

去叶和去小穗对小麦籽粒微量元素和蛋白质含量的影响

刘娜 余鹏 王超 奚文星 王志敏 张英华*

(中国农业大学 农学与生物技术学院/农业部农作制重点开放实验室,北京 100193)

摘要 为了解小麦不同部位叶片对籽粒微量元素(Zn、Fe、Mn和Cu)和蛋白质含量的影响以及不同品种微量元素和蛋白质含量的源库限制程度,以8个冬小麦品种为材料,通过开花后去倒一叶、倒二叶、倒三叶和去50%小穗处理,分析成熟期籽粒中Zn、Mn、Fe、Cu和蛋白质含量与籽粒重的变化及其相互关系。结果表明,不同部位叶片的去除均降低了籽粒重和蛋白质含量,也降低了籽粒中Zn、Mn、Fe和Cu含量;几个品种平均来看,去倒一叶处理籽粒重下降幅度最大,为14.43%,去倒二叶处理籽粒微量元素含量下降幅度最大,Zn、Mn、Fe和Cu含量分别下降11.31%、15.27%、10.29%和8.32%,去倒三叶处理籽粒蛋白质含量下降幅度最大,为11.63%,各品种对去叶的反应有差异。去小穗减少库,剩余籽粒Zn、Mn、Fe、Cu和蛋白质含量分别提高26.02%、25.01%、8.93%、8.99%和3.51%,剩余籽粒粒重提高10.41%,说明籽粒Zn、Mn、Fe、Cu和蛋白质含量主要受各元素供源限制,且受源限制程度因品种而异。籽粒中4种微量元素含量之间及其与蛋白质含量之间具有一定的正相关性,说明籽粒微量元素含量与蛋白质含量存在同步提高的可能性,蛋白质含量可作为衡量Fe、Zn等元素含量高低的参考。

关键词 小麦; 去叶; 去小穗; 微量元素; 蛋白质; 籽粒重

中图分类号 S 512.1; S 311

文章编号 1007-4333(2013)06-0042-12

文献标志码 A

Effect of leaf and spikelet removal on grain micronutrient and protein concentration in wheat

LIU Na, YU Peng, WANG Chao, XI Wen-xing, WANG Zhi-min, ZHANG Ying-hua*

(Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture/College of Agronomy and Biotechnology,
China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In this study, 8 winter wheat cultivars were selected to study the effect of leaf at different position on grain micronutrient (Zn, Fe, Mn and Cu) and protein concentration as well as the source and sink limitation for grain micronutrient and protein accumulation by removing the leaf (the flag leaf, the 2nd leaf and the 3rd leaf) and spikelet (50% of spikelet removal) after anthesis. The results showed that, in the defoliation treatment, accompanied by the reductions of grain weight and protein concentration in grains, the concentrations and contents of Fe, Zn, Mn, and Cu in grains were reduced, and there was a significant difference in cultivar response to defoliation. It indicated that the most decrease in grain weight was caused by the treatment of the flag leaf removal (decreased by 14.43%); the most decrease in micronutrient concentration was caused by the 2nd leaf removal treatment (decreased by 11.31%, 15.27%, 10.29% and 8.32% respectively for Zn, Mn, Fe and Cu); the most decrease in protein concentration was caused by the 3rd leaf removal treatment (decreased by 11.63%). In the treatment of 50% of spikelet removal, the single grain weight and the concentrations of Zn, Mn, Fe, Cu and protein increased by 10.4%, 26.02%, 25.01%, 8.93%, 8.99% and 3.51% respectively. The concentrations of Fe, Zn, Mn, Cu and protein in grains were restricted by source supplies of the corresponding element, but the effects of the source supply were different across the elements and wheat genotypes. Correlation analysis showed that all coefficients of correlation were significantly positive among the concentrations or

收稿日期: 2013-03-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB118605); 公益性行业科研专项项目(201303133, 200903007); 国家科技支撑计划项目(2011BAD16B14)

第一作者: 刘娜, 博士研究生, E-mail: yyxyyla@163.com

通讯作者: 张英华, 副教授, 主要从事小麦节水高产和微量营养研究, E-mail: yhzhang@cau.edu.cn

contents of Fe, Zn, Mn, Cu and protein in grains. This implies that the 4 micronutrients in grains are possibly increased with grain protein concentration simultaneously, and the protein concentration in grains may be an index to measure the grain Fe, Zn, Mn and Cu concentrations in wheat.

Key words wheat; defoliation; spikelet removal; micronutrient; protein; grain weight

小麦籽粒中微量营养元素含量的高低对植株生长发育和人们的饮食健康有重要影响。籽粒中微量元素的来源包括从根系吸收和从营养器官转运 2 种途径。就锌(Zn)元素来说,当植株生长环境 Zn 源充足时,籽粒中 Zn 的积累主要来自于灌浆期根对 Zn 的吸收,而从其他部位转移的很少;当 Zn 缺乏时,从其他部位重新分配则成为籽粒 Zn 源的主要途径^[1]。在冬小麦各生育时期中,Zn 在各器官中的分配率均以叶片最高^[2],可见,叶片对籽粒 Zn 含量有重要影响。笔者之前的研究发现^[3],开花后去除所有叶片后,籽粒中 Zn 含量降低 3.7%~14.5%,籽粒 Fe、Mn 和 Cu 含量分别降低 1.1%~26.0%、4.4%~19.0%和 2.0%~11.0%,基因型间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。叶片对籽粒微量元素供源的影响可能包括 2 个方面,一是叶片本身作为矿质元素的暂贮库,在生育灌浆后期向籽粒再运转(特别是对运移性较强的元素),二是生育灌浆后期叶片蒸腾作用影响根系矿物质吸收和运输。去小穗减小库后,相对增加了剩余籽粒的源供给,结果籽粒 Fe、Zn、Mn、Cu 和蛋白质含量增加^[3],说明籽粒微量元素和蛋白质积累主要受供源限制。不同部位叶片光合和物质生产能力有差异,但不同部位叶片对籽粒微量元素含量的影响未见报道,本试验是在课题组之前研究的基础上以 8 个小麦品种为试材,通过设置不同部位去叶(去倒 1 叶、倒 2 叶和倒 3 叶)和去

除小穗处理,进一步探讨不同部位叶片对籽粒 Fe、Zn、Mn、Cu、蛋白质含量和籽粒重的影响,并分析不同品种微量元素含量可调控程度以及微量元素含量与蛋白质含量及籽粒重的关系,旨在为生产上提高小麦籽粒微量元素含量的调控措施的应用提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及设计

试验于 2010—2011 年度在中国农业大学吴桥试验站进行,吴桥地处海河平原黑龙港流域中部,地理位置:36°24'~38°0'N,115°45'~117°24'E,供试土壤为壤质底黏潮土,0~40 cm 土壤基本养分含量见表 1。地下水位 6~9 m,2010—2011 年小麦生育期间降雨量 62.4 mm,为干旱年份。供试品种为邢麦 4 号、维麦 8 号、邯 6172、科麦 1 号、济南 17、石麦 8 号、农大 211 和良星 66,于 2010 年 10 月 12 日播种,随机区组排列,3 次重复,按小麦节水栽培技术进行管理^[4]。

开花期每个品种每小区选择 100 个生长一致的单茎穗进行标记,花后第 3 天进行去叶和去小穗处理。去叶处理,包括去倒一叶、倒二叶和倒三叶 3 个处理,即分别把标记的植株单茎倒一叶、倒二叶、倒三叶剪除,每个处理 20 株;去小穗处理是将标记的植株单茎的上半部小穗剪除。对照为完整的标记穗。

表 1 试验地基本养分含量

Table 1 Concentrations of soil nutrients in the test field

土层/ cm Soil depth	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total N	碱解氮/ (mg/kg) Alkali-hydrolyzed N	速效磷/ (mg/kg) Available P	速效钾/ (mg/kg) Available K	Fe/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)	Mn/ (mg/kg)	Cu/ (mg/kg)
0~20	12.1	0.95	131.8	22.9	115.7	19.5	5.1	18.1	2.7
20~40	5.8	0.48	76.2	5.8	84.6	20.6	1.0	9.8	2.0

1.2 调查测定项目与方法

在成熟期,将处理的小麦单茎取回,测定籽粒重和籽粒铁(Fe)、锌(Zn)、锰(Mn)、铜(Cu)和蛋白质含量。Fe、Zn、Mn 和 Cu 含量采用等离子电感耦合原子吸收光谱法测定。蛋白质含量采用半微量凯氏

定氮法测定籽粒的氮含量,将结果乘以换算系数 5.7,再转换成蛋白质含量。

1.3 数据处理与统计分析

采用 SPSS 软件进行方差分析和相关分析,采用 LSD 法测验显著性。

2 结果与分析

2.1 源库处理对籽粒重的影响

供试品种中完整植株(对照)单粒重为 36.07~45.74 mg,以济南 17 最低,维麦 8 号最高;单穗籽粒产量为 1.13~1.86 g,以农大 211 最低,科麦 1 号最高,品种间差异显著(表 2)。去叶处理降低了光合源,成熟期单粒重和籽粒产量多表现为降低,其中去倒一叶导致小麦籽粒单粒重降低 2.95%~24.91%,籽粒产量降低 5.15%~22.30%;去倒二叶导致小麦单粒重降低 0.49%~13.36%,籽粒产量降低 2.95%~14.89%;去倒三叶后,小麦籽粒单粒重降低 0.57%~13.19%,籽粒产量降低 1.69%~6.52%,而刑麦 4 号单粒重和籽粒产量都没有下降,济南 17 和农大 211 单粒重有所降低,但籽粒产量没有下降,其他品种籽粒产量都略有降低。个别品种籽粒产量没有降低可能由于这些品种生长后期倒三叶光合作用很低,但消耗多所以去除后,单粒重反而升高。总体来看,不同部位叶片去除导致籽粒产量和单粒重降低的幅度以倒一叶>倒二叶>倒三叶,可见倒一叶对籽粒产量贡献更大。去除一半小穗后,相对减小了库,增大了剩余籽粒的源,结果单粒重增加 2.00%~20.02%,籽粒产量相对于对照降低了 22.41%~44.49%,可见,各品种籽粒重均在一定程度上受源限制。相对增加源供给后,农大 211、济南 17、刑麦 4 号和邯 6172 剩余籽粒的籽粒重增加幅度明显高于其他品种,说明通过源调控可显著提高这些品种的籽粒产量。

2.2 源库处理对籽粒微量元素含量的影响

2.2.1 Zn 含量

对照植株籽粒 Zn 含量变化范围为 24.64~34.91 mg/kg,品种间存在显著差异,以济南 17 最高,科麦 1 号最低;籽粒 Zn 积累量为 29.39~55.28 $\mu\text{g}/\text{穗}$,以维麦 8 号最高,农大 211 最低(表 3)。开花后去叶多数品种籽粒 Zn 含量和积累量降低,去倒一叶、倒二叶和倒三叶分别导致小麦籽粒 Zn 含量降低 1.00%~20.49%、2.13%~21.50%和 3.87%~23.57%,Zn 积累量降低 9.64%~32.72%、0.66%~24.70%和 7.57%~21.76%,以农大 211 降低幅度最小,济南 17 降低幅度最大。平均来看,不同部位叶片去除导致籽粒 Zn 含量降低的幅度为倒二叶>倒三叶>倒一叶,Zn 积累量的降低幅度为倒一叶>倒二叶>倒三叶。开花后去小穗

处理,减少了库而相对增加了 Zn 源,成熟期各品种籽粒 Zn 含量提高 4.07%~38.52%,以科麦 1 号提高幅度最大,刑麦 4 号提高幅度最小;Zn 积累量只有农大 211 增加 3.5%,其他品种降低 4.82%~24.14%,且 Zn 积累量降低幅度低于籽粒产量降低幅度,说明大部分品种籽粒 Zn 积累受 Zn 源限制,增加 Zn 供给有望提高籽粒 Zn 含量。

2.2.2 Mn 含量

对照植株籽粒 Mn 含量变化范围为 36.89~48.38 mg/kg,品种间存在显著差异(表 4),以维麦 8 号最高,石 8 号最低;Mn 积累量变化范围为 44.70~85.53 $\mu\text{g}/\text{穗}$,以维麦 8 号最高,农大 211 最低。开花后去叶导致各品种籽粒 Mn 含量和积累量均降低,去倒一叶、倒二叶和倒三叶分别导致 Mn 含量降低 1.50%~17.40%、6.64%~24.18%和 3.87%~16.17%,Mn 积累量降低 18.13%~35.02%、10.00%~27.26%和 5.11%~14.18%,且均以农大 211 降低幅度最小,济南 17 降低幅度最大。不同部位叶片去除后籽粒 Mn 含量的平均下降幅度为倒二叶>倒一叶>倒三叶,Mn 积累量降低幅度为倒一叶>倒二叶>倒三叶。在去小穗减库处理中,各品种成熟期籽粒 Mn 含量都表现为显著增加,平均增加 25.01%,说明所测品种籽粒 Mn 含量均受源供给限制,增加 Mn 供给有望提高籽粒 Mn 含量。

2.2.3 Fe 含量

对照植株籽粒 Fe 含量品种间存在差异(表 5),所测品种籽粒 Fe 含量范围为 37.61~52.81 mg/kg,其中,石 8 号、济南 17 和维麦 8 号较高,科麦 1 号和良星 66 含量较低;Fe 积累量变化范围为 52.30~91.78 $\mu\text{g}/\text{穗}$,以维麦 8 号最高,农大 211 最低。开花后去叶导致多数品种籽粒 Fe 含量和积累量降低,去倒一叶、倒二叶和倒三叶分别导致 Fe 含量降低 1.12%~20.1%、0.13%~20.14%和 0.15%~23.45%,Fe 积累量降低 8.58%~32.74%、1.64%~24.79%和 3.31%~21.77%,以刑麦 4 号和农大 211 降低幅度较小,以邯 6172 和济南 17 降低幅度较大。不同部位叶片去除后,籽粒 Fe 含量平均降低幅度为倒二叶>倒一叶>倒三叶,Fe 积累量降低幅度为倒一叶>倒二叶>倒三叶。开花后去小穗处理减少库容,成熟期各品种籽粒 Fe 含量都表现为显著增加,8 个品种平均增加幅度达 8.93%,说明所测品种籽粒 Fe 含量受源供给影响,增加 Fe 供给有望提高籽粒 Fe 含量。

表 2 不同源库处理对小麦成熟期籽粒重和籽粒产量的影响
Table 2 Effects of source and sink reduction treatments on final grain weight and grain yield in wheat

处理 Treatment	指标 Index	品 种 Cultivar										平均值 Mean
		邢麦 4 号 XM4	维麦 8 号 WM8	邯 6172 H6172	科麦 1 号 KMI	济南 17 JN17	石 8 号 S8	农大 211 ND211	良星 66 LX66			
单粒重 Single grain weight	对照 Control	粒重/mg	42.58 b	45.74 b	40.01 b	45.57 b	36.07 b	42.22 b	41.48b	41.45b	41.89	
	剪半穗 Half spikelet removal	粒重/mg	49.66 a	46.66 a	45.76 a	46.91 a	43.29 a	45.09 a	46.17 a	46.45 a	46.25	
		比例/%*	16.63	2.00	14.35	2.94	20.02	6.79	11.31	12.08	10.76	
	去倒一叶 Flag leaf removal	粒重/mg	41.32 c	41.48 d	34.58 d	34.22 d	30.20 d	34.38 e	33.37 d	37.20 e	35.84	
		比例/%*	-2.95	-9.31	-13.58	-24.91	-16.27	-18.58	-19.56	-10.25	-14.43	
	去倒二叶 2 nd leaf removal	粒重/mg	42.37 b	44.14 c	37.22 c	39.63 c	34.55 c	36.58 d	38.90 c	38.74 d	39.02	
		比例/%*	-0.49	-3.51	-6.98	-13.03	-4.22	-13.36	-6.21	-6.53	-6.79	
	去倒三叶 3 rd leaf removal	粒重/mg	42.77 b	45.48 b	36.88 c	39.56 c	35.81 b	40.86 c	40.72 b	39.91 c	40.25	
		比例/%*	0.45	-0.57	-7.82	-13.19	-0.73	-3.23	-1.82	-3.71	-3.83	
	每穗籽粒产量 Grain yield per ear	对照 Control	产量/g	1.47 a	1.77 a	1.53 a	1.86 a	1.18 a	1.59 a	1.13 a	1.47 a	1.50
剪半穗 Half spikelet removal		产量/g	1.08 c	1.07 d	1.13 e	1.03 e	0.88 c	0.90 d	0.87 c	0.96 d	0.99	
		比例/%*	-26.39	-39.7	-26.58	-44.49	-25.79	-43.30	-22.41	-34.81	-32.93	
去倒一叶 Flag leaf removal		产量/g	1.39 b	1.48 c	1.34 d	1.45 d	1.01 b	1.24 c	1.04 b	1.32 c	1.28	
		比例/%*	-5.15	-16.06	-12.85	-22.17	-14.30	-22.30	-7.67	-9.95	-13.81	
去倒二叶 2 nd leaf removal		产量/g	1.40 b	1.58 b	1.44 c	1.73 c	1.13 a	1.35 b	1.14 a	1.43 b	1.40	
		比例/%	-4.57	-10.43	-5.83	-6.59	-4.07	-14.89	1.50	-2.95	-5.98	
去倒三叶 3 rd leaf removal		产量/g	1.48a	1.65b	1.47b	1.80b	1.21a	1.55a	1.17a	1.44b	1.40	
		比例/%*	0.75	-6.52	-3.85	-3.17	2.37	-2.38	3.61	-1.69	-1.36	

注：同一列数据后的不同字母表示处理间有显著差异 ($P < 0.05$)；* 表示为 % = (处理 - 对照) × 100 / 对照。下同。

Note: Values in the same column with different letters indicate significant difference at $P < 0.05$; * % = (treatments-control) × 100 / control. The same below.

表3 不同源库调节对成熟期小麦籽粒Zn含量和Zn积累量的影响
Table 3 Effects of source and sink reduction treatments on final Zn concentration and Zn content in wheat grains

处理 Treatment	指标 Index	品种 Cultivar										平均值 Mean
		邢麦4号 XM4	维麦8号 WM8	邯6172 H6172	科麦1号 KM1	济南17 JN17	石8号 SS	农大211 ND211	良星66 LX66			
Zn 含量 Zn concentration	对照 Control	含量/(mg/kg)	29.83 b	31.27 b	28.45 b	24.64 c	34.91 b	29.21 b	26.06 bc	27.56 b	28.99	
	剪半穗	含量/(mg/kg)	31.04 a	40.89 a	36.88 a	34.13 a	40.93 a	40.35 a	34.76 a	32.07 a	36.38	
	Half spikelet removal	比例/%*	4.07	30.74	29.64	38.52	17.24	38.16	33.39	16.37	26.02	
	去倒一叶	含量/(mg/kg)	23.72 d	30.96 c	22.93 d	26.69 b	28.16 c	29.96 b	25.80 c	23.61 c	26.48	
	Flag leaf removal	比例/%*	-20.49	-1.00	-19.38	8.31	-19.34	2.58	-1.01	-14.31	-8.08	
	去倒二叶	含量/(mg/kg)	23.92 c	27.76 e	27.79 c	23.12 d	27.40 d	27.21 c	25.51 c	21.90 e	25.58	
	2 nd leaf removal	比例/%*	-19.81	-11.24	-2.31	-6.17	-21.50	-6.83	-2.13	-20.52	-11.31	
	去倒三叶	含量/(mg/kg)	24.00 c	29.77 d	27.34 c	22.90 e	26.68 e	26.82 c	26.73 b	22.94 d	25.90	
	3 rd leaf removal	比例/%*	-19.53	-4.80	-3.87	-7.04	-23.57	-8.16	2.56	-16.77	-10.15	
	每穗 Zn 积累量 Zn content per ear	对照 Control	积累量/10 ⁻⁶ g	43.85 a	55.28 a	43.59 a	45.76 a	41.21 a	46.45 a	29.39 b	40.48 ea	43.25
剪半穗		积累量/10 ⁻⁶ g	33.60 c	43.58 d	41.49 b	35.18 d	35.86 b	36.39 d	30.41 b	30.71 d	35.90	
Half spikelet removal		比例/%*	-23.39	-21.17	-4.82	-23.11	-12.99	-21.66	3.50	-24.14	-15.97	
去倒一叶		积累量/10 ⁻⁶ g	33.07 d	45.94 c	30.63 d	33.41 e	27.72 de	33.62 d	26.55 c	28.97 e	32.49	
Flag leaf removal		比例/%*	-24.58	-16.9	-29.74	-26.98	-32.72	-27.61	-9.64	-28.43	-24.57	
去倒二叶		积累量/10 ⁻⁶ g	33.56 c	43.95 d	40.10 c	40.10 c	31.03 d	36.83 c	29.19 b	31.22 ec	35.75	
2 nd leaf removal		比例/%*	-23.47	-20.5	-8.00	-12.36	-24.70	-20.71	-0.66	-22.87	-16.66	
去倒三叶		积累量/10 ⁻⁶ g	35.55 b	49.20 b	40.29 c	41.19 b	32.24 c	41.64 b	31.23 a	33.12 b	38.06	
3 rd leaf removal		比例/%*	-18.93	-11.00	-7.57	-9.99	-21.76	-10.35	6.26	-18.17	-11.44	

表 4 不同源库调节对成熟期小麦籽粒 Mn 含量和 Mn 积累量的影响
Table 4 Effects of source and sink reduction treatments on final Mn concentration and Mn content in wheat grains

处理 Treatment	指标 Index	品种 Cultivar										平均值 Mean
		邢麦 4 号 XM4	维麦 8 号 WM8	邯 6172 H6172	科麦 1 号 KM1	济南 17 JN17	石 8 号 S8	农大 211 ND211	良星 66 LX66			
Mn 含量	对照 Control	含量/(mg/kg)	40.99 b	48.38 b	40.00 b	41.03 b	38.66 b	36.89 b	39.64 b	38.32 b	40.49	
	剪半穗	含量/(mg/kg)	48.61 a	62.31 a	48.39 a	52.92 a	44.64 a	50.81 a	51.20 a	46.17 a	50.63	
	Half spikelet removal	比例/%*	18.58	28.78	20.97	28.97	15.45	37.72	29.15	20.48	25.01	
去倒一叶 Flag leaf removal	对照 Control	含量/(mg/kg)	33.86 d	45.47 d	35.25 c	38.59 c	32.20 c	36.34 b	35.41 d	33.80 d	36.37	
	去倒一叶	比例/%*	-17.40	-6.02	-11.87	-5.96	-16.73	-1.50	-10.67	-11.8	-10.24	
	去倒二叶 2 nd leaf removal	含量/(mg/kg)	33.03 d	40.89 e	32.69 d	36.61 d	29.32 d	34.45 c	35.15 d	32.16 e	34.29	
去倒二叶 2 nd leaf removal	去倒二叶	比例/%*	-19.42	-15.50	-18.28	-10.78	-24.18	-6.64	-11.33	-16.07	-15.27	
	去倒三叶 3 rd leaf removal	含量/(mg/kg)	35.98 c	46.48 c	35.79 c	38.54 c	32.41 c	34.73 c	36.30 c	36.84 c	37.13	
	去倒三叶	比例/%*	-12.24	-3.93	-10.55	-6.09	-16.17	-5.87	-8.42	-3.87	-8.39	
每穗 Mn 积累量	对照 Control	积累量/10 ⁻⁶ g	60.27 a	85.53 a	61.31 a	76.20 a	45.64 a	58.67 a	44.70 a	56.29 a	61.08	
	剪半穗	积累量/10 ⁻⁶ g	52.61 c	66.42 c	54.45 b	54.55 d	39.10 b	45.82 d	44.79 a	44.21 d	50.24	
	Half spikelet removal	比例/%*	-12.71	-22.35	-11.19	-28.41	-14.32	-21.91	0.21	-21.46	-16.52	
去倒一叶 Flag leaf removal	对照 Control	积累量/10 ⁻⁶ g	47.22 d	60.67 e	43.66 e	52.92 e	29.66 d	42.56 e	36.59 d	42.55 e	44.48	
	去倒一叶	比例/%*	-21.65	-29.07	-28.78	-30.56	-35.02	-27.46	-18.13	-24.42	-26.89	
	去倒二叶 2 nd leaf removal	积累量/10 ⁻⁶ g	46.35 e	64.74 d	47.18 d	63.51 c	33.20 c	46.62 c	40.23 c	45.85 c	48.46	
去倒二叶 2 nd leaf removal	去倒二叶	比例/%*	-23.1	-24.31	-23.05	-16.66	-27.26	-20.54	-10.00	-18.55	-20.43	
	去倒三叶 3 rd leaf removal	积累量/10 ⁻⁶ g	53.29 b	76.82 b	52.73 c	69.29 b	39.17 b	53.92 b	42.41 b	53.20 b	55.10	
	去倒三叶	比例/%*	-11.59	-10.19	-13.99	-9.06	-14.18	-8.11	-5.11	-5.49	-9.71	

表5 不同源库调节对成熟期小麦籽粒Fe含量和Fe积累量的影响
Table 5 Effects of source and sink reduction treatments on final Fe concentration and Fe content in wheat grains

处理 Treatment	指标 Index	品种 Cultivar										平均值 Mean
		邢麦4号 XM4	维麦8号 WM8	邯6172 H6172	科麦1号 KM1	济南17 JN17	石8号 S8	农大211 ND211	良星66 LX66			
Fe 含量 Fe concentration	对照 Control	含量/(mg/kg)	41.09 b	51.91 b	49.12 b	39.55 b	52.81 b	51.57 d	46.38 b	37.61 b	46.25	
	剪半穗	含量/(mg/kg)	44.22 a	53.05 a	51.88 a	43.96 a	55.78 a	57.51 a	47.47 a	47.16 a	50.13	
	Half spikelet removal	比例/%*	7.61	2.18	5.62	11.17	5.64	11.52	2.33	25.39	8.93	
	去倒一叶	含量/(mg/kg)	39.61 c	51.33 c	39.24 c	37.60 c	43.44 c	56.73 b	45.04 c	34.45 d	43.43	
	Flag leaf removal	比例/%*	-3.62	-1.12	-20.10	-4.92	-17.74	10.01	-2.90	-8.39	-6.10	
	去倒二叶	含量/(mg/kg)	38.36 d	48.50 d	39.23 c	34.17 d	42.64 d	51.50 d	44.95 c	32.77 e	41.51	
	2 nd leaf removal	比例/%*	-6.65	-6.58	-20.14	-13.59	-19.25	-0.13	-3.09	-12.86	-10.29	
	去倒三叶	含量/(mg/kg)	41.23 b	51.81 b	39.96 c	39.49 b	40.42 e	54.30 c	46.72 b	35.58 c	43.69	
	3 rd leaf removal	比例/%*	0.33	-0.20	-18.63	-0.15	-23.45	5.30	0.73	-5.39	-5.18	
	每穗Fe 积累量 Fe content per ear	对照 Control	积累量/10 ⁻⁶ g	60.42 a	91.78 a	75.27 a	73.44 a	62.33 a	82.01 b	52.30 b	55.25 a	69.10
剪半穗		积累量/10 ⁻⁶ g	47.86 d	56.54 e	58.37 b	45.32 e	48.87 b	51.86 e	41.53 e	45.16 d	49.44	
Half spikelet removal		比例/%*	-20.79	-38.39	-22.46	-38.29	-21.60	-36.76	-20.60	-18.26	-27.14	
去倒一叶		积累量/10 ⁻⁶ g	55.24 b	71.96 d	52.39 d	49.39 d	43.14 c	63.63 d	46.79 d	43.35 e	53.24	
Flag leaf removal		比例/%*	-8.58	-21.59	-30.40	-32.74	-30.79	-22.41	-10.53	-21.53	-22.32	
去倒二叶		积累量/10 ⁻⁶ g	53.83 c	76.79 c	56.61 c	59.28 c	48.29 b	69.70 c	51.44 c	46.72 c	57.83	
2 nd leaf removal		比例/%*	-10.91	-16.33	-24.79	-19.28	-22.54	-15.01	-1.64	-15.43	-15.74	
去倒三叶		积累量/10 ⁻⁶ g	61.07 a	85.62 b	58.89 b	71.01 b	48.85 b	84.30 a	54.58 a	51.39 b	64.46	
3 rd leaf removal		比例/%*	1.08	-6.71	-21.77	-3.31	-21.63	2.80	4.37	-6.99	-6.52	

2.2.4 Cu 含量

成熟期对照植株籽粒 Cu 含量为 4.40~5.72 mg/kg(表 6)。去叶后各品种反应不同,邯 6172、济南 17 和石 8 号 3 个品种在去倒一叶后籽粒 Cu 含量出现上升现象,济南 17 在去倒二叶处理时出现上升现象,其余品种去倒一叶、倒二叶和倒三叶籽粒 Cu 含量分别下降 1.10%~18.42%、2.30%~21.68% 和 0.44%~18.69%;Cu 积累量分别降低 6.33%~32.77%、1.53%~24.00%和 2.45%~20.06%,以 荆麦 4 号和济南 17 降低幅度较小,良星 66 降低幅度较大。不同部位叶片去除后,籽粒 Cu 含量平均降低幅度为倒二叶>倒三叶>倒一叶,Cu 积累量降低幅度为倒一叶>倒二叶>倒三叶。开花后去小穗减库后,除科麦 1 号和良星 66 成熟期籽粒 Cu 含量下降,其余品种籽粒 Cu 含量均上升,平均增加 8.99%,Cu 积累量降低 26.55%,说明籽粒 Cu 含量也在一定程度上受源供应的限制。

2.3 源库处理对籽粒蛋白质含量的影响

成熟期对照植株籽粒蛋白质含量为 14.28%~16.24%,蛋白质积累量为 160.98~287.09 mg/穗,品种间差异显著,以农大 211 最低,维麦 8 号最高(表 7)。济南 17 去倒三叶后籽粒蛋白质含量略有升高,石 8 号和良星 66 去倒一叶后籽粒蛋白质含量略有升高,其他品种去倒叶后籽粒蛋白质含量分别降低 0.38%~17.34%、3.84%~15.49%和 5.07%~23.35%;籽粒蛋白质积累量分别降低 8.05%~29.15%、3.30%~24.31%和 2.81%~25.32%。去叶后蛋白质含量降低幅度为倒三叶>倒二叶>倒一叶,蛋白质积累量降低幅度为倒一叶>倒三叶>倒二叶。开花后去小穗减库处理,成熟期各品种籽粒蛋白质含量都表现升高,平均升高 15.30%,蛋白质积累量降低 30.52%。可见,籽粒蛋白质含量受氮源供应的限制,倒三叶对籽粒蛋白质含量影响较大。

2.4 籽粒微量元素含量与籽粒蛋白质含量和籽粒重关系

相关分析表明(表 8),在完整植株(对照)中,籽粒 Zn、Fe、Mn 含量之间呈正相关,Zn、Fe、Mn、Cu 含量与蛋白质含量呈正相关,Zn、Fe 含量与籽粒产量呈负相关,Mn、Cu、蛋白质含量与籽粒产量呈正相关。去 1/2 小穗和不同部位叶片后,籽粒 Zn、Fe、Mn、Cu 含量之间都呈正相关,且正相关系数略高于对照,微量元素与蛋白质和籽粒产量之间的相关性不同处理略有变化。去 1/2 小穗、去倒一叶和去倒

三叶处理,籽粒 Zn、Fe、Mn、Cu 和蛋白质含量之间都呈正相关,去倒二叶后 Zn、Fe、Mn 含量与蛋白质含量呈负相关,Cu 含量与蛋白质含量呈弱的正相关。不同源库处理下,Zn 含量都与籽粒产量呈负相关,但以去倒一叶处理负相关性最弱;Mn、Cu 含量与籽粒产量都呈正相关,但 Mn 与产量的正相关系数在去小穗处理下降低、在去叶处理下升高,而 Cu 与产量的正相关系数不同源库处理下都低于对照;蛋白质与籽粒产量的正相关性在去倒一叶后增加,其他处理下降低。对照和不同源库处理下微量元素和蛋白质的积累量与籽粒产量都呈正相关,说明微量元素积累与蛋白质的积累以及籽粒产量有同步提高的可能性。

3 讨论与结论

1)本试验通过对 8 个品种微量元素含量的测定表明,供试品种籽粒中 Fe>Mn>Zn>Cu,且各元素含量在基因型间存在显著差异。从 8 个品种 4 种微量元素含量综合分析来看,维麦 8 号籽粒粒重和微量元素含量都比较高,蛋白质含量也较高,综合性状比较好,可见,高产且高营养的基因型是存在的。

2)叶片是微量元素和蛋白质的暂贮库。以前的研究发现,去掉所有叶片后籽粒微量元素和蛋白质含量都明显降低^[5]。本研究发现,开花后进行不同部位去叶处理后,小麦籽粒微量元素含量出现不同程度下降。从不同部位叶片去除后微量元素含量和积累量降低程度来看,叶片对籽粒 Zn、Cu 含量的影响为倒二叶>倒三叶>倒一叶,对籽粒 Mn、Fe 含量的影响为倒二叶>倒一叶>倒三叶,对籽粒 4 种微量元素积累量的影响都是倒一叶>倒二叶>倒三叶,积累量的变化与去叶后籽粒产量的变化一致。去叶对蛋白质含量和积累量的影响与微量元素略有不同,去叶后蛋白质含量降低幅度为倒三叶>倒二叶>倒一叶,蛋白质积累量的降低幅度为倒一叶>倒三叶>倒二叶。可见,倒二叶对籽粒微量元素含量影响更大,倒三叶对籽粒蛋白质含量影响更大。生产上通过育种或栽培措施调控倒二叶和倒三叶生长或促进其物质运转有望提高籽粒微量元素含量和蛋白质含量。

3)不同品种对去叶的反应不同,去倒一叶、倒二叶和倒三叶后,籽粒 Fe、Zn、Mn 含量和积累量都以农大 211 降低幅度最小,济南 17 降低幅度最大,籽粒 Cu 含量和积累量则以济南 17 降低幅度最小,良

表6 不同源库调节对成熟期小麦籽粒Cu含量和Cu积累量的影响
Table 6 Effects of source and sink reduction treatments on final Cu concentration and Cu content in wheat grains

处理 Treatment	指标 Index	品种 Cultivar										平均值 Mean
		邢麦4号 XM4	维麦8号 WM8	邯6172 H6172	科麦1号 KM1	济南17 JN17	石8号 SS	农大211 ND211	良星66 LX66			
Cu 含量	对照 Control	5.06 b	5.61 b	5.01 c	5.72 a	4.40 c	5.30 c	5.06 b	4.85 a	5.13		
	剪半穗	5.46 a	6.29 a	6.03 a	5.65 b	5.30 a	5.86 a	5.62 a	4.40 b	5.58		
	Half spikelet removal	7.84	12.11	20.34	-1.25	20.34	10.70	11.01	-9.15	8.99		
Cu concentration	去倒一叶	5.00 b	5.55 c	5.55 b	5.03 c	4.47 bc	5.65 b	4.94 c	3.95 c	5.02		
	Flag leaf removal	-1.24	-1.10	10.68	-12.11	1.52	6.57	-2.41	-18.42	-2.06		
	去倒二叶	4.81 c	5.48 c	4.32 d	4.94 c	4.52 b	4.84 d	4.84 c	3.80 d	4.69		
2 nd leaf removal	-4.93	-2.30	-13.71	-13.62	2.65	-8.64	-4.35	-21.68	-8.32			
去倒三叶	去倒三叶	4.90 c	5.55 c	4.99 c	4.99 c	4.38 c	4.81 d	4.60 d	3.94 c	4.77		
	3 rd leaf removal	-3.17	-1.05	-0.48	-12.79	-0.44	-9.22	-9.11	-18.69	-6.87		
	每穗 Cu 积累量	7.44 a	9.92 a	7.68 a	10.62 a	5.20 a	8.43 a	5.71 a	7.12 a	7.76		
Cu content per ear	剪半穗	5.91 e	6.70 e	6.79 c	5.82 e	4.64 c	5.29 e	4.92 c	4.22 e	5.54		
	Half spikelet removal	-20.62	-32.40	-11.65	-45.19	-10.70	-37.23	-13.86	-40.78	-26.55		
	去倒一叶	6.97 c	8.13 d	5.78 e	7.14 d	4.57 c	5.98 d	5.04 c	5.02 d	6.08		
Flag leaf removal	-6.33	-17.99	-24.80	-32.77	-12.02	-29.02	-11.68	-29.47	-20.51			
去倒二叶	去倒二叶	6.75 d	8.68 c	6.24 d	8.57 c	5.12 b	6.55 c	5.54 b	5.41 c	6.61		
	2 nd leaf removal	-9.27	-12.50	-18.74	-19.31	-1.53	-22.25	-2.91	-24.00	-13.81		
	去倒三叶	7.26 b	9.17 b	7.35 b	8.97 b	5.30 a	7.47 b	5.38 b	5.69 b	7.07		
3 rd leaf removal	-2.45	-7.50	-4.31	-15.55	1.92	-11.38	-5.82	-20.06	-8.14			

表 7 不同源库调节对成熟期小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质积累量的影响
Table 7 Effects of source and sink reduction treatments on final protein concentration and protein content in wheat grains

处理 Treatment	指标 Index	品种 Cultivar							平均值 Mean	
		邢麦 4 号 XM4	维麦 8 号 WM8	邯 6172 H6172	科麦 1 号 KM1	济南 17 JN17	石 8 号 S8	农大 211 ND211		良星 66 LX66
蛋白质含量										
对照 Control	含量/%	14.77 b	16.24 b	14.30 b	14.50 bc	14.89 b	14.75 b	14.28 b	14.47 b	14.77
剪半穗	含量/%	14.96 a	17.33 a	14.52 a	14.74 a	15.05 a	15.00 a	15.81 a	14.96 a	15.30
Half spikelet removal	比例/%*	1.28	6.71	1.53	1.65	1.06	1.66	10.75	3.41	3.51
去倒一叶	含量/%	14.32 c	15.96 c	13.41 c	14.44 c	12.31 e	14.84 b	14.21 b	14.50 b	14.25
Flag leaf removal	比例/%*	-3.06	-1.71	-6.22	-0.38	-17.34	0.59	-0.46	0.21	-3.55
去倒二叶	含量/%	14.20 c	13.72 e	13.30 c	13.83 d	13.98 d	13.99 c	13.60 cd	13.87 c	13.81
2 nd leaf removal	比例/%*	-3.84	-15.49	-7.01	-4.61	-6.13	-5.13	-4.73	-4.09	-6.38
去倒三叶	含量/%	12.18 d	15.16 d	11.11 d	13.76 d	14.14 c	12.03 d	13.05 d	11.42 d	12.86
3 rd leaf removal	比例/%*	-17.53	-6.65	-19.22	-5.07	4.43	-10.29	-15.39	-23.35	-11.63
每穗蛋白质积累量										
对照 Control	积累量/mg	217.16 a	287.09 a	219.15 a	269.27 a	175.82 a	234.59 a	160.98 a	212.51 a	222.07
剪半穗	积累量/mg	161.90 d	184.72 e	163.36 d	151.94 e	131.87 c	135.22 e	138.35 d	143.26 e	151.33
Half spikelet removal	比例/%*	-25.45	-35.66	-25.46	-43.57	-25.00	-42.36	-14.06	-32.59	-30.52
去倒一叶	积累量/mg	199.68 b	236.86 c	179.10 c	208.77 d	124.56 d	183.34 c	147.95 c	191.77 c	184.00
Flag leaf removal	比例/%*	-8.05	-17.50	-18.27	-22.47	-29.15	-21.85	-8.10	-9.76	-16.89
去倒二叶	积累量/mg	199.28 b	217.31 d	191.91 b	239.93 c	158.32 b	189.41 b	155.67 b	197.80 b	193.70
2 nd leaf removal	比例/%*	-8.23	-24.31	-12.43	-10.89	-9.95	-19.26	-3.30	-6.92	-11.91
去倒三叶	积累量/mg	180.44 c	250.52 b	163.66 d	247.51 b	170.88 a	186.76 b	152.42 bc	164.94 d	189.64
3 rd leaf removal	比例/%*	-16.91	-12.74	-25.32	-8.08	-2.81	-20.39	-5.32	-22.39	-14.24

表8 小麦籽粒微量元素含量与籽粒重和蛋白质含量的相关系数

Table 8 Coefficients of correlation of micronutrient concentration to protein concentration in grains and grain weight in wheat

指标 Index	含量 Concentration				籽粒产量 Grain yield			积累量 Content			籽粒产量 Grain yield
	Fe	Mn	Cu	蛋白质	Grain yield	Fe	Mn	Cu	蛋白质		
对照 Control	Zn 0.652	0.133	-0.548	0.522	0.869**	0.844**	0.744*	0.887**	0.800**		
	Fe	0.166	-0.150	0.446	0.774*	0.735*	0.814**	0.736*			
	Mn	0.538	0.818**	0.474	0.934**	0.974**	0.926**				
	Cu	0.832**	0.338	0.832**	0.962**	0.983**					
	蛋白质	0.387	0.387	0.387	0.972**	0.972**					
去1/2小穗 Half spikelet removal	Zn	0.910**	0.322	0.550	0.403	0.239	0.934**	0.708*	0.816**	0.690*	0.586
	Fe	0.370	0.340	0.186	0.323	0.561	0.739*	0.596	0.593		0.593
	Mn	0.677*	0.820**	0.323	0.867**	0.956**	0.782*				0.782*
	Cu	0.417	0.368	0.368	0.837**	0.830**					0.830**
	蛋白质	0.006	0.006	0.006	0.848**	0.848**					0.848**
去倒一叶 Flag leaf removal	Zn	0.828**	0.605	0.398	0.384	0.035	0.893**	0.871**	0.888**	0.823**	0.711*
	Fe	0.436	0.648	0.383	0.148	0.772*	0.676*	0.537			0.537
	Mn	0.552	0.788*	0.607	0.945**	0.973**	0.922**				0.922**
	Cu	0.327	0.376	0.327	0.889**	0.843**					0.843**
	蛋白质	0.651	0.651	0.651	0.954**	0.954**					0.954**
去倒二叶 2 nd leaf removal	Zn	0.776*	0.111	0.409	-0.362	0.807**	0.837**	0.847**	0.741*	0.782*	0.782*
	Fe	0.340	0.601	-0.008	0.343	0.689*	0.751*	0.476	0.480		0.480
	Mn	0.767*	-0.203	0.601	0.954**	0.914**	0.927**				0.927**
	Cu	0.261	0.087	0.261	0.859**	0.853**					0.853**
	蛋白质	-0.073	-0.073	-0.073	0.991**	0.991**					0.991**
去倒三叶 3 rd leaf removal	Zn	0.696*	0.378	0.557	0.403	0.171	0.888**	0.874**	0.913**	0.795*	0.781*
	Fe	0.353	0.556	0.343	0.113	0.819**	0.724*	0.712*			0.712*
	Mn	0.668*	0.535	0.563	0.924**	0.909**	0.897**				0.897**
	Cu	0.454	0.454	0.454	0.882**	0.920**					0.920**
	蛋白质	0.140	0.140	0.140	0.833**	0.833**					0.833**

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。Note: * significant at $P < 0.05$, ** significant at $P < 0.01$.

星 66 降低幅度最大,说明济南 17 籽粒 Fe、Zn、Mn 含量受叶片影响相对较大,良星 66 籽粒 Cu 含量受叶片影响相对较大。这些品种中,微量元素含量的明显降低是由于去叶后微量元素转运量降低引起的,还是由于去叶影响了根系吸收微量元素,或者两种情况共同作用的结果有待进一步研究。不过,有研究发现,当 N 和 Zn 供给水平较高时,籽粒 50% 的 Zn 和 80% 的 Fe 都来自于开花后吸收^[5]。不管怎样,促进营养器官微量元素转运仍然是提高籽粒微量元素含量的一条途径,特别对于籽粒 Zn 含量,其开花前营养器官再移动的贡献达 50%^[5]。

与大多数品种不同的是,农大 211 去倒三叶后籽粒 Zn、Fe 含量和积累量都表现为增加,刑麦 4 号和石 8 号去倒三叶后籽粒 Fe 含量和积累量也略有增加。由此可见,小麦籽粒微量元素含量及其对源库调节的反应程度主要由基因型决定。去倒三叶微量元素含量增加可能由于在这些品种中,去除倒三叶小麦蒸腾作用虽然降低了,但是相比较而言,叶片在灌浆期消耗的营养物质会减少,同时也可能促进倒一叶和倒二叶营养的转运。总之,去叶处理对微量元素吸收积累的影响因品种、去叶部位以及营养种类而异,对其差异机理有待深入研究。

4) 去小穗减少库,相对增加了剩余籽粒的源供给,结果使籽粒粒重增加,蛋白质含量提高,籽粒 Fe、Zn、Mn 和 Cu 含量也出现不同程度升高,与前人研究结果相似^[3,6]。这种提高可能由于剩余籽粒接受的营养元素转运量相对增加,也可能由于去除部分小穗后,根系的碳水化合物供应水平改善,从而有利于矿质营养元素的吸收^[7],这需要进一步研究。本研究中去小穗后籽粒微量元素提高,其他研究中通过增加外源 Zn 供给明显提高了籽粒 Zn 含量^[8],都说明微量元素积累受供源影响。

5) 关于籽粒微量元素与蛋白质含量和籽粒产量的关系已有很多报道,有研究认为,小麦籽粒 Fe、Zn 含量可以同步提高,且籽粒 Fe、Zn 含量与籽粒产量没有负相关性^[9],Fe、Zn 含量与蛋白质含量呈显著正相关^[10-11];Zn 可能会影响 N 的代谢和分配,促进 N 向子粒中再分配^[12];N 会影响 Fe、Zn 吸收和分配^[5],N 从衰老叶片向籽粒的再移动与 Fe、Zn 的再移动是密切连锁的^[13]。本试验相关分析显示,完整植株中,籽粒 Fe、Zn、Mn、Cu 含量与籽粒蛋白质含量之间都呈正相关,Fe、Zn 含量与籽粒产量呈负相关,Mn、Cu、蛋白质含量与籽粒产量呈正相关。去

叶和去小穗处理对微量元素含量与蛋白质含量和籽粒产量的相关系数有一定影响,尤以去倒二叶影响明显。4 种微量元素积累量之间以及与籽粒蛋白质积累量和籽粒产量之间都存在正相关关系。这些结果表明小麦籽粒 Fe、Zn、Mn、Cu 和蛋白质含量有同步提高的可能性,蛋白质含量可作为衡量 Fe、Zn 等营养元素含量高低的指标,随着籽粒产量和蛋白质积累的增加,微量营养的积累也有望提高。这些结果为小麦产量和品质的同步改良提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Pearson J N, Rengel Z, Jenner C F, et al. Manipulation of xylem transport affects Zn and Mn transport into developing wheat grains of cultured ears[J]. *Physiol Plant*, 1996, 98: 229-234
- [2] 杨建堂, 王文亮, 王岩, 等. 高产冬小麦锌素吸收分配特点的研究[J]. *土壤通报*, 1997, 28(3): 124-126
- [3] 张英华, 周顺利, 张凯, 等. 源库调节对小麦不同品种籽粒微量元素及蛋白质含量的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34: 1629-1636
- [4] 兰林旺, 周殿玺. 小麦节水高产研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995
- [5] Kutman U B, Yildiz B, Cakmak I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat[J]. *Plant Soil*, 2011, 342: 149-164
- [6] Zhang Y, Zhang Y, Liu N, et al. Effect of source-sink manipulation on accumulation of micronutrients and protein in wheat grains[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2012, 175: 622-629
- [7] Loughtman B C. The application of *in vivo* techniques in the study of metabolic aspects of ion absorption in crop plants[J]. *Plant Soil*, 1987, 99: 63-74
- [8] Pearson J N, Rengel Z, Graham R D. Regulation of zinc and manganese transport into developing wheat grain having different zinc and manganese concentrations[J]. *J Plant Nutr*, 1999, 22: 1141-1152
- [9] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. *J Exp Biol*, 2004, 55: 353-364
- [10] Peterson C J, Johnson V A, Mattern P J. Influence of cultivar and environment on mineral and protein concentrations of wheat flour, bran and grain[J]. *Cereal Chem*, 1986, 63: 183-186
- [11] Morrison E. Enhancing the consumer's perception of wheat and wheat products, especially with regard to essential trace minerals[D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 1995
- [12] 陈铭, 尹崇仁. 施用锌肥对冬小麦体内营养元素浓度的效应[J]. *中国农业科学*, 1992, 25(4): 60-69
- [13] Waters B M, Uauy C, Dubcovsky J, et al. Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain[J]. *J Exp Bot*, 2009, 60: 4263-4274