological biochemical characteristics of rice [J]. J. Zhongkai Agrotech. Coll.,2004,17(3): 12-18.
- [13] Mehlhorn H, Wenzel A. Manganese deficiency enhances ozone toxicity in bush beans(*Phaseolus vulgaris* L. cv. saxa) [J]. J. Plant Physiol.,1996,148: 155-159.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社,2000,193-195.
Lu R K. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press,2000,193-195.
- [15] 王空军,董树亭,胡昌浩,等. 我国玉米品种更替过程中根系生理特性的演进. I. 根系活性与 ATPase 活性的变化[J]. 作物学报,2002,28(2): 185-189.
Wang K J, Dong S T, Hu C H *et al.* The evolution of physiological characteristics of maize root during varieties replacing in China. I. Changes of root vigor & ATPase activity[J]. Acta Agron. Sin.,2002,28(2): 185-189.
- [16] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoid pigments of photosynthesis biomembranes[M]. New York: Academic Press, 1987.
- [17] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves[J]. Plant Physiol.,1992,98: 1222-1227.
- [18] El-Moshaty, F I B, Pike S M, Novacky A J *et al.* Lipid peroxidation and superoxide production in cowpea(*Vigna unguiculata*) leaves infected with tobacco rings pot virus or southern bean mosaic virus [J]. Physiol. Mol. Plant Pathol., 1993, 43: 109-119.
- [19] 王伟,李兴涛,蔡左莹,等. 低钾胁迫对不同效应型大豆光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 大豆科学,2008,27(3): 451-455.
Wang W, Li X T, Zuan Z Y *et al.* Effect of low potassium stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of two soybean varieties with different K-efficiency [J]. Soyb. Sci., 2008,27(3): 451-455.
- [20] 王伟,曹敏建,王晓光,李植. 低钾胁迫对不同钾营养效应型大豆保护酶系统的影响[J]. 大豆科学,2005,24(2): 101-105
Wang W, Cao M J, Wang X G, Li Z. Effects of low potassium stress on protective systems of different K-Nutrient effective soybean varieties[J]. Soyb. Sci.,2005,24(2): 101-105.
- [21] 田晓莉,王刚卫,朱睿,等. 棉花耐低钾基因型筛选条件和指标的研究[J]. 作物学报,2008,34(8): 1435-1443.
Tian X L, Wang G W, Zhu R *et al.* Conditions and indicators for screening cotton(*Gossypium hirsutum*) genotypes tolerant to low-potassium[J]. Acta Agron. Sin.,2008,34(8): 1435-1443.
- [22] 王晓光,曹敏建,于海秋,等. 不同基因型大豆吸收利用钾素的差异分析[J]. 沈阳农业大学学报,2008,39(5): 520-524.
Wang X G, Cao M J, Yu H Q *et al.* Difference of potassium uptake and use efficiency between different genotypic soybeans[J]. J. Shenyang Agric. Univ.,2008,39(5): 520-524.
- [23] 徐国华,鲍士旦,杨建平,吴明. 不同作物的吸钾能力及其与根系参数的关系[J]. 南京农业大学学报,1995,18(1): 49-52.
Xu G H, Bao S D, Yang J P, Wu M. The relationship between potassium absorption and root parameters of different crops [J]. J. Nanjing Agric. Univ.,1995,18(1): 49-52.
- [24] 鲁剑巍,陈芳,刘冬碧,等. 钾素水平对油菜酶活性的影响[J]. 中国油料作物学报,2002,24(1): 61-62.
Lu J W, Chen F, Liu D B *et al.* Effect of potash application on some enzyme content in rapeseed leaf [J]. Chin J. Oil Crop Sci.,2002,24(1): 61-62.
- [25] 宋美珍,毛树春,杨惠元. 钾对棉花叶片干物质消长及生理活性的影响[J]. 河南农业大学学报,1996,30(2): 191-194.
Song M Z, Mao S C, Yang H Y. Effect of potassium on dry matter in cotton and physiological activity [J]. Acta Agric. Univ. Henanensis,1996,30(2): 191-194.
- [26] 李廷轩,马国瑞. 籽粒苋富钾基因型的生理生化基础研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(4): 380-385.
Li T X, Ma G R. Study on the physiological and biochemical characters of grain amaranth genotype with rich-potassium [J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2004,10(4): 380-385.
- [27] Angbinoni I, Baligar V C, Barber S A. Growth and uptake rates of P, K, Ca and Mg in wheat[J]. Plant Nutr.,1981,3: 923-933.
- [28] Bednarz C W, Oosterhuis D M, Evans R D. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency[J]. Environ. Exp. Bot.,1998,39: 131-139.
- [29] Zhao D, Oosterhuis D M, Bednarz C. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants [J]. Photosynthetica.,2001,39: 103-109.
- [30] Pettigrew W. Potassium deficiency increases specific leaf weights and leaf glucose levels in field-grown cotton [J]. Agron. J., 1999,91: 962-968.