

低磷胁迫对小麦代换系可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响及染色体效应

郑金凤¹, 白志英², 李存东³, 米少艳², 刘永霞¹

(1. 河北省科技工程学校 河北 保定 071000; 2. 河北农业大学 生命科学院 河北 保定 071001; 3. 河北农业大学 农学院 河北 保定 071001)

摘要: 以中国春-Synthetic 6x 染色体代换系及其亲本为材料, 通过测定不同磷处理条件下孕穗期、开花期、灌浆期旗叶的可溶性糖和可溶性蛋白含量, 研究低磷胁迫对相关生理性状的影响, 并对控制可溶性糖和可溶性蛋白含量的相关基因进行染色体定位。结果表明, 低磷胁迫下, 中国春-Synthetic 6x 染色体代换系及其亲本的可溶性糖和可溶性蛋白含量在测定的各生育时期中明显低于对照; Synthetic 6x 的 2A、3A、5B、7D 染色体上可能存在促进可溶性糖含量增加的基因; 3A 染色体上可能存在诱导可溶性蛋白含量增加的基因。

关键词: 小麦代换系; 低磷胁迫; 可溶性糖含量; 可溶性蛋白含量; 染色体效应

中图分类号: S512.01 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2013)01-0027-05

The Effect of Phosphorus Deficiency Stress on Soluble Sugar Content and Soluble Protein Content and Chromosome of Wheat Substitution Lines

ZHENG Jin-feng¹, BAI Zhi-ying², LI Cun-dong³, MI Shao-yan², LIU Yong-xia¹

(1. Hebei Science and Technology School of Engineering, Baoding 071000, China; 2. College of Life Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: Wheat substitution lines between Chinese Spring and Synthetic 6x under the treatments of phosphorus deficiency stress and phosphorus normal (control) in different developing stages were studied to research the effect of phosphorus deficiency stress on soluble sugar content and soluble protein content and locate the gene controlling soluble sugar content and soluble protein content. The results showed that soluble sugar content and soluble protein content reduced under phosphorus deficiency stress in different developing stages; The genes promoting soluble sugar content might be located on 2A, 3A, 5B, 7D chromosome of Synthetic 6x, and that the genes promoting soluble protein content might be located on 3A chromosome.

Key words: Substitution lines; P-deficiency; Soluble sugar content; Soluble protein content; Chromosome effect

磷是植物生长中必需的营养元素之一, 是植物重要的组成成分。磷以多种方式参与植物体内的生理过程, 对作物生长发育、生理代谢、产量与品质都起着重要的作用^[1]。磷作为限制植物生长的障碍因子越来越受到人们的重视^[2-6]。通过调节可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质的含量可提高植物的耐低磷性。前人关于低磷对叶片中可溶性糖代谢的影响, 一般认为低磷导致淀粉合成增加、蔗糖量减少^[7-13], 逆境胁迫可引起植物基因表达的变化, 使

某些正常蛋白质合成受阻, 逆境蛋白被诱导合成, 从而使植物在代谢和结构上发生调整, 增强抵御不良环境的能力^[3]。小麦代换系是遗传研究和育种的宝贵资源, 开发利用小麦代换系对小麦育种具有重要意义。中国春-Synthetic 6x 代换系是将供体品种 Synthetic 6x 的 21 条染色体导入受体品种中国春所产生的, 父本 Synthetic 6x 与母本中国春存在较大的遗传差异, 蕴含着丰富的抗性基因, 具有极其丰富的遗传多样性, 在小麦遗传改良中具有良好的利用价

收稿日期: 2012-12-01

基金项目: “973”计划前期研究专项(2007CB116209); 河北省自然科学基金项目(C2008000341; C2011204016)

作者简介: 郑金凤(1982-), 女, 河北新河人, 硕士, 主要从事植物资源开发与利用研究。

通讯作者: 白志英(1969-), 女, 河北正定人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事植物资源开发与利用研究。

李存东(1964-), 男, 河北清河人, 教授, 博士, 主要从事作物生理生态研究。

值^[14]。白志英等^[15-18]、郑金凤等^[19-21]利用此材料研究了逆境胁迫对其蛋白质含量、生理生化及产量性状等的影响及染色体效应,有关低磷胁迫对小麦代换系可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响未见报道。本试验以中国春-Synthetic 6x 21 个染色体代换系及其亲本为材料,研究低磷胁迫下小麦代换系可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响及染色体效应,为小麦的遗传研究提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

采用中国春-Synthetic 6x 21 个染色体代换系及其亲本(由 John Innes Centre、Norwich Research Park、Colney、Norwich NR4 7UH, U K 提供)为材料。21 个代换系分别为 1A-7A、1B-7B、1D-7D,父本为

表 1 供试土壤的理化性质

Tab. 1 The physical and chemical properties of the test soil

有机质/% Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	速效钾/(mg/kg) Available potassium	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus
3	1.25	46.97	196.93	5.6

于孕穗期、开花期、灌浆期在各小区分别选取正常施磷(对照)和低磷处理下长势均匀的小麦旗叶,对其可溶性糖和可溶性蛋白含量进行测定。可溶性蛋白含量测定方法:将 0.3 g 干净的新鲜旗叶片置于冰浴研钵中,先加入 1 mL pH 值 7.8 磷酸缓冲溶液,充分研磨至匀浆,再加 4 mL pH 值 7.8 磷酸缓冲溶液,搅拌均匀,转入 10 mL 移液管,4 ℃ 10 000 r/min 冷冻离心 20 min,取上清,即为可溶性蛋白的粗提液,采用考马斯亮蓝法^[22]测定;可溶性糖含量测定方法:称取 0.3 g 新鲜叶片,剪碎分别放入刻度试管,加入 15 mL 蒸馏水,塑料薄膜封口,于沸水中提取 30 min(2 次),提取液过滤入 50 mL 容量瓶中,反复冲洗试管及残渣,定容至刻度。取浸提液 0.2 mL 加蒸馏水再加 5 mL 硫酸蒽酮试剂,同时作一空白对照,将各管快速摇动均匀后,在沸水浴中煮 10 min,取出冷却,用空白调零,在 620 nm 波长下测定吸光值。低磷与对照比值定名为相对值。

数据分析:利用 DPS V3.01 软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫对中国春-Synthetic 6x 代换系及亲本可溶性糖含量的影响

由表 2 看出,在对照和低磷 2 种磷条件下,不同代换系旗叶的可溶性糖含量随生育期基本呈现逐渐上升趋势。低磷条件下,多数代换系的可溶性糖含量明显低于对照,表明低磷胁迫导致淀粉合成增加,

Synthetic 6x,母本为中国春(Chinese Spring,CS)

1.2 试验方法

试验于 2008-2009 年在河北农业大学试验站进行,通过去掉 20 cm 耕层土壤创造低磷条件。设置 2 个处理:正常磷(对照),施过磷酸钙($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) 750 kg/hm²,尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) 375 kg/hm²,氯化钾(KCl) 187.5 kg/hm²;低磷处理(有效磷含量 5.6 mg/kg),只施氮、钾肥,不施磷肥。2008 年 10 月中旬将子粒饱满种子于大田播种,行距 40 cm,行长 200 cm,株距 5 cm,小区面积为 30 m²,随机区组设计,3 次重复,在生长阶段适时灌水以保证水分供应,并进行病虫害的防治。每个小区四周下埋 50 cm 深的塑料布防止土壤肥料侧向交换。试验地基础肥力状况如表 1。

蔗糖量减少,与蔗糖合成有关的关键酶活性下降。

低磷胁迫下,不同代换系间存在显著差异,供体 Synthetic 6x 的可溶性糖含量极显著高于受体中国春。孕穗期中 2A、3A、7A、5B、4D、7D 代换系的可溶性糖含量显著或极显著高于中国春,2B、7B、1D 代换系极显著低于中国春。2A、3A、4A、1B、4D 代换系相对可溶性糖含量显著或极显著高于中国春,2B、3D、1D 代换系相对可溶性糖含量极显著低于中国春;开花期中 2A、1B、5B、6D、7D 代换系可溶性糖含量显著或极显著高于中国春,2B、1D 代换系显著低于中国春。3A、1B、5B、6B、7B、2D、6D、7D 代换系相对可溶性糖含量显著或极显著高于中国春,1D 代换系显著低于中国春;灌浆期中 2A、4D、6D 代换系可溶性糖含量极显著高于中国春,1A、2B 代换系显著或极显著低于中国春。2A、3A、4A、5B、6B、2D、3D、4D、5D、6D、7D 代换系相对可溶性糖含量显著或极显著高于中国春。

由上可看出,2A、3A、5B、7D 代换系旗叶的可溶性糖含量或相对可溶性糖含量在孕穗期、开花期、灌浆期始终显著或极显著高于中国春。表明 Synthetic 6x 的 2A、3A、5B、7D 染色体上可能存在低磷胁迫下促进可溶性糖含量增加的基因。

2.2 低磷胁迫对中国春-Synthetic 6x 代换系及其亲本可溶性蛋白含量的影响

由表 3 看出,在对照和低磷 2 种磷条件下,不同代换系旗叶的可溶性蛋白含量随生育期进行基本呈

现先升后降趋势。低磷条件下,多数代换系的可溶性蛋白合成受阻。
性蛋白含量明显低于对照,表明低磷胁迫导致可溶

表 2 低磷胁迫和对照条件下中国春-Synthetic 6x 代换系及其亲本不同时期叶片可溶性糖含量变化

Tab. 2 The change of soluble sugar content in leaves of CS-Synthetic 6x substitution lines and parents
in different stages under the P-deficiency and control treatments

基因型 Genotype	孕穗期 Booting stage			开花期 Flowering stage			灌浆期 Filling stage		
	对照	低磷	低磷/对照	对照	低磷	低磷/对照	对照	低磷	低磷/对照
	Control	P-deficiency	Ratio	Control	P-deficiency	Ratio	Control	P-deficiency	Ratio
1A	11.504	9.401	0.817	11.863	10.320	0.991	20.419 ⁻	17.247 ⁻	0.845
2A	11.983	10.780 ⁺⁺	0.900 ⁺	17.090	13.719 ⁺⁺	0.992	24.113	23.060 ⁺⁺	0.956 ⁺⁺
3A	11.430	10.078 ⁺	0.882 ⁺	12.699	12.178	0.980 ⁺⁺	22.851	21.628	0.947 ⁺
4A	10.846	9.639	0.889 ⁺	13.733	11.629	0.947	20.610	19.300	0.936 ⁺
5A	11.574	8.654	0.748	14.840	12.248	0.958	23.613	20.063	0.850
6A	11.173	8.900	0.797	13.463	11.119	0.996	22.987	20.313	0.884
7A	11.278	8.636	0.766	14.318	12.139	0.980	22.484	20.687	0.920
1B	10.427	9.239	0.886 ⁺	16.291	14.726 ⁺⁺	0.937 ⁺	22.781	18.647	0.819
2B	10.286	6.856 ⁻	0.667 ⁻	11.967	9.410	0.978	17.410 ⁻	14.793 ⁻	0.850
3B	10.819	9.480	0.876	14.676	12.136	0.979	24.863	20.990	0.844
4B	10.967	9.387	0.856	13.110	10.429	0.991	23.746	20.289	0.854
5B	10.332	10.030 ⁺	0.971 ⁺⁺	14.536	13.823 ⁺⁺	0.931 ⁺⁺	21.893	21.534	0.984 ⁺⁺
6B	11.219	8.880	0.792	12.777	11.347	0.978 ⁺	22.021	20.590	0.935 ⁺
7B	8.869	7.157 ⁻	0.807	12.268	10.730	0.997 ⁺	21.903	18.353	0.838
1D	10.667	6.864 ⁻	0.644 ⁻	14.552	9.787	0.965 ⁻	22.232	19.740	0.888
2D	12.661 ⁺⁺	9.608	0.759	13.743	12.197	0.993 ⁺	22.959	21.424	0.933 ⁺
3D	12.073	8.004	0.663 ⁻	13.684	10.077	0.958	21.430	20.076	0.937 ⁺
4D	11.423	10.234 ⁺⁺	0.896 ⁺	13.809	11.096	0.977	23.087	22.764 ⁺⁺	0.986 ⁺⁺
5D	10.390	8.390	0.808	12.294	10.399	0.968	23.064	21.757	0.944 ⁺
6D	11.648	8.838	0.759	14.100	13.014 ⁺⁺	0.985 ⁺⁺	23.904	23.399 ⁺⁺	0.979 ⁺⁺
7D	13.212 ⁺⁺	10.193 ⁺⁺	0.772	14.263	12.457 ⁺	0.994 ⁺	21.007	19.557	0.931 ⁺
Synthetic 6x	14.257 ⁺⁺	12.447 ⁺⁺	0.873	24.369 ⁺⁺	21.974 ⁺⁺	0.994 ⁺	32.286 ⁺⁺	25.733 ⁺⁺	0.797
CS	11.020	8.690	0.789	14.263	11.049	0.964	23.387	19.679	0.842

注: ⁺ 和 ⁺⁺ 分别表示 0.05 和 0.01 水平上显著高于中国春, ⁻ 和 ⁻⁻⁻ 分别表示 0.05 和 0.01 水平上显著低于中国春。表 3 同。

Note: ⁺ and ⁺⁺ mean significantly higher than Chinese Spring at 0.05 and 0.01 level respectively. ⁻ and ⁻⁻⁻ mean significantly lower than Chinese Spring at 0.05 and 0.01 level respectively. The same as Tab. 3.

表 3 低磷胁迫和对照条件下中国春-Synthetic 6x 代换系及其亲本不同时期叶片可溶性蛋白含量变化

Tab. 3 The change of soluble protein content in leaves of CS-Synthetic 6x substitution lines
and parents in different stages under the P-deficiency and control treatments

基因型 Genotype	孕穗期 Booting stage			开花期 Flowering stage			灌浆期 Filling stage		
	对照	低磷	低磷/对照	对照	低磷	低磷/对照	对照	低磷	低磷/对照
	Control	P-deficiency	Ratio	Control	P-deficiency	Ratio	Control	P-deficiency	Ratio
1A	25.033	23.903 ⁺	0.955	35.561	35.033	0.985 ⁺	24.046	23.063	0.959
2A	23.678	21.200	0.895	37.831	36.100	0.954	23.628	22.618	0.957
3A	25.433 ⁺	24.875 ⁺⁺	0.978	42.060	41.747 ⁺⁺	0.993 ⁺	32.181 ⁺	29.360 ⁺⁺	0.912
4A	20.456	17.311	0.846	39.914	30.097	0.754	24.147	19.922	0.825
5A	23.456	25.239 ⁺⁺	1.076 ⁺	40.933	38.264 ⁺	0.935	27.150	25.508	0.940
6A	19.969	18.950	0.949	41.642	36.558	0.878	27.229	27.011 ⁺	0.992
7A	22.167	18.892	0.852	46.908 ⁺⁺	30.847	0.658	24.703	23.950	0.970
1B	22.033	19.494	0.885	43.392	31.919	0.736	25.375	25.831	1.006
2B	19.470	18.161	0.933	43.136	36.094	0.837	25.667	23.576	0.942
3B	23.783	23.064	0.970	35.786	34.050	0.952	25.032	26.885 ⁺	0.959
4B	22.333	19.983	0.895	39.833	32.022	0.804	28.039	26.650 ⁺	0.993
5B	25.531 ⁺	22.067	0.864	40.256	36.942 ⁺	0.918	26.826	21.607	0.815
6B	18.933 ⁻	15.225 ⁻	0.804	37.417	30.225	0.808	26.521	24.313	0.873
7B	25.050	17.067	0.681 ⁻	29.092 ⁻	28.650	0.985 ⁺	27.843	21.493	0.814
1D	23.075	21.400	0.927	39.956	30.511	0.764	26.410	20.721	0.881
2D	25.681 ⁺	24.547 ⁺⁺	0.956	36.650	33.117	0.904	23.528	22.040	0.870
3D	21.928	19.217	0.876	39.789	32.158	0.808	25.340	19.338 ⁻	0.734
4D	16.38 ⁻	15.575 ⁻	0.950	42.986	34.081	0.793	26.333	16.658 ⁻	0.699 ⁻

续表 3:

基因型 Genotype	孕穗期 Booting stage			开花期 Flowering stage			灌浆期 Filling stage		
	对照	低磷	低磷/对照	对照	低磷	低磷/对照	对照	低磷	低磷/对照
	Control	P-deficiency	Ratio	Control	P-deficiency	Ratio	Control	P-deficiency	Ratio
5D	25.289 ⁺	24.019 ⁺	0.950	36.906	30.328	0.822	23.835	21.494	0.831
6D	23.294	20.958	0.900	35.744	33.392	0.934	25.853	23.781	0.852
7D	23.136	19.750	0.854	39.419	33.803	0.858	27.928	26.588	1.048 ⁺
Synthetic 6x	34.936 ⁺⁺	29.633 ⁺⁺	0.848	44.620 ⁺	43.920 ⁺⁺	0.984 ⁺	35.560 ⁺⁺	35.120 ⁺⁺	0.988
CS	22.039	19.906	0.903	37.250	28.030	0.753	25.808	22.654	0.878

低磷胁迫下,不同代换系间存在显著差异,供体 Synthetic 6x 的可溶性蛋白含量极显著或显著高于受体中国春。孕穗期中 1A、3A、5A、2D、5D 代换系显著或极显著高于中国春,6B、4D 代换系可溶性蛋白含量活性极显著低于中国春,5A 代换系相对可溶性蛋白含量显著高于中国春,7B 代换系相对可溶性蛋白含量极显著低于中国春;开花期中 3A、5A、5B 代换系可溶性蛋白含量显著或极显著高于中国春,1A、3A、7B 代换系相对可溶性蛋白含量显著高于中国春;灌浆期中 3A、6A、3B、4B 代换系可溶性蛋白含量显著或极显著高于中国春,3D、4D 代换系可溶性蛋白含量显著或极显著低于中国春,7D 代换系相

对可溶性蛋白含量显著高于中国春。

由上可看出,3A 代换系旗叶的可溶性蛋白含量或相对可溶性蛋白含量在孕穗期、开花期、灌浆期始终显著或极显著高于中国春。表明 Synthetic 6x 的 3A 染色体上可能存在低磷胁迫下诱导可溶性蛋白含量增加的基因。

2.3 基因型间的差异显著性检验

为了确定各代换系基因型之间是否具有真实差异性,利用 DPS V3.01 统计软件进行方差分析。发现不同处理间可溶性糖含量和可溶性蛋白含量均呈极显著差异(表 4),表明利用该代换系进行可溶性糖含量和可溶性蛋白含量的基因定位具有可靠性。

表 4 中国春-Synthetic 6x 代换系及其亲本旗叶可溶性糖和可溶性蛋白含量的方差分析

Tab.4 Variation analysis of the flag leaves soluble sugar content and soluble protein content of CS-Synthetic 6x substitution lines and parents

		自由度 DF	均方(对照) MS(Control)			均方(低磷) MS(P-deficiency)			均方(低磷/对照) MS(Ratio)		
变异来源 Source of variation			孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage
可溶性糖含量	区组间	2	0.085	1.365	1.778	0.064	0.351	0.620	0.000	0.002	0.001
Soluble sugar content	基因型	22	3.560 **	19.297 **	19.983 **	4.830 **	19.400 **	14.694 **	0.021 **	0.014 **	0.010 **
	误差	44	0.298	3.322	2.044	0.303	0.470	0.999	0.002	0.002	0.002
	总变异	68									
可溶性蛋白含量	区组间	2	1.764	7.325	8.908	7.731	29.127	1.305	0.016	0.018	0.002
Soluble protin content	基因型	22	36.645 **	42.909 **	22.770 **	35.559 **	46.788 **	43.507 **	0.017 **	0.028 **	0.024 **
	误差	44	2.465	13.325	8.507	2.881	19.060	4.239	0.006	0.013	0.006
	总变异	68									

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Note: * and ** mean significant difference at 0.05 and 0.01 level respectively.

3 讨论

对于 C₃ 作物而言,光合碳同化固定 CO₂ 的初产物是磷酸丙糖,在正常条件下大部分的磷酸丙糖经过一系列反应生成可溶性糖(如蔗糖),小麦旗叶可溶性糖合成供应充足对于籽粒高产有重要意义。在有氧呼吸中,蔗糖等可溶性糖转化为葡萄糖,再分解为葡萄糖-6-磷酸。而磷能促进体内碳水化合物代谢,使细胞中可溶性糖和磷脂的含量有所增加,从而增加细胞质浓度,提高植物抗病及抗旱、抗寒等抗性能力。本研究发现,低磷条件下小麦代换系及其

亲本旗叶中可溶性糖在各生育期积累少于对照,这与刘运武^[23]和唐湘如等^[24]在水稻上的研究结果相一致。本研究结果还表明,Synthetic 6x 的 2A、3A、5B、7D 染色体上可能存在低磷胁迫下促进可溶性糖含量增加的基因。

小麦籽粒中的氮素来源,大约 80% 来自于营养器官中同化的氮素的再运转,而旗叶则是小麦氮素同化的主要器官,旗叶氮素同化水平的高低对于籽粒蛋白质的合成具有重要作用。谷氨酰胺合成酶 GS 是 NH₄⁺ 进一步形成氨基酸反应过程中的关键酶^[25],磷素能通过协同提高 NR 和 GS 的活性来促

进旗叶中的氮素同化从而为籽粒蛋白质的合成提供物质基础。本研究表明,小麦代换系及其亲本在低磷胁迫下可溶性蛋白含量在各生育时期明显低于对照,说明低磷胁迫抑制了可溶性蛋白合成,这与陈龙等^[26]、陈立松等^[27]研究的干旱胁迫下的试验结果是一致的。低磷胁迫引起小麦叶片总的可溶性蛋白质含量下降,可能由于蛋白酶的活性提高,加快了蛋白质的水解;低磷使 RNA 转录和翻译受到抑制,造成蛋白质含量的减少。Clua 等^[28]以中国春-Synthetic 6x 代换系为材料,将调控根中蛋白质含量的基因定位到 6A 和 1D 染色体上。白志英等^[15]以中国春-Synthetic 6x 代换系为材料,得出 Synthetic 6x 的 4A、4B、2D 和 6D 染色体上可能有干旱胁迫下抑制蛋白质含量降低的基因存在的结论。本研究表明, Synthetic 6x 的 3A 染色体上可能存在低磷胁迫下诱导可溶性蛋白含量增加的基因。

致谢 感谢 John Innes Centre, Norwich Research Park 提供试验材料。

参考文献:

- [1] 陈 钰, 张乃民. 植物耐低磷胁迫研究进展[J]. 山西林业科技, 2007(3): 27-27.
- [2] 张福锁. 植物营养生态生理学和遗传学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 53-63.
- [3] 徐向华, 丁贵杰. 马尾松适应低磷胁迫的生理生化响应[J]. 林业科学, 2006, 42(9): 24-28.
- [4] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源对磷肥的遗传反应及根际土壤营养差异[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 62-67.
- [5] 史向远, 王秀红, 韩彦青, 等. 玉米耐低磷基因型的筛选[J]. 山西农业科学, 2012, 40(3): 217-220, 223.
- [6] 张 静, 王 艳, 王小波. 不同磷水平下玉米自交系根系形态及吸收钾氮差异研究[J]. 山西农业科学, 2005, 33(1): 60-62.
- [7] 张振清, 夏叔芳. 无机磷对叶片淀粉和蔗糖积累的影响[J]. 植物生理学报, 1982, 8(4): 385-391.
- [8] Fredeen A L, Rao I M, Ferry N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in Glycine Max [J]. Plant Physiol, 1989, 89: 225-230.
- [9] Hideaki U, Kousuke S. Phosphate deficiency in Maize. II. Enzyme activities [J]. Plant Cell Physiol, 1991, 32: 1313-1317.
- [8] Hideaki U, Kousuke S. Phosphate deficiency in Maize. I. Leaf phosphate status, growth photosynthesis and carbon partitioning [J]. Plant Cell Physiol, 1991, 32(4): 497-504.
- [10] Rao I M, Arulanantham A R, Terry N. Leaf phosphate status, photosynthesis and carbon partition in sugar beet. II. Diurnal changes in sugar phosphates, adenylates, and nicotinamide nucleotides [J]. Plant Physiol, 1989, 90: 820-826.
- [11] Crafts-Brander S J. Phosphorus nutrition influence on leaf senescence in soybean [J]. Plant Physiol, 1992, 98: 1128-1132.
- [12] Crafts-Brander S J, Salvucci M E, Sims J L, et al. Phosphorus nutrition influence on plant growth and nonstructural carbohydrate accumulation in Tobacco [J]. Crop Sci, 1990, 30: 609-604.
- [13] 贾继增, 张正斌, Devos K, 等. 小麦 21 条染色体 RELP 作图位点遗传多样性分析 [J]. 中国科学, 2001, 3(31): 13-21.
- [14] 白志英, 李存东, 孙红春. 小麦中国春-Synthetic 6x 代换系的光合速率与产量性状研究 [J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(1): 20-24.
- [15] 白志英, 李存东, 冯丽肖, 等. 干旱胁迫对小麦叶片细胞膜透性效应的染色体定位研究 [J]. 华北农学报, 2007, 22(1): 1-4.
- [16] 白志英, 李存东, 刘 渊. 干旱胁迫下小麦叶片脯氨酸和蛋白质含量变化与染色体的关系 [J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(3): 325-330.
- [17] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 小麦代换系抗旱性生理指标的主成分分析及综合评价 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4264-4272.
- [18] 郑金凤, 白志英, 李存东, 等. 低磷胁迫对小麦代换系产量性状的影响及染色体效应 [J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(2): 233-238.
- [19] 郑金凤, 李成璞, 董少鸣, 等. 低磷胁迫对小麦代换系叶绿素和类胡萝卜素含量的影响及染色体效应 [J]. 华北农学报, 2010, 26(5): 161-165.
- [20] 郑金凤, 董少鸣, 李成璞, 等. 低磷胁迫对小麦代换系保护酶活性和丙二醛含量的影响及染色体效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1366-1372.
- [21] 白宝璋, 靳占忠, 李存东. 植物生理学实验教程下 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2001: 73-74.
- [22] 刘运武. 磷对杂交水稻生长发育及其生理效应影响的研究 [J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 308-315.
- [23] 唐湘如, 官春云, 余铁桥, 等. 不同基因型水稻产量和品质的物质代谢研究 [J]. 湖南农业大学学报, 1999, 25(4): 279-282.
- [24] Yamaya T, Oaks A. Distribution of two isoforms of glutamine synthetase in bundle sheath mesophyll cell of corn leaves [J]. Plant Physiol, 1988, 72: 23-28.
- [25] 陈 龙, 罗志良, 谭光轩, 等. 小麦灌浆期叶片游离脯氨酸和可溶性蛋白质含量与抗旱性的关系 [J]. 周口师范高等专科学校学报, 2000, 17(2): 1-3.
- [26] 陈立松, 刘星辉. 水分胁迫下对荔枝叶片氮和核酸代谢的影响与抗旱性的关系 [J]. 植物生理学报, 1999, 25(1): 49-56.
- [28] Clua A A, Castro A M, Gimenez D O, et al. Chromosomal effects in the endogenous contents of non-structural carbohydrates and proteins measured in wheat substitution lines [J]. Plant Breeding, 2002, 121(2): 141-145.