

有色大麦种子种皮颜色与种子活力相关性分析

张毅 冯西博* 马跃峰 唐敬芹 王建林

(西藏农牧学院 植物科学学院,西藏 林芝 860000)

摘要 为研究有色大麦种质物理指标与种子活力的关系,采用发芽试验和计算机图像识别相结合的方法,通过测定 44 份有色大麦种子萌发期生理指标和种子物理指标,用相关性分析、主成分分析和逐步回归分析方法,研究有色大麦种子物理指标与种子活力之间的关系。结果表明:种子粒长、粒宽、粒厚和千粒重这些物理指标与有色大麦种子活力关系不明显,种皮颜色 Y 值(黄色)与有色大麦种子活力呈正相关关系,其余各颜色指标均与有色大麦种子活力呈负相关关系;逐步回归分析表明,种皮颜色对有色大麦种子活力的影响大于种子粒长、粒宽和粒厚,影响有色大麦种子活力的主要颜色指标是 H(色相)值和 α (从洋红色至绿色的范围)值,且成负相关;此外,IOD(光密度)值与粒长和粒宽达极显著正相关关系。

关键词 有色大麦; 种子形态; 种子颜色; 种子活力; 图像识别

中图分类号 S521.3

文章编号 1007-4333(2019)10-0018-12

文献标志码 A

Study on the correlation seed coat colour and seed vigor of colored barley

ZHANG Yi, FENG Xibo*, MA Yuefeng, TANG Jingqin, WANG Jianlin

(Plant Sciences College, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000 China)

Abstract To study the relationship between the physical characteristics and seed vigor of barley germplasm, a total of 44 colored barley germplasms were taken as study object. Combination of germination test and computer image recognition was used to determine the relationship between seed physical characteristics and seed vigor of colored barley by measuring the germination characteristics and seed physiological characteristics of barley seeds. Correlation analysis, principal component analysis and stepwise regression analysis were conducted. The results showed that: The germplasm vigor of colored barley was positively correlated with the Y (Yellow) value of seed coat color, and the other color characteristics were negatively correlated with the germplasm of colored barley. Stepwise regression analysis showed that the effect of seed coat color on the vigor of colored barley germplasm was greater than that of seed physical characteristics, grain length and grain thickness. The seed physical characteristics showed that the grain length, grain width, grain thickness and 1 000-grain weight were not significantly related to the seed vigor of colored barley, and the main color characteristics affecting the vigor of colored barley germplasm are H (hues) value and α (range from magenta to green), and are negatively correlated; In addition, the Integrated optical density (IOD) value is extremely positively correlated with the grain length and the grain width.

Keywords colored barley; seed morphology; seed color; vigor; image identification

大麦(*Hordeum vulgare* L.)又称裸大麦、元麦和米大麦,隶属禾本科(Gramineae)大麦属

(*Hordeum*),是世界上最古老的粮食作物之一,种植面积仅次于水稻、小麦和玉米^[1]。全球 61%~

收稿日期:2018-12-12

基金项目:国家自然科学基金(31360300,31560312);国家重点研发计划课题(2016YFC0502005);西藏农牧学院研究生创新计划资助项目(YJS2018-17)

第一作者:张毅,硕士研究生,E-mail:zhangyivvip@126.com

通讯作者:冯西博,讲师,主要从事作物遗传育种研究,E-mail:fxb750217@126.com

77%的大麦用于动物饲料加工业,9%~22%的大麦用于啤酒制造业,人们食用仅占大麦最终用量的5%左右,在中国,大麦还是西藏地区的主粮^[2-3]。大麦富含各种维生素、矿物质、微量元素、 β -葡聚糖和黄酮等,其含量高于小麦、玉米和高粱,其中, β -葡聚糖和黄酮含量,以西藏地区的大麦含量最高^[4-8]。近年来因人们生活水平的提高,大麦“三高两低”(高纤维、高蛋白和高维生素及低脂肪和低糖)的营养品质备受人们的关注。而有色大麦是一类珍贵的大麦种质资源,Mullick等^[9]在1958年首次证明花色苷是形成有色大麦颜色的主要成分,且黄色大麦不含花色苷,在有色谷物中,蓝色大麦的花色苷含量明显高于紫色小麦和白色小麦^[10],研究表明,花色苷具有抗菌、抗氧化、抗炎、预防心脏病和抑制癌细胞生长等功能^[11-16];有色大麦中还含有丰富的酚类化合物,其中以黑色大麦中含量最高,且随着颜色的加深,其含量也随之增加,酚类化合物是有效的抗氧化剂、自由基清除剂和金属螯合剂^[17-18]。有色大麦符合人们对黑色食品的需求。同时,有色大麦含有丰富的天然色素,在食品加工业、化妆品工业制备、医学保健学科和商业贸易等行业均有非常重要的利用价值^[19]。目前对于有色大麦的研究,主要集中在对营养物质组成成分及主要成分功能的研究^[10-18]。

影响种子活力的因素较多,其中遗传因素占主导作用^[19],其次还受种子的大小和种皮颜色等物理指标影响。Atak等^[20]研究发现干豌豆的深色种子活力高于浅色种子,李贺勤等^[21]研究发现,甘蓝种子活力随颜色的加深而增强,但齐雪峰等^[22]发现乌拉尔甘草种子随颜色的加深,种子活力明显下降,邹吉祥等^[23]也发现羊草种子活力随着种皮颜色的加深而降低,Anuradha等^[24]研究发现,浅色鹰嘴豆种子活力高于深色种子。以上关于种皮颜色与活力关系的研究,均是通过人工分级,并未对颜色进行定量化研究。时伟芳等^[25]通过Seed Identificatiom软件,对小麦种子物理指标进行定量化分析,发现小麦小粒种子活力高于大粒种子活力,并且颜色指标S和a值与小麦种子活力关系密切相关,贾佳等^[26]同样使用Seed Identificatiom软件,发现小麦种子宽度和种皮颜色G值与小麦的抗旱性呈负相关。Filho等^[27]研究发现玉米大粒种子通常比小粒种子活力更高。关于种皮颜色、种子物理指标与种子活力关系的研究报道相对较多,但研究结果并没有统一结果,主要原因是种子颜色不够丰富,且大多集中

研究同一品种,关于有色大麦种子活力的研究鲜有报道。本研究以44份有色大麦种质为试材,种质颜色丰富(包括蓝色、紫色和黑色大麦),利用Photo shop cs 6和Image pro-plus 6.0结合人工测定的方法,选取25个物理指标,通过数学分析方法,探讨有色大麦种质物理特性与种子活力的关系,旨在为有色大麦种子活力鉴定和机器视觉分级精选奠定一定的基础。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

本试验研究的材料为44份有色大麦农家种,分别来自西藏自治区、甘肃省和四川省3个省自治区,材料均由青藏高原作物种质资源数据平台(WWW.TCGRIS.CN)提供。44份有色大麦中皮大麦1份(XZDM-1266),其余全为裸大麦,其中蓝色大麦1份,黑色大麦26份,紫色大麦17份(表1)。

1.2 试验方法

本试验利用人工气候培养箱对有色大麦种质进行芽期活力鉴定,采用发芽盒双层纸上发芽法。每份材料挑选均匀一致的种子50粒,3次重复。首先用紫光M1扫描仪对种子进行扫描,背板用白纸做背景,用Photo shop cs 6对种子的RGB值(R,红;G,绿;B,蓝)、HSB值(H,色相;S,饱和度;B,亮度)、Lab值(L,亮度;a,从洋红色至绿色的范围;b,从黄色至蓝色的范围)和CMYK值(C,青色;M,品红色;Y,黄色;K,黑色)值进行读取,每粒种子取5个位点求平均值,共识别5粒种子,然后计算其平均值。

用Image pro-plus 6.0对所有种子的粒长、粒宽、粒二维面积、长轴长(Center-Y)、短轴长(Center-X)、圆度值(Roundness)、RGB灰度值(Dr,红色通道灰度值;Dg,绿色通道灰度值;Db,蓝色通道灰度值)和光密度值(IOD)进行自动读取。

种子厚度用游标卡尺测量,然后计算相应指标平均值。用3% H₂O₂消毒8 min,用蒸馏水冲洗6次,用滤纸吸干种子表面的浮水,然后放入准备好的发芽盒进行置床,每天定时补充蒸馏水,以种子周围不出现水膜为标准,人工气候培养箱设置恒温25℃,RH 60%~75%,每天光照12 h。每天调查发芽数,以胚芽长度超过种子长度1/3或胚根长度超过种子长度1/2为发芽标准,共调查7 d,并计算发芽势(GE)和发芽率(GP)。培养10 d后结束试

表 1 44 份有色大麦种质材料地理来源及编号

Table 1 Geographical origin and code of tested accessions of colored barley

编号 Code	来源 Origin	颜色 Colored	编号 Code	来源 Origin	颜色 Colored
XZDM-701	西藏自治区曲水县	黑	XZDM-1046	西藏自治区白朗县	黑
XZDM-754	西藏自治区仁布县	黑	XZDM-1147	西藏自治区南木林县	黑
XZDM-788	西藏自治区噶尔县	紫	XZDM-1266	西藏自治区康马县	黑
XZDM-812	西藏自治区尼木县	紫	XZDM-1318	西藏自治区丁青县	黑
XZDM-815	西藏自治区乃东县	黑	XZDM-1332	西藏自治区堆龙德庆县	黑
XZDM-818	西藏自治区琼结县	紫	XZDM-1345	西藏自治区察雅县	黑
XZDM-819	西藏自治区隆子县	紫	XZDM-1353	西藏自治区芒康县	黑
XZDM-854	西藏自治区江孜县	紫	XZDM-1378	西藏自治区类乌齐县	黑
XZDM-860	西藏自治区扎郎县	紫	XZDM-1386	四川省阿坝州	黑
XZDM-917	西藏自治区措美县	黑	XZDM-1395	西藏自治区类乌齐县	黑
XZDM-926	西藏自治区朗县	紫	XZDM-1401	西藏自治区察隅县	黑
XZDM-957	西藏自治区曲松县	紫	XZDM-1404	西藏自治区洛隆县	黑
XZDM-972	西藏自治区日喀则市	黑	XZDM-1405	西藏自治区丁青县	蓝
XZDM-973	西藏自治区波密县	紫	XZDM-1411	西藏自治区莎迦县	黑
XZDM-990	西藏自治区洛扎县	紫	XZDM-1430	西藏自治区左贡县	黑
XZDM-996	西藏自治区八宿县	紫	XZDM-1431	西藏自治区洛扎县	黑
XZDM-1027	西藏自治区普兰县	紫	XZDM-1521	西藏自治区索县	紫
XZDM-1028	西藏自治区昂仁县	紫	XZDM-1543	甘肃省康乐县	黑
XZDM-1029	西藏自治区加查县	黑	XZDM-1545	西藏自治区拉孜县	黑
XZDM-1030	西藏自治区贡嘎县	黑	XZDM-1546	西藏自治区比如县	黑
XZDM-1042	西藏自治区浪卡孜县	紫	XZDM-1559	西藏自治区吉隆县	黑
XZDM-1044	西藏自治区谢通门县	紫	XZDM-1606	西藏自治区聂拉木县	紫

注:材料编号同青藏高原作物种质资源数据平台编号一致。下同。

Note: The material number is consistent with the Qinghai-Tibet Plateau germplasm resources data platform number. The same below.

验,每重复随机取 10 株幼苗,测量其芽长(CL)和根长(RL),并计算发芽指数(GI)和萌发活力指数(GVI)。

$$\text{发芽势(GE)} = \text{培养第 4 天发芽数} / 50 \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率(GP)} = \text{培养第 7 天发芽数} / 50 \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum (G_t/D_t) \quad (3)$$

式中:G_t为发芽日数,D_t为与 G_t相对应的每天发芽种子数。

$$\text{萌发活力指数(GVI)} = \sum (G_t/D_t) \times \text{幼苗平均芽长} \quad (4)$$

式中:芽长为长度单位,cm。

1.3 数据处理与计算

数据整理采用 Microsoft Excel 2013 软件,数据分析采用 SPSS Statistics 22.0 软件。

2 结果与分析

2.1 有色大麦发芽试验描述性统计分析

44 份有色大麦种质发芽试验主要性状的基本统计量见表 2。发芽势 $56.0 \pm 14.1\%$,发芽率 $70.3 \pm 11.9\%$,发芽指数 12.9 ± 3.29 ,萌发活力指数 94.14 ± 40.25 ,苗长 13.74 ± 3.79 cm,根长 7.28 ± 2.97 cm。此外,从表 2 还可以看出,各性状间以及同一性状在不同品种间有较大差异,变异系

数介于 17.00%~42.76%，其中活力指数变异系数最大，变幅在 29.64%~209.59%，变异系数达 42.76%，发芽率变幅相对较小，变幅在 38.00%~92.67%，变异系数为 16.98%。

表 2 44 份有色大麦种质材料在正常条件下幼苗生长情况

Table 2 Seeding growth of 44 colored barley accessions under distilled water

参数 Parameter	发芽势/% Germination energy	发芽率/% Germination percentage	发芽指数 Germination index	活力指数 Germination vigor index	苗长/cm Germination length	根长/cm Root length
最小值 Min	24.0	38.0	6.03	29.64	3.90	3.90
最大值 Max	81.3	92.7	20.24	209.59	21.48	21.48
平均值 Mean	56.0±14.1	70.3±11.9	12.97±3.29	94.14±40.25	13.74±3.79	7.28±2.97
变异系数/% Variation coefficient	25.2	17.0	25.36	42.76	27.58	40.87

2.2 种子物理指标与发芽指标的相关性分析

2.2.1 物理指标选取

采用 Pearson 相关分析方法，筛选与发芽试验发芽势、发芽率、发芽指数、萌发活力指数、苗长和根长相关性达到 5% 显著水平的指标，从 25 个指标中，总共筛选出 12 个指标，用于统计分析。

表 3 可知，在发芽试验中，除苗长和根长外，其余各指标间均达到极显著水平，苗长与发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数呈正相关性 ($P > 0.05$)；根长与发芽势和发芽指数呈负相关 ($P > 0.05$)，与活力指数呈极显著正相关，粒长、粒宽、粒厚和千粒重与发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数均无显著相关关系，粒长和粒宽两者间达到极显著正相关，粒厚和粒宽两者间达到极显著正相关，千粒重与粒长、粒宽和粒厚均达到极显著正相关。IOD 值与发芽势呈显著负相关，与发芽率呈极显著负相关，与粒长、粒宽达极显著正相关，与其他各指标间均无显著相关关系。Dr、Dg 和 Db 值均与发芽率呈显著负相关，与其他各指标间均无显著相关关系。H 值与发芽势、发芽率和发芽指数达极显著负相关，与活力指数达显著负相关，与其余各指标间均无显著相关关系；a 值与发芽势、发芽率和活力指数达到极显著负相关，与其余各指标未达到显著水平。M 值与发芽指数达极显著负相关，与其余各指标间均无显著相关关系。Y 值与发芽势达显著正相关，与其余各指标间均无显著相关关系。总体来看，除 Y 值外，其余各颜色指标与各发芽指标呈负相关，且与有些指标达到显著甚至极显著水平，各颜色指标中，IOD

值还与粒长、粒宽达到极显著水平。

2.2.2 各物理指标描述性统计

44 份有色大麦种质主要物理指标基本统计量见表 4，粒长 6.88 ± 0.54 mm，粒宽 3.77 ± 0.23 mm，千粒重 43.53 ± 4.71 g，IOD 值 115.62 ± 18.88 ，Dr 值 89.11 ± 16.45 ，Dg 值 81.87 ± 15.41 ，Db 值 1847.64 ± 396.96 ，H 值 150.39 ± 167.2 ，a 值 11.27 ± 6.01 ，M 值 75.91 ± 5.66 ，Y 值 71.54 ± 5.98 。此外，从表 4 还可以看出，各指标间以及同一指标在不同品种间有较大差异，变异系数介于 6.02%~111.18%，其中以 H 变异系数最大，变异系数达 111.18%，粒宽变异系数相对较小，变异系数为 6.02%。总体而言，种子的形态指标中粒长、粒宽和粒厚变异系数相对较小，表明粒长、粒宽和粒厚相对较为稳定，各个颜色指标变异系数相对较大，表明 44 份有色大麦种质种皮颜色差异大，颜色种类丰富。

2.3 主成分分析

表 5 可知，KMO 值为 0.608，Bartlett 球形度检验统计量 $P < 0.01$ ，由此否定相关矩阵为单位阵零的假设，即认为各变量之间存在显著的相关性。

从表 6 各公因子方差比可以看出，12 个变量的提取量都达 60% 以上，说明所有变量的信息提取比较充分；种子物理指标中，粒长提取信息量最多，达 83%，粒宽提取信息量较少，仅为 69.5%；颜色指标中，Dr、Dg、Db、IOD 值信息提取量均达 90% 以上；总体而言，各颜色指标信息量较其他物理指标提取充分。

表3 发芽指标与种子物理指标相关性分析
Table 3 Correlation analysis of seed physical and germination characteristics

指标 Index	发芽指标 Germination characteristics					种子物理指标 Seed physical characteristics					F	
	发芽势 Germination energy	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Germination vigor index	苗长 Germination length	根长 Root length	粒长 Grain length	粒宽 Grain wide	粒厚 Grain thickness	千粒重 Thousand kernel weight		
发芽势	1.000											
发芽率	0.833**	1.000										
发芽指数	0.895**	0.924**	1.000									
活力指数	0.502**	0.624**	0.639**	1.000								
苗长	0.087	0.115	0.021	0.000	1.000							
根长	-0.105	0.016	-0.025	0.700**	-0.049	1.000						
粒长	0.004	-0.064	0.003	0.056	-0.064	0.136	1.000					
粒宽	-0.157	-0.252	-0.160	-0.141	-0.172	0.005	0.429**	1.000				
粒厚	0.163	0.106	0.164	-0.103	0.104	-0.285	0.031	0.467**	1.000			
千粒重	0.018	-0.093	-0.070	-0.206	0.057	-0.107	0.566**	0.442**	0.379*	1.000		
IOD	-0.300*	-0.426**	-0.26	-0.075	-0.194	0.097	0.518**	0.523**	0.172	0.270	0.769**	
Dr	-0.261	-0.358*	-0.212	-0.033	-0.100	0.058	0.046	0.065	0.078	-0.055	0.790**	
Dg	-0.249	-0.324*	-0.177	0.030	-0.098	0.100	0.089	0.127	0.142	-0.043	0.824**	
Db	-0.262	-0.341*	-0.213	0.002	-0.123	0.094	0.114	0.160	0.201	-0.012	0.946**	
H	-0.449**	-0.445**	-0.493**	-0.366*	0.053	-0.061	0.009	0.124	0.122	0.007	0.346*	
a	-0.396**	-0.492**	-0.426**	-0.212	-0.189	0.101	0.060	-0.067	-0.117	-0.047	0.516**	
M	-0.266	-0.297	-0.390**	-0.286	0.123	0.025	0.068	0.022	-0.014	0.070	-0.113	
Y	0.303*	0.248	0.259	0.111	-0.016	0.033	0.086	0.017	-0.168	0.022	-0.499**	
F	-0.358*	-0.482**	-0.344*	-0.160	-0.141	0.066	0.506**	0.500**	0.293	0.375*	1.000	

注:IOD,光密度;Dr,红色通道灰度值;Dg,绿色通道灰度值;Db,蓝色通道灰度值;H,色相;a,从洋红色至绿色的范围;M,品红色;Y,黄色;F,综合评价值。*,在0.05水平(双侧)上显著相关;**,在0.01水平(双侧)上显著相关。下同。

Note:IOD,integrated optical density;Dr,red channel gray value;Dg,green channel gray value;Db,blue channel gray value;H,hues;a,from magenta to green;M,magenta;Y,yellow;F,comprehensive evaluation value. *,significantly correlated at the 0.05 level (both sides); **,significantly correlated at the 0.01 level (both sides). The same below.

表 4 44 份有色大麦种子物理指标描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of 44 physical characteristics of colored barley germplasm

指标 Index	极小值 Min	极大值 Max	平均值 Mean	变异系数/% CV
粒长/mm	5.58	9.13	6.88±0.54	7.88
粒宽/mm	3.37	4.34	3.77±0.23	6.02
粒厚/mm	2.46	3.14	2.78±0.17	6.12
千粒重/g	31.47	54.41	43.53±4.71	10.83
IOD	71.22	160.13	115.62±18.88	16.33
Dr	56.87	123.95	89.11±16.45	18.46
Dg	51.08	120.03	81.87±15.41	18.83
Db	1 071.61	3 014.09	1 847.64±396.96	21.48
H	0.00	358.00	150.39±167.20	111.18
a	-1.00	26.00	11.27±6.01	53.34
M	57.00	84.00	75.91±5.66	7.46
Y	57.00	89.00	71.57±5.98	8.36

表 5 KMO 和 Bartlett 球形度的检验

Table 5 KMO and Bartlett sphericity test

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量 Sampling sufficient Kaiser-Meyer-Olkin metric	Bartlett 的球形度检验 Bartlett's test		
	近似卡方 Approximate chi square	df	显著性 Sig.
	0.608	508.588	66

表 6 各公因子方差比

Table 6 Variance ratio of common factors

信息提取阶段 Information extraction stage	粒长 Grain length	粒宽 Grain wide	粒厚 Grain thickness	千粒重 Thousand kernel weight	Dr	Dg	Db	IOD	H	a	M	Y
起始	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
提取	0.830	0.695	0.820	0.660	0.948	0.951	0.909	0.960	0.798	0.658	0.784	0.612

表 7 可知,前 4 个主成分的贡献率分别为 37.439%、19.243%、13.647%、和 9.892%,累计贡献率达 80.222%,基本包含各种质材料各指标的绝大部分信息,其余可以忽略不计。

这样可将原来的 12 个单项指标转换为 4 个相

互独立的综合指标,这 4 个综合指标代表原来 12 个单项指标 80.222%的信息。其中第 1 主成分中 Dr、Dg、Db 和 IOD 值的特征向量较高,表明第 1 主成分中 Dr、Dg、Db 和 IOD 值 4 个颜色指标占主要因子,第 2 主成分中粒宽和千粒重的特征向量较高,表明

第2主成分中种子形态指标占主要因子,第3主成分中 H 值和 M 值的特征向量相对较高,表明第3主成分中 H 值和 M 值2个颜色指标占主要因子,第4主成分中粒长特征向量较高,表明粒长占主要因子。

从表7可以看出,第1、第2、第3和第4主成分已经基本保留了所有指标的原有信息,可以用4个变量 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 代替筛选出的12个指标(粒长(X_1)、粒宽(X_2)、粒厚(X_3)、千粒重(X_4)、IOD(X_5)、Dr(X_6)、Dg(X_7)、Db(X_8)、 H (X_9)、 a (X_{10})、 M (X_{11})和 Y (X_{12})),得出线性组合,其中 $X_1 \sim X_{12}$ 均为标准化后的变量,分别为:

$$Z_1 = 0.119X_1 + 0.144X_2 + 0.112X_3 + 0.061X_4 + 0.441X_5 + 0.449X_6 + 0.448X_7 +$$

$$0.435X_8 + 0.109X_9 + 0.244X_{10} - 0.156X_{11} - 0.283X_{12}$$

$$Z_2 = 0.459X_1 + 0.449X_2 + 0.323X_3 + 0.526X_4 - 0.17X_5 - 0.128X_6 - 0.088X_7 + 0.178X_8 + 0.045X_9 - 0.15X_{10} + 0.157X_{11} + 0.157X_{12}$$

$$Z_3 = -0.051X_1 - 0.029X_2 + 0.013X_3 - 0.032X_4 - 0.091X_5 - 0.113X_6 - 0.02X_7 - 0.067X_8 + 0.658X_9 + 0.352X_{10} + 0.596X_{11} - 0.240X_{12}$$

$$Z_4 = 0.482X_1 - 0.145X_2 - 0.644X_3 + 0.0391X_4 + 0.0561X_5 - 0.009X_6 - 0.044X_7 + 0.186X_8 - 0.164X_9 + 0.341X_{10} + 0.177X_{11} + 0.298X_{12}$$

表7 种子物理特性主成分分析

Table 7 Principal component analysis of seed physical properties

主成分 Principal component	粒长 Grain length	粒宽 Grain wide	粒厚 Grain thickness	千粒重 Thousand kernel weight	Dr	Dg	Db	IOD
1	0.251	0.304	0.236	0.129	0.930	0.945	0.943	0.916
2	0.697	0.759	0.491	0.800	-0.259	-0.195	-0.133	0.270
3	-0.065	-0.037	0.016	-0.041	-0.117	-0.145	-0.003	-0.086
4	0.525	-0.158	-0.723	0.043	0.061	-0.01	-0.048	0.203

主成分 Principal component	H	A	M	Y	特征值 Characteristic values	贡献率/% Contribution	累计贡献率/% Cumulative contribution
1	0.230	0.514	-0.328	-0.596	4.493	37.439	37.439
2	0.068	-0.228	0.238	0.239	2.309	19.243	56.683
3	0.842	0.45	0.763	-0.307	1.638	13.647	70.330
4	-0.179	0.372	0.193	0.325	1.187	9.892	80.222

以所选取的第1、第2、第3和第4主成分的贡献率 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 作为权数,构建综合评价模型: $F = \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + \alpha_3 Z_3 + \alpha_4 Z_4$,即 $F = 0.37439Z_1 + 0.19243Z_2 + 0.13647Z_3 + 0.09892Z_4$ 。

式中: F 为综合评价指标,分别代入,得出个综合评价价值 F (表8)。

2.4 有色大麦种子物理指标和种子活力指标回归建模

2.4.1 综合评价 F 值与各物理因子的关系

基于逐步回归分析方法,建立综合评价指标 F 值与粒长(X_1)、粒宽(X_2)、粒厚(X_3)、千粒重(X_4)、

IOD(X_5)、Dr(X_6)、Dg(X_7)、Db(X_8)、 H (X_9)、 a (X_{10})、 M (X_{11})和 Y (X_{12})等因子的数学模型:

$$Y = -8.872 + 0.325X_1 + 0.584X_2 + 0.24X_3 + 0.025X_4 + 0.01X_5 + 0.013X_7 + 0.001X_8 + 0.001X_9 + 0.023X_{10} - 0.013X_{12}$$

$$(N = 44, R = 1.000^{**},$$

$$R_1 = 0.200^{**}, R_2 = 0.150^{**}, R_3 = 0.046^{**},$$

$$R_4 = 0.136^{**}, R_5 = 0.215^{**}, R_7 = 0.236^{**},$$

$$R_8 = 0.239^{**}, R_9 = 0.139^{**}, R_{10} = 0.157^{**},$$

$$R_{12} = -0.089^{**}) \quad (5)$$

表 8 F 值及各指标预测值与真实值
Table 8 F value and germination characteristics of predicted value and true value

编号 Code	F 值		发芽势		发芽率/%		发芽指数		活力指数	
	F value		Germination potatom		Germination rate		Germination index		Vigor index	
	计算值 Calculated value	预测值 Predictive value	计算值 Calculated value	预测值 Predictive value	计算值 Calculated value	预测值 Predictive value	计算值 Calculated value	预测值 Predictive value	计算值 Calculated value	预测值 Predictive value
XZDM-701	-0.88	-0.88	60.00	54.24	71.33	70.54	13.15	12.47	60.20	76.73
XZDM-754	-0.37	-0.37	76.67	61.67	82.67	75.06	16.81	14.42	129.63	107.39
XZDM-788	0.96	0.97	31.33	47.77	57.33	63.22	8.91	10.87	41.08	76.56
XZDM-812	1.33	1.32	50.67	44.79	70.67	59.90	12.22	10.13	88.81	76.20
XZDM-815	0.46	0.45	34.00	47.34	52.00	62.64	7.60	10.76	29.64	77.35
XZDM-818	0.05	0.05	52.00	54.91	64.00	67.52	11.96	12.74	68.41	106.42
XZDM-819	0.35	0.35	51.33	52.32	60.00	68.29	9.31	12.00	52.25	77.35
XZDM-854	-0.34	-0.34	44.00	49.19	60.67	64.84	10.01	11.22	64.73	76.56
XZDM-860	1.84	1.83	24.00	56.47	38.00	69.24	6.03	13.12	43.46	106.77
XZDM-917	0.53	0.53	38.67	41.13	41.33	55.79	6.69	9.22	33.67	75.94
XZDM-926	-0.39	-0.38	56.00	51.98	70.67	68.02	12.30	11.91	66.13	76.38
XZDM-957	-1.06	-1.06	64.00	67.61	86.00	82.46	16.65	15.87	98.21	102.10
XZDM-972	0.30	0.30	76.00	54.21	83.33	70.51	17.22	12.47	140.27	76.64
XZDM-973	0.53	0.55	81.33	57.35	84.00	70.43	20.24	13.34	154.31	105.28
XZDM-990	-0.79	-0.79	68.67	61.26	75.33	74.74	12.73	14.31	86.73	106.24
XZDM-996	-0.60	-0.59	60.00	48.23	66.00	63.83	11.93	10.98	60.99	75.85
XZDM-1027	0.39	0.39	48.00	39.25	68.00	53.56	10.60	8.75	62.09	76.64
XZDM-1028	0.40	0.40	29.33	52.85	60.00	68.95	9.23	12.13	42.04	76.82
XZDM-1029	-1.79	-1.79	74.67	65.28	79.33	79.39	16.66	15.31	124.03	105.54
XZDM-1030	-0.89	-0.89	51.33	61.67	70.00	75.06	11.87	14.42	73.84	107.39
XZDM-1042	1.02	1.02	25.33	41.23	48.67	55.86	6.72	9.24	144.28	76.20
XZDM-1044	0.17	0.17	64.67	54.55	74.67	66.99	13.47	12.65	76.34	107.39

表 8(续)

编号 Code	F 值 F value		发芽势 Germination potatium		发芽率/% Germination rate		发芽指数 Germination index		活力指数 Vigor index	
	计算值 Calculated	预测值 Predictive	计算值 Calculated	预测值 Predictive	计算值 Calculated	预测值 Predictive	计算值 Calculated	预测值 Predictive	计算值 Calculated	预测值 Predictive
	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value
XZDM-1046	-0.14	-0.14	68.00	55.04	74.00	67.62	14.10	12.77	67.86	106.77
XZDM-1147	-0.02	-0.02	60.00	62.78	77.33	76.43	13.40	14.69	97.93	106.51
XZDM-1266	1.43	1.43	61.33	63.81	72.00	77.48	14.02	14.95	90.96	107.39
XZDM-1318	-1.36	-1.37	55.33	67.60	69.33	82.20	9.92	15.87	114.75	104.04
XZDM-1332	0.58	0.57	79.33	63.81	82.67	77.48	16.93	14.95	96.33	107.39
XZDM-1345	1.17	1.18	62.00	57.97	74.67	71.17	15.79	13.49	103.35	105.01
XZDM-1353	-0.6	-0.61	37.33	61.58	60.00	74.99	9.92	14.39	89.03	107.13
XZDM-1378	0.36	0.36	59.33	63.64	65.33	77.60	12.53	14.90	60.97	104.92
XZDM-1386	0.01	0.04	54.67	59.43	74.67	72.81	13.02	13.85	115.16	105.10
XZDM-1395	0.34	0.34	39.33	49.68	58.67	65.47	10.70	11.34	72.77	75.94
XZDM-1401	-1.46	-1.47	68.00	64.08	82.00	77.94	16.68	15.01	93.44	106.16
XZDM-1404	-1.83	-1.83	61.33	66.15	92.00	80.32	17.49	15.52	99.48	105.98
XZDM-1405	0.07	0.07	70.00	62.59	80.00	76.28	17.07	14.64	147.02	105.98
XZDM-1411	-0.63	-0.64	58.00	60.96	68.00	74.25	13.98	14.24	133.63	107.39
XZDM-1430	-0.03	-0.02	60.00	59.28	79.33	72.44	15.47	13.82	202.62	106.68
XZDM-1431	-0.59	-0.59	66.67	63.62	92.67	77.33	17.68	14.90	209.59	106.86
XZDM-1521	0.16	0.16	62.00	48.67	78.00	64.18	13.45	11.09	130.32	77.08
XZDM-1543	-1.05	-1.05	50.67	60.06	80.67	73.30	14.03	14.01	103.81	106.86
XZDM-1545	1.44	1.44	58.67	53.16	68.67	69.19	13.52	12.21	119.45	77.70
XZDM-1546	-0.36	-0.36	63.33	60.19	65.33	73.40	13.79	14.05	82.77	107.21
XZDM-1559	1.33	1.33	50.67	44.24	66.67	59.21	12.89	9.99	91.54	84.36
XZDM-1606	-0.05	-0.05	56.67	51.03	68.67	66.77	11.98	11.68	78.28	94.47

从式(5)可以看出,影响综合评价指标 F 值的主要物理指标是粒长、粒宽、粒厚、千粒重、IOD、Dg、Db、 H 、 a 和 Y 值,其中 Y 值(X_{12})达极显著负相关,其余各指标均为极显著正相关;Dr 值和 M 值对综合评价指标 F 值无影响,其计算值与预测值见表 8。

2.4.2 发芽势与各物理因子的关系

基于逐步回归分析法,建立发芽势与粒长(X_1)、粒宽(X_2)、粒厚(X_3)、千粒重(X_4)、IOD(X_5)、Dr(X_6)、Dg(X_7)、Db(X_8)、 H (X_9)、 a (X_{10})、 M (X_{11})和 Y (X_{12})等因子的数学模型:

$$Y = 68.796 - 0.032X_9 - 0.712X_{10}$$

$$(N = 44, R = 0.537^*, R_0 = -0.347^{**},$$

$$R_{10} = -0.303^*) \quad (6)$$

从式(6)可以看出,影响发芽势的主要物理指标是颜色 H 值和 a 值,同时,还可以看出发芽势与 H 值和 a 值呈负相关,根据标准差误差检验,该方程通过了 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验,表明发芽势随 H 值和 a 值的增大而降低,其中, H 值对发芽势的影响达到极显著水平($P<0.01$), a 值对发芽势的影响达到显著水平($P<0.05$)其实测值与预测值见表 8。

2.4.3 发芽率与各物理因子关系

基于逐步回归分析法,建立发芽率与粒长(X_1)、粒宽(X_2)、粒厚(X_3)、千粒重(X_4)、IOD(X_5)、Dr(X_6)、Dg(X_7)、Db(X_8)、 H (X_9)、 a (X_{10})、 M (X_{11})和 Y (X_{12})等因子的数学模型:

$$Y = 83.132 - 0.025X_9 - 0.807X_{10}$$

$$(N = 44, R = 0.595^*, R_0 = -0.344^*,$$

$$R_{10} = -0.407^{**}) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,影响发芽率的主要物理指标是颜色 H 值和 a 值,同时,还可以看出发芽率与 H 值和 a 值呈负相关,根据标准差误差检验,该方程通过了 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验,表明发芽率随 H 和 a 值的增大而降低,其中, H 值对发芽率的影响达到显著水平($P<0.05$), a 值对发芽率的影响达到极显著水平($P<0.01$),其实测值与预测值见表 8。

2.4.4 发芽指数与各物理因子的关系

基于逐步回归分析法,建立发芽指数与粒长(X_1)、粒宽(X_2)、粒厚(X_3)、千粒重(X_4)、IOD(X_5)、Dr(X_6)、Dg(X_7)、Db(X_8)、 H (X_9)、 a (X_{10})、 M (X_{11})和 Y (X_{12})等因子的数学模型:

$$Y = 16.183 - 0.008X_9 - 0.117X_{10}$$

$$(N = 44, R = 0.584^*, R_0 = -0.413^{**},$$

$$R_{10} = -0.323^*) \quad (8)$$

从式(8)可以看出,影响发芽指数的主要物理指标是颜色 H 值和 a 值,同时,还可以看出发芽率与 H 值和 a 值呈负相关,根据标准差误差检验,该方程通过了 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验,表明发芽指数随 H 和 a 值的增大而降低,其中, H 值对发芽指数的影响达到极显著水平($P<0.01$), a 值对发芽指数的影响达到显著水平($P<0.05$),其实测值与预测值见表 8。

2.4.5 活力指数与各物理因子的关系

基于逐步回归分析法,建立活力指数与粒长(X_1)、粒宽(X_2)、粒厚(X_3)、千粒重(X_4)、IOD(X_5)、Dr(X_6)、Dg(X_7)、Db(X_8)、 H (X_9)、 a (X_{10})、 M (X_{11})和 Y (X_{12})等因子的数学模型:

$$Y = 107.389 - 0.088X_9$$

$$(N = 44, R = 0.366^*, R_0 = -0.366^*) \quad (9)$$

从式(9)可以看出,影响活力指数的主要物理指标是颜色 H 值,同时,还可以看出活力指数与 H 值呈负相关,根据标准差误差检验,该方程通过 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验,表明活力指数随 H 值的增大而降低,其中, H 值对发芽指数的影响达到显著水平($P<0.05$),其实测值与预测值见表 8。

3 讨论

播种成苗是关系到种植业生产成败的首要环节,特别是高活力的种子,已成为精准农业的重要组成部分。高活力的种子具有田间出苗率高、节省播种费用、抵抗不良环境条件和抵抗低温能力强,适于早播,同时还能够增强对病虫害的竞争能力、增加作物产量和提高种子耐藏性等,而种子活力的高低主要受遗传因素和环境因素的共同影响^[28-29]。

本试验结果表明,种子的粒长、粒宽、粒厚和千粒重与种子各发芽指标关系不明显($P>0.05$),这与王晶等^[30]研究的不同玉米品种结果一致,但时伟芳等^[27]通过研究不同春小麦品种发现,粒长、粒宽、粒厚和千粒重与小麦种子活力呈负相关,贾佳等^[31]通过研究不同品种的小麦,同样发现小麦种子的宽度与发芽率呈极显著负相关,Rezapour 等^[32]通过研究大、中、小粒的大豆种子发现,中粒种子的活力较高,但大粒种子对发芽率没有显著差异。小粒种子之所以活力高,可能是小粒种子比表面积大,吸水速率快,种子内部的各种营养物质和酶较易活化所致。

一般认为,种皮颜色越深,种子活力越高,且认

为成熟度越高的种子,种皮颜色越深。本试验结果表明,各颜色指标中,除Y值外,其余各颜色指标与萌发期各活力指标呈现负相关关系,且与发芽率大多呈现极显著负相关,这与时伟芳等^[25]和贾佳等^[26]研究的小麦种子结果相近,但常晖等^[33]研究表明,蒙古黄氏黑色种子活力显著高于灰绿色和棕色种子的活力,关于有色大麦种子粒色与活力的关系鲜有报道,机理也不清楚,还有待进一步研究。在本试验中,IOD值还与粒长和粒宽达极显著正相关,其机理也有待进一步研究。

主成分分析结果表明,颜色指标中Dr、Dg、Db和IOD值特征向量最高,贡献率达37.439%,种子形态指标中粒长、粒宽和千粒重特征向量较高,贡献率为19.243%。通过主成分分析,依据贡献率对各主成分进行加权,构建综合评价指标F值,F值与发芽势、发芽率和发芽指数均达到显著水平,可以用F值来评价其有色大麦种子活力的高低(表3)。通过逐步回归法,建立F值与种子各物理指标的数学方程,其预测值和计算值吻合度高。通过逐步回归分析方法,建立活力指标与种子物理因子的数学方程,除活力指数外,其余各活力指标拟合度均较高。活力指数拟合度不高的主要原因是各颜色指标与根长没有相关性,其次种子物理指标与根长相关性未达到显著水平,通过逐步回归可以看出,影响有色大麦种质活力的主要因子是颜色指标是H值和a值,且呈负相关关系。

本研究结果显示,有色大麦种质种皮颜色对种子活力的影响大于种子其他物理指标,在颜色指标中,有色大麦种质活力与H(色相)值和a(从洋红色至绿色的范围)值最为密切,且呈负相关关系,可为有色大麦种子活力鉴定和机器视觉分级精选奠定基础。

参考文献 References

[1] 王建林. 西藏高原作物栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2012
Wang J L. *Tibet Plateau Crop Cultivation* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012 (in Chinese)

[2] Nils S G J, Muehlbauer. *The Barley Genome* [M]. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018

[3] The International Barley Genome Sequencing Consortium. A physical, genetic and functional sequence assembly of the barley genome[J]. *Nature*, 2012, 491(7426): 711-716

[4] 龚凌霄. 青稞全谷物及其防治代谢综合征的作用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013
Gong L X. Studies on whole grain of Tibetan hull-less barley and its effect on metabolic syndrome[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese)

[5] 徐菲, 党斌, 杨希娟, 吴昆仑, 迟德钊. 不同青稞品种的营养品质评价[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(9): 1249-1257
Xu F, Dang B, Yang X J, Wu K L, Chi D Z. Evaluation of nutritional quality of different hullless barleys[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(9): 1249-1257 (in Chinese)

[6] 刘清斌, 刘达玉, 冯治平, 黄单. 青稞酒及其生产技术[J]. 食品研究与开发, 2002, 23(4): 45-47
Liu Q B, Liu D Y, Feng Z P, Huang D. Green barley wine and its production technology[J]. *Food Research and Development*, 2002, 23(4): 45-47 (in Chinese)

[7] 扎桑拉姆. 浅析青稞原料主要营养成分与青稞产业的发[J]. 西藏科技, 2006, (10): 6-7, 55
Zhasanglamu. Analysis on the main nutrients of green barley raw materials and the development of barley industry[J]. *Tibet Science and Technology*, 2006, (10): 6-7, 55 (in Chinese)

[8] Ostman E, Rossi E, Larsson H, Brighentib F, Björck I. Glucose and insulin responses in healthy men to barley bread with different levels of (1 to 3; 1 to 4)- β -glucans; predictions using fluidity measurements of in vitro enzyme digests[J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 43(2): 230-235

[9] Mullick D B, Fairs D G, Brink V C, Acheson R M. Anthocyanins and anthocyanidins of the barley pericarp and aleurone tissues[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1958, 38(4): 445-456

[10] Abdel-Aal E S M, Young J C, Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple and red cereal grains [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(13): 4696-4704

[11] Seeram N P, Momin R A, Nair M G, Bourquin L D. Cyclooxygenase inhibitory and antioxidant cyanidin glycosides in cherries and berries[J]. *Phytomedicine*, 2001, 8(5): 362-9

[12] Katsuzaki H, Hibasami H, Ohwaki S, Ishikawa K, Imai K, Date K, Kimura Y, Komiya T. Cyanidin-3-O- β -D-glucoside isolated from skin of black Glycine max and other anthocyanins isolated from skin of red grape induce apoptosis in human lymphoid leukemia Molt 4B cells[J]. *Oncology Reports*, 2003, 10(2): 297-300

[13] Hyun J W, Chung H S. Cyanidin and malvidin from *Oryza sativa* cv Heugjinju-byeo mediate cytotoxicity against human monocytic leukemia cells by arrest of G(2)/M phase and induction of apoptosis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(8): 2213-2217

[14] Fimognari C, Berti F, Nusse M, Forti G C, Hrelia P, Hrelia P. In vitro antitumor activity of cyanidin-3-O- β -glucopyranoside [J]. *Chemotherapy*, 2005, 51(6): 332-335

[15] Chen P K, Chu S C, Chiou H L, Chu S C, Chiou H L, Kuo W

- H, Chiang C L, Hsieh Y S. Mulberry anthocyanins, cyanidin-3-rutinoside and cyanidin-3-glucoside, exhibited an inhibitory effect on the migration and invasion of a human lung cancer cell line[J]. *Cancer Letters*, 2006, 235(2): 248-259
- [16] Shen M, Li K, Jing H, Zheng L. In vivo therapeutic effect of vaccinium Meridionale Swartz in ischemia-reperfusion induced male albino rats[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(1): 221-228
- [17] Fattore M, Montesano D, Pagano E, Teta R, Borrelli F, Mangoni A, Seccia S, Albrizio S. Carotenoid and flavonoid profile and antioxidant activity in "Pomodoro Vesuviano" tomatoes [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2016, 53: 61-68
- [18] Nascimento K, Sattler J A, Macedo L F L, Muradian L B A. Phenolic compounds, antioxidant capacity and physicochemical properties of *Brazilian Apis mellifera* honeys[J]. *LWT-Food science and technology*, 2018, 91: 85-94
- [19] Dao P T, Ram H H. Genetics of seed longevity in soybean[J]. *Soybean Science*, 1999, 18(4): 312-317
- [20] Atak M, Kaya M, Kaya G, Kaya M, Khalid A, Khawar K M. Dark green colored seeds increase the seed vigor and germination ability in dry green pea (*Pisum sativum* L.) [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2008, 40(6): 2345-2354
- [21] 李贺勤, 张文健, 江绪文, 林琪. 种子大小和种皮颜色对甘蓝种子活力的影响[J]. *种子*, 2013, 32(10): 46-49
- Li H Q, Zhang W J, Jiang X W, Lin Q. Effects of seed size and seed coat colour on seed vigor of *Brassica oleracea* L var *capitata* L[J]. *Seed*, 2013, 32(10): 46-49 (in Chinese)
- [22] 齐雪峰, 孙群, 杨力钢, 王建华, 孙宝启. 种皮颜色对乌拉尔甘草种子质量的影响[J]. *种子*, 2007, 26(7): 31-33
- Qi X F, Sun Q, Yang L G, Wang J H, Sun B Q. Effect of seed-coat color on seed quality of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch[J]. *Seed*, 2007, 26(7): 31-33 (in Chinese)
- [23] 邹吉祥, 金华, 朴仁哲, 刘磊, 姜国斌, 王颖, 王艳丽. 不同颜色羊草种子对其发芽率及愈伤组织诱导的影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(3): 1501-1503
- Zou J X, Jin H, Pu R Z, Liu L, Jiang G B, Wang Y, Wang Y L. Seed germination and callus induction in *leymus chinensis* of different seed colors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(3): 1501-150 (in Chinese)
- [24] Anuradha R, Balamurugan P, Srimathi P, Sumathi S. Influence of seed coat colour variations on seed quality in bengalgram cv CO 4 (*Cicer arietinum* L.) [J]. *Legume Research*, 2009, 32(2): 136-138
- [25] 时伟芳, 贾佳, 冯鹏飞, 谢宗铭, 杨丽明, 王建华, 孙群. 春小麦种子物理指标与种子活力关系的初步分析[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(7): 1-12
- Shi W F, Jia J, Feng P F, Xie Z M, Yang L M, Wang J H, Sun Q. Preliminary analysis on correlations between seed vigor and physical traits of spring wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(7): 1-12 (in Chinese)
- [26] 贾佳, 王建华, 谢宗铭, 杨丽明, 孙宝启, 孙群. 小麦种子物理参数和萌发阶段抗旱性关系的研究[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(12): 1661-1666
- Jia J, Wang J H, Xie Z M, Yang L M, Sun B Q, Sun Q. Relationship between physical parameters and drought resistance of wheat seed at germination stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(12): 1661-1666 (in Chinese)
- [27] Filho F, Carvalho N, Moro F. Relationship between physical, morphological, and physiological characteristics of seeds developed at different positions of the ear of two maize (*Zea mays* L) hybrids[J]. *Seed Science and Technology*, 2002, 30(1): 97-106
- [28] 胡晋. 种子生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- Hu J. *Seed Biology* [M]. Beijing: Higher education press, 2006 (in Chinese)
- [29] Abati J, Brzezinski C R, Zucareli C, Foloni J S S, Henning F A. Growth and yield of wheat in response to seed vigor and sowing densities[J]. *Revista Caatinga*, 2018, 31(4): 891-899
- [30] 王晶. 玉米种子理化性状与种子活力的关系[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017
- Wang J. Relationship between physical and chemical properties of maize seeds and seed vigor [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [31] 贾佳, 王建华, 谢宗铭, 杨丽明, 孙宝启, 孙群. 计算机图像识别技术在小麦种子精选中的应用[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(5): 180-186
- Jia J, Wang J H, Xie Z M, Yang L M, Sun B Q, Sun Q. Wheat seeds selection based on computer image recognition technique [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(5): 180-186 (in Chinese)
- [32] Rezapour R, Hamdollah K A, Yarnia M, Parisa Z M. Effect of seed size on germination and seed vigor of two soybean (*glycin max* L) cultivars [J]. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2013, 4(11): 3396-3401
- [33] 常晖, 程秋香, 李吟平, 张跃进, 张小燕. 黄芪种子种皮颜色和大小与种子活力相关性研究[J]. *种子*, 2015, 34(8): 95-97, 104
- Chang H, Chen Q X, Li Y P, Zhang Y J, Zhang X Y. Study on the correlation between seed size, seed coat colour and seed vigor of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge Var *Mongholicus* (Bge) Hsia [J]. *Seed*, 2015, 34(8): 95-97, 104 (in Chinese)