

燕麦种质资源重要农艺性状适应性和稳定性评价

陈新^{1,2}, 吴斌¹, 张宗文^{1,2}

(¹中国农业科学院作物科学研究所/Bioversity-CAAS 农业生物多样性中心, 北京 100081; ²国际生物多样性中心东亚办事处, 北京 100081)

摘要:为客观评价燕麦种质资源重要农艺性状的适应性和稳定性,本研究利用加权隶属函数法分析了 81 份燕麦种质材料在 7 个试验点的株高等 7 个重要农艺性状的遗传差异,以加权隶属函数值(*D* 值)构建基因型 × 环境的 GGE 双标图,分析裸燕麦、皮燕麦在不同试验点的适应性和稳定性。结果表明:主穗粒重是裸燕麦材料在所有试验点中变异程度最大的性状,有效分蘖数是皮燕麦中变异程度最大的性状,其余 5 个性状的变异程度与皮裸性几乎无关;加权隶属函数法结合 GGE 双标图在对燕麦农艺性状进行综合分析时具有很好的应用价值;坝苽三号、73014-336、二苽麦、Bauntebue、坝燕一号等材料可用于实际生产,其中的坝苽三号、坝燕一号已是当下河北等地区的主栽品种;晋 8609-1、LY03-02、二秋苽麦、64 燕麦、品 16、Banner、LY01-12 等可作为杂交育种的亲本材料。

关键词:燕麦;适应性;稳定性;加权隶属函数;GGE 双标图

Evaluation of Adaptability and Stability for Important Agronomic Traits of Oat (*Avena* spp.) Germplasm Resources

CHEN Xin^{1,2}, WU Bin¹, ZHANG Zong-wen^{1,2}

(¹ Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Bioversity-CAAS Center of Excellence for Agrobiodiversity, Beijing 100081; ² East Asia Office of Bioversity International, Beijing 100081)

Abstract: For comprehensive and objective evaluation of the adaptability and stability for important agronomic traits of oat germplasm resources, 81 accessions of oat including naked oat and hulled oat were involved in this study, and genetic differences of seven important agronomic traits such as plant height in seven test sites were investigated and analyzed. On the basis of *D* value, a weighted subordinate function value, series of GGE biplot of genotype × environment were built with GGE biplot V6.3, and the adaptation and stability of 81 tested oat accessions in different test sites were analyzed according to distribution and relationship of oat accessions and test sites on above biplots. Results showed that grain weight of main ear was the trait with the largest variable coefficient among tested accessions of naked oat in all tested sites, and the number of effective tillers was the largest variable trait among tested accessions of hulled oat, and the rest five traits with no difference between naked oat and hulled oat. It was demonstrated that the method of weighted subordinate function in combination with GGE biplot would have good prospect in comprehensive analysis of oat agronomic traits. These accessions including Bayou No. 3, 73014-336, Er Youmai, Bauntebue and Bayan No. 1 would be cultivated well in the seven test sites at least, in which Bayou No. 3 and Bayan No. 1 have been selected as main oat variety in Hebei Province. Such accessions as Jin 8609-1, LY03-02, Erqiu Youmai, 64 Yanmai, Pin 16, Banner and LY01-12 may be fit for breeding.

Key words: *Avena* spp.; adaptability; stability; weighted subordinate function; GGE biplot

收稿日期: 2015-09-14 修回日期: 2015-10-13 网络出版日期: 2016-06-08

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20160608.1427.010.html>

基金项目: 国际生物多样性中心合作项目 (CCAFS: APO12/003); 农业部作物种质资源保护专项 (NB2012-2130135-25-06); 国家燕麦荞麦产业技术体系 (CARS-08-A-3)

第一作者主要从事小宗作物抗逆性研究。E-mail: chenxin200824@163.com

通信作者: 张宗文, 主要从事小宗作物种质资源研究。E-mail: zhangzongwen@caas.cn

燕麦(*Avena* spp.)是粮、饲、药兼用的一年生草本植物,生产上广泛种植的是裸燕麦(*A. nuda* L.)和皮燕麦(*A. sativa* L.)^[1]。中国以种植裸燕麦为主,主要用作粮食;燕麦种植区主要集中在西北、华北、西南等地区的高海拔、干旱和冷凉地带^[2]。燕麦营养丰富,市场需求旺盛;同时,较强的适应性和抗旱、耐盐碱等特性使其成为应对气候变化的“先锋作物”和部分地区的保粮作物。因此,对于改善人们膳食营养、保障粮食安全,广泛收集和鉴定、评价燕麦种质资源是很有必要的。

基因型主效加基因型与环境互作效应模型(GGE, genotype main effects and genotype-environment interaction effects)的数据通过双标图的直观体现便有了GGE双标图,但是最初它只是被用来分析作物品种与环境间的互作效应^[3]。后来,W. K. Yan等^[4]在分析方法上取得突破,通过在GGE双标图上作辅助线可获取更多信息。发展至今,GGE双标图不仅用于品种区域试验分析^[5-6],还可用于分析寄主与病原物互作^[7]、双列杂交试验^[8]、QTL与环境互作^[9]、不同种植密度与产量的关系^[10-11]、不同性状指标与耐低温性的关系^[12]等2个或2个以上因素互作的两向数据资料。GGE双标图在燕麦相关研究中有广泛应用,诸如不同灭酶工艺对裸燕麦品质的影响^[13]、环境对皮燕麦农艺性状间遗传关系的影响^[14]、2006-2008年国家燕麦品种区域试验^[15]、性状指标与抗旱性的关系^[16-17]等。虽然加权隶属函数法在燕麦抗旱性^[17]、耐盐碱性^[18]等综合评价中应用广泛,但利用加权隶属函数并结合GGE双标图综合分析燕麦多点试验中的农艺性状还未见报道。鉴于此,本研究通过加权隶属函数法分析2011年81份燕麦材料在7个试验点的株高等7个重要农艺性状的遗传变异,然后以加权隶属函数值构建GGE双标图,进而分析参试燕麦种质材料在不同试验点的适应性、稳定性,旨在为燕麦栽培和遗传育种筛选适应性强、遗传稳定的种质材料,同时为燕麦种质资源适应性和稳定性评价提供方法借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试燕麦种质材料81份,包括62份裸燕麦(编号L01~L62)和19份皮燕麦(编号P01~P19),均为中国燕麦核心种质^[19]。试验用种均由中国农业

科学院国家农作物种质资源保存中心提供。

1.2 试验方法

于2011年分别在内蒙古赤峰(CF)、四川凉山(LS)、青海海东(HD)、内蒙古乌兰察布(WL)、新疆昌吉(CJ)、新疆塔城(TC)、河北张家口(ZJK)7个试验点种植。各试验点田间设计均为顺序排列,不设重复,小区大小为6 m×2 m,行长6 m,行距0.25 m,条播,播种量为70粒/m。播种期同当地正常播种期,田间管理按照当地农事管理习惯进行。严格依据《燕麦种质资源描述规范和数据标准》^[20]分别记录播种期、成熟期,调查株高、有效分蘖数、穗轮层数、主穗小穗数、主穗粒重、千粒重。

1.3 数据整理与分析

由于皮燕麦有稃皮而裸燕麦没有,像主穗粒重、千粒重等产量相关性状,皮燕麦这些性状的观测值一般比裸燕麦的偏大;也因为稃皮的有无,皮燕麦与裸燕麦之间的性状比较对实际生产无多大意义。张志芬等^[15]曾研究指出,裸燕麦与皮燕麦相比,其生育期长、穗长、穗粒数多,而皮燕麦的穗粒重、千粒重、小区产量比裸燕麦偏大。因此,在本研究中,按皮裸性分别进行数据整理与分析。

利用Excel 2007按皮裸性分别整理株高、有效分蘖数等7个性状的观测值。利用隶属函数法将种质材料在各试验点的观测值按性状分别转换为隶属函数值,以某性状的变异系数在所有性状变异系数中所占比率为该性状的权重,进而计算种质材料在各试验点下包含所有性状的加权隶属函数值(D 值),再以 D 值建立种质材料—试验点两向数据表,然后利用GGE biplot V6.3作双标图进行适应性、稳定性等相关分析。

$$\mu(X_{ijk}) = (X_{ijk} - X_{ijk \min}) / (X_{ijk \max} - X_{ijk \min})$$

$$(i, j, k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$W_k = CV_k / \sum_{k=1}^n CV_k \quad (2)$$

$$D_{ij} = \sum [\mu(X_{ijk}) \cdot W_k] \quad (3)$$

式中, X_{ijk} 为种质 i 在试验点 j 下性状 k 的观测值, $X_{ijk \max}$ 、 $X_{ijk \min}$ 分别为性状 k 观测值中的最大值和最小值, $\mu(X_{ijk})$ 为各观测值 X_{ijk} 的隶属函数值并由公式(1)计算; CV_k 为性状 k 的变异系数, W_k 为 CV_k 在总变异中所占比率,见公式(2)并以 W_k 表示性状 k 在所有性状中的权重; D_{ij} 表示种质 i 在试验点 j 下包含所有性状的加权隶属函数值,由公式(3)计算。

2 结果与分析

2.1 燕麦种质重要农艺性状的变异

如表 1、表 2 所示,裸燕麦和皮燕麦 7 个性状之间存在差异,尤其是主穗粒重、千粒重,皮燕麦的平均主穗粒重约为裸燕麦的 1.32 倍,皮燕麦的平均千

粒重约为裸燕麦的 1.27 倍。就变异系数而言,主穗粒重、有效分蘖数在所有燕麦品种和试验点中变异程度最大;其他 5 个性状的变异程度在皮燕麦、裸燕麦之间几乎无差异,其中株高、生育日数表现最为稳定。基于变异系数的单个性状在性状综合中的权重与变异系数的变化对应一致。

表 1 裸燕麦重要农艺性状的比较

Table 1 Comparison of important agronomic traits of naked oat

项目 Item	生育日数 (d) Growing days	株高 (cm) Plant height	主穗小穗数 No. of spikelet	主穗粒重(g) Grain weight per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	有效分蘖数 No. of tillers	穗轮层数 No. of ear layer
最大值 Max.	152	188.60	100.00	5.12	47.60	9.50	8.80
	L37/L40 (HD)	L53 (CJ)	L56 (WL)	L28 (ZJK)	L25 (CJ)	L13 (CF)	L29/L30 (ZJK)
最小值 Min.	85	65.00	10.00	0.12	8.43	0.50	3.00
	L10/L11/L16 (CF)	L59 (CF)	L30 (WL)	L34 (CJ)	L53 (TC)	L39 (CJ, TC)	L45 (CJ), L47 (WL), L38/L59 (TC)
平均值 Mean	106.3	125.12	42.15	1.83	23.00	3.42	6.01
标准差 S	17.4029	17.6744	12.9024	0.7737	5.3162	1.3885	1.2482
变异系数 CV	0.1637	0.1413	0.3061	0.4239	0.2311	0.4054	0.2075
权重 Weight	0.0871	0.0751	0.1629	0.2256	0.1230	0.2158	0.1105

表 2 皮燕麦重要农艺性状的比较

Table 2 Comparison of important agronomic traits of hulled oat

项目 Item	生育日数 (d) Growing days	株高 (cm) Plant height	主穗小穗数 No. of spikelet	主穗粒重(g) Grain weight per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	有效分蘖数 No. of tillers	穗轮层数 No. of ear layer
最大值 Max.	152	165.70	77.60	5.08	54.95	11.00	9.80
	P10 (HD)	P11 (HD)	P02 (LS)	P02 (ZJK)	P02 (LS)	P03 (CF)	P02 (ZJK)
最小值 Min.	88	67.00	16.00	0.81	13.00	1.20	3.00
	P16 (TC)	P19 (CF)	P19 (WL)	P19 (HD)	P12 (ZJK)	P02 (CJ, TC)	P19 (TC)
平均值 Mean	106.7	121.95	46.05	2.41	29.19	3.70	5.98
标准差 S	17.7149	18.9358	13.9627	0.9307	6.3959	1.4880	1.1677
变异系数 CV	0.1661	0.1553	0.3032	0.3868	0.2191	0.4022	0.1952
权重 Weight	0.0909	0.0849	0.1659	0.2116	0.1199	0.2201	0.1068

裸燕麦 7 个性状的变异程度排序依次为主穗粒重 > 有效分蘖数 > 主穗小穗数 > 千粒重 > 穗轮层数 > 生育日数 > 株高,主穗粒重变异程度最大,达 42.39%;株高最为稳定,其变异系数约为主穗粒重的 1/3。以主穗粒重为例,最大值是材料 L28 在试验点 ZJK 的主穗粒重,为 5.12 g;最小值是材料 L34 在试验点 CJ 的主穗粒重,仅为 0.12 g。

皮燕麦 7 个性状的变异程度排序依次为有效分蘖数 > 主穗粒重 > 主穗小穗数 > 千粒重 > 穗轮层数 > 生育日数 > 株高,变异程度最大的是有效分蘖数,变异系数为 40.22%;株高的变异最小,其变异

系数仅为 15.53%。以有效分蘖数为例,最大值是材料 P03 在试验点 CF 的有效分蘖数,为 11.00 个;最小值是材料 P02 在试验点 CJ 或 TC 的有效分蘖数,仅为 1.20 个。

2.2 燕麦种质重要农艺性状综合表现的差异

裸燕麦和皮燕麦农艺性状的加权隶属函数值 (D 值)及其变异系数如表 3、表 4 所示。在 7 个试验点中,裸燕麦和皮燕麦在试点 HD 的 D 值变异系数均最小,即参试的裸燕麦和皮燕麦材料对试点 HD 的环境条件不敏感,因此材料间的差异最小;裸燕麦在试点 TC 的 D 值变异系数最大,皮燕麦在试点 ZJK 的 D 值变异系数最大。

表 3 裸燕麦种质材料名称、地理来源及其农艺性状的加权隶属函数值(D 值)

Table 3 Name and geographic origin of naked oat accessions, and their weighted subordinate function values of agronomic traits

编号 Code	名称 Name	来源地 Origin	CF	LS	HD	WL	CJ	TC	ZJK	平均值 Average	变异系数 CV
L28	73014-336	中国山西	0.4145	0.5337	0.4811	0.4340	0.3480	0.3345	0.5813	0.4467	0.2052
L50	二莠麦	中国山西	0.4611	0.2805	0.3903	0.4041	0.6170	0.5549	0.3866	0.4421	0.2563
L19	坝莠三号	中国河北	0.3899	0.3982	0.5555	0.3940	0.4459	0.4068	0.4856	0.4394	0.1407
L23	晋 8609-1	中国山西	0.4814	0.3660	0.4198	0.4604	0.4502	0.4008	0.4324	0.4301	0.0902
L25	坝莠 10 号	中国河北	0.3382	0.3989	0.4796	0.4046	0.4987	0.4448	0.4236	0.4269	0.1262
L27	品 2	中国内蒙古	0.3843	0.3695	0.5268	0.4676	0.4548	0.3936	0.3786	0.4250	0.1390
L02	VII40-7	中国内蒙古	0.5064	0.4011	0.4366	0.3766	0.3843	0.3754	0.4837	0.4234	0.1265
L43	燕麦	中国山西	0.3502	0.4041	0.4261	0.3370	0.4916	0.4504	0.4730	0.4189	0.1409
L09	品 12	中国河北	0.4658	0.3899	0.4567	0.3352	0.4504	0.4185	0.4047	0.4173	0.1100
L22	7920/4/1	中国山西	0.4559	0.3966	0.4287	0.4185	0.4326	0.3973	0.3811	0.4158	0.0619
L17	同系四五六号	中国山西	0.5008	0.4415	0.3763	0.3487	0.4067	0.3684	0.4567	0.4142	0.1320
L14	578	中国河北	0.3917	0.4176	0.4447	0.4696	0.4027	0.3724	0.3996	0.4140	0.0802
L24	燕 2004	中国河北	0.4372	0.5579	0.4468	0.3506	0.4028	0.3518	0.3470	0.4134	0.1843
L13	74039-137	中国山西	0.5007	0.4154	0.4304	0.4085	0.3948	0.3318	0.4063	0.4126	0.1211
L26	80-01-5	中国山西	0.4120	0.3753	0.4501	0.3690	0.4271	0.3891	0.4412	0.4091	0.0785
L07	74047-202	中国山西	0.4352	0.4942	0.4333	0.3353	0.3163	0.3179	0.5128	0.4064	0.2048
L49	8343/7/1	中国山西	0.3064	0.3407	0.4609	0.4210	0.4663	0.3988	0.4452	0.4056	0.1515
L06	LY03-02	中国河北	0.4223	0.3701	0.4752	0.2969	0.4207	0.3927	0.4538	0.4045	0.1459
L44	品 16	中国河北	0.3981	0.3511	0.5067	0.4475	0.4335	0.3385	0.3479	0.4033	0.1554
L04	品 17	中国河北	0.3979	0.3900	0.4654	0.3494	0.4519	0.4027	0.3619	0.4027	0.1065
L61	赤 38 莠麦	中国内蒙古	0.3962	0.2152	0.4700	0.4068	0.4592	0.4086	0.4287	0.3978	0.2140
L18	S-30	德国	0.2249	0.4509	0.4322	0.3469	0.5321	0.4628	0.3303	0.3972	0.2586
L58	莠麦	中国山西	0.4792	0.2801	0.4153	0.3081	0.3785	0.3682	0.5451	0.3964	0.2343
L10	83113-6	中国山西	0.3159	0.4509	0.4373	0.4341	0.4051	0.3333	0.3541	0.3901	0.1408
L47	蒙燕 7904	中国内蒙古	0.4390	0.4189	0.4320	0.3051	0.3664	0.3157	0.4501	0.3896	0.1551
L21	2247034	中国河北	0.4564	0.4323	0.3654	0.3470	0.4042	0.3106	0.3845	0.3858	0.1299
L15	鉴 19	中国内蒙古	0.3922	0.4305	0.4214	0.3421	0.3980	0.3646	0.3260	0.3821	0.1030
L01	555	中国山西	0.3073	0.3490	0.4284	0.2943	0.4076	0.4372	0.4438	0.3811	0.1661
L29	米燕麦	中国黑龙江	0.3561	0.3604	0.4050	0.3321	0.4130	0.3243	0.4677	0.3798	0.1349
L05	品 5 号	中国河北	0.4278	0.3340	0.4558	0.4151	0.3676	0.2931	0.3356	0.3756	0.1572
L31	高 7-19	中国内蒙古	0.2875	0.4323	0.4339	0.3553	0.3703	0.3433	0.4040	0.3752	0.1405
L51	大莠麦	中国山西	0.4110	0.3760	0.3342	0.3231	0.3635	0.3337	0.4801	0.3745	0.1484
L57	高千四号	中国内蒙古	0.3131	0.4025	0.3553	0.4463	0.4070	0.3365	0.3598	0.3744	0.1234
L48	小莠麦	中国内蒙古	0.2478	0.3365	0.4073	0.4864	0.3749	0.3178	0.4043	0.3679	0.2073
L42	白燕 2 号	中国吉林	0.3753	0.4672	0.3400	0.2283	0.3647	0.3349	0.4611	0.3674	0.2222
L39	燕麦	中国云南	0.3941	0.4169	0.4192	0.3533	0.2612	0.1942	0.5296	0.3669	0.3019
L08	冀杂二号	中国河北	0.3946	0.3605	0.4385	0.3474	0.3493	0.3586	0.3182	0.3667	0.1060
L32	小莠麦	中国山西	0.2808	0.3018	0.4121	0.4223	0.4089	0.3596	0.3792	0.3664	0.1525
L11	蒙燕 7726	中国内蒙古	0.3297	0.4720	0.3973	0.2428	0.3935	0.3591	0.3412	0.3622	0.1953
L36	老莠麦	中国甘肃	0.3551	0.3323	0.3833	0.4616	0.3166	0.2863	0.3938	0.3613	0.1602
L03	9314-122	中国河北	0.3352	0.3485	0.4066	0.3751	0.2802	0.2584	0.5101	0.3592	0.2339
L62	宁莠一号	中国宁夏	0.3081	0.3323	0.3566	0.3269	0.4348	0.3872	0.3549	0.3573	0.1192
L38	吉林裸燕麦	中国吉林	0.3885	0.3382	0.3743	0.3222	0.3660	0.2799	0.3919	0.3516	0.1155
L52	二不秋莠麦	中国山西	0.3937	0.3399	0.3131	0.3450	0.3873	0.2885	0.3910	0.3512	0.1176

表 3(续)

编号 Code	名称 Name	来源地 Origin	CF	LS	HD	WL	CJ	TC	ZJK	平均值 Average	变异系数 CV
L54	蒙燕 7413	中国内蒙古	0.3113	0.3863	0.3948	0.3080	0.3483	0.2747	0.4189	0.3489	0.1525
L60	莜麦	中国山西	0.3914	0.3827	0.4066	0.2568	0.3116	0.2675	0.4092	0.3465	0.1913
L46	蒙燕 7716	中国内蒙古	0.2456	0.2873	0.4146	0.2636	0.4752	0.3652	0.3221	0.3391	0.2476
L41	大莜麦	中国河北	0.3081	0.2543	0.4004	0.3117	0.4048	0.3118	0.3447	0.3337	0.1621
L20	蒙燕 7309	中国内蒙古	0.3242	0.3072	0.4214	0.2890	0.3493	0.3050	0.2971	0.3276	0.1400
L30	张家口庆家堡莜麦	中国河北	0.3753	0.3859	0.4171	0.2752	0.2477	0.2468	0.3436	0.3274	0.2145
L35	左之大莜麦	中国山西	0.3260	0.3020	0.3278	0.3688	0.2961	0.2544	0.4134	0.3269	0.1583
L37	芋麦 L21	中国青海	0.2108	0.2258	0.4784	0.4835	0.2740	0.1915	0.4238	0.3268	0.3984
L56	白玉麦 L23	中国青海	0.3803	0.2990	0.3632	0.4124	0.2892	0.2254	0.3158	0.3265	0.1941
L34	园粒莜麦	中国山西	0.3436	0.3052	0.4119	0.3022	0.2303	0.2502	0.4057	0.3213	0.2193
L12	VII10-12	中国内蒙古	0.2874	0.3971	0.3284	0.2811	0.3693	0.3285	0.2523	0.3206	0.1594
L55	二秋莜麦	中国山西	0.2836	0.2795	0.3325	0.2978	0.3495	0.2843	0.4167	0.3206	0.1565
L40	泸西燕麦	中国云南	0.3790	0.2729	0.4655	0.2738	0.2500	0.1849	0.4158	0.3203	0.3157
L33	柳叶青	中国山西	0.2909	0.2963	0.3412	0.2812	0.3176	0.2316	0.3758	0.3049	0.1509
L45	品 7752-8-2	中国河北	0.3923	0.2500	0.3240	0.2630	0.2659	0.2752	0.3109	0.2973	0.1671
L53	五寨莜麦	中国内蒙古	0.3576	0.2800	0.3449	0.3173	0.2650	0.1868	0.3274	0.2970	0.1980
L16	D16	中国内蒙古	0.2320	0.2484	0.3639	0.2604	0.3687	0.2986	0.2793	0.2930	0.1856
L59	小莜麦	中国山西	0.1658	0.2953	0.3420	0.2783	0.3101	0.2194	0.3462	0.2796	0.2358
试验点变异系数			0.2066	0.1993	0.1264	0.1885	0.1945	0.2222	0.1665		
基于变异系数的排序			2	3	7	5	4	1	6		

表 4 皮燕麦种质材料名称、地理来源及其农艺性状的加权隶属函数值(D 值)

Table 4 Name and geographic origin of hulled oat accessions, and their weighted subordinate function values of agronomic traits

编号 Code	名称 Name	来源地 Origin	CF	LS	HD	WL	CJ	TC	ZJK	平均值 Average	变异系数 CV
P02	Bauntebue	丹麦	0.5591	0.7109	0.4411	0.4992	0.4196	0.4076	0.5844	0.5174	0.2109
P01	7641M-9	中国河北	0.4561	0.4184	0.4222	0.4500	0.4603	0.4397	0.5238	0.4529	0.0776
P17	坝燕一号	中国河北	0.4972	0.4604	0.3981	0.4279	0.4933	0.4258	0.4394	0.4489	0.0818
P16	青引一号	中国青海	0.5466	0.5055	0.4246	0.4156	0.4688	0.4337	0.2686	0.4376	0.2016
P09	PY01-02	中国吉林	0.5475	0.4922	0.3825	0.4010	0.4288	0.3896	0.4044	0.4351	0.1419
P12	PY01-09	美洲	0.4027	0.5077	0.4255	0.3609	0.4812	0.4406	0.4252	0.4348	0.1118
P10	Loevile	芬兰	0.3724	0.5225	0.4440	0.3691	0.3876	0.3074	0.4670	0.4100	0.1758
P03	Banner	丹麦	0.5376	0.4481	0.3788	0.3892	0.3329	0.3241	0.3439	0.3935	0.1939
P08	LY01-12	国外	0.4275	0.4373	0.4391	0.2777	0.3811	0.3645	0.3830	0.3872	0.1468
P14	PY01-06	美洲	0.4412	0.3849	0.4145	0.3928	0.3462	0.3050	0.4199	0.3864	0.1214
P07	LY01-08	国外	0.4308	0.5016	0.3452	0.3702	0.3083	0.2778	0.4235	0.3796	0.2045
P11	Cenad 88 Ovas	罗马尼亚	0.4946	0.3782	0.4207	0.3556	0.3156	0.2910	0.3576	0.3733	0.1818
P05	索里多尔	国外	0.3809	0.4278	0.4471	0.4961	0.2437	0.2147	0.3799	0.3700	0.2823
P04	Ronald	国外	0.3779	0.3506	0.3269	0.3070	0.4059	0.3560	0.4420	0.3666	0.1263
P13	品 16	河北	0.3610	0.3479	0.3933	0.3246	0.3307	0.2821	0.4547	0.3563	0.1550
P18	Ariane	法国	0.2799	0.3191	0.3107	0.3801	0.3836	0.3126	0.2966	0.3261	0.1232
P06	N. deMoyhcour	国外	0.3025	0.4009	0.3770	0.3435	0.2628	0.2318	0.2999	0.3169	0.1912
P15	64 燕麦	中国内蒙古	0.3369	0.3314	0.2859	0.2363	0.2270	0.1899	0.1425	0.2500	0.2892
P19	Coomallo	中国山西	0.2353	0.2921	0.2731	0.1899	0.2835	0.2068	0.1582	0.2341	0.2191
试验点变异系数			0.2261	0.2235	0.1406	0.2146	0.2216	0.2514	0.2927		
基于变异系数的排序			3	4	7	6	5	2	1		

在 62 份裸燕麦材料中, L28 在所有试点中平均 D 值最大, 而 L59 的平均 D 值最小; L37 在 7 个试验点的变异程度最大, L22 在试验点间的变异最小。在 19 份皮燕麦材料中, P02 在所有试点的平均 D 值最大, 而 P19 的平均 D 值最小; P15 在试验点间的变异最大, P01 在试验点间的变异最小。

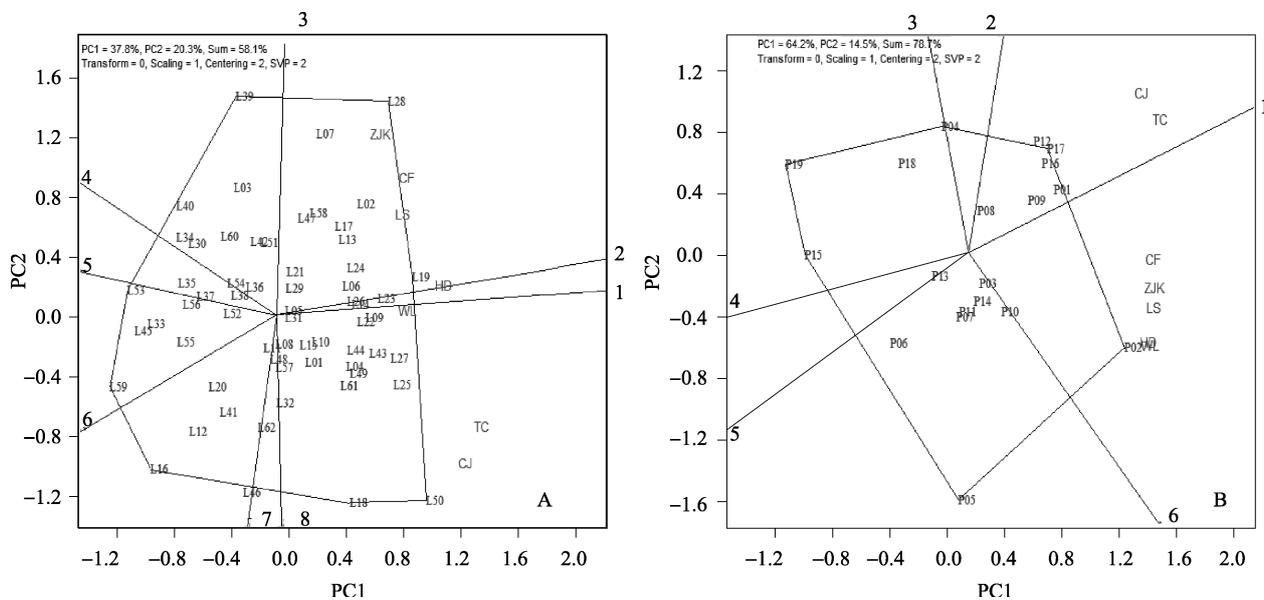
2.3 燕麦种质的适应性分析

连接同一方向上距离原点最近的种质构成多边形, 自原点作多边形各边的垂线, 这些垂线就把整个双标图划分为几个扇形区, 参试种质和试验点均被划入不同的扇形区, 参试种质在位于同一扇形区内的试验点具有较好的适应性, 位于多边形顶角的种质则在其所在扇形区内的试验点适应性最强。

如图 1A 所示, 裸燕麦种质的第一主成分 (PC1) 的效应为 37.3%, 第二主成分 (PC2) 的效应为 20.3%, GGE 双标图可以解释 G 和 GE 互作效应 58.1% 的信息。试验点 ZJK、CF、LS、HD 与 L28、L19、

L07、L02 等材料位于同一扇区, 即这些材料在上述 4 个试验点的适应性较好, 其中 L28、L19 位于该扇形区的顶角, 说明这两份材料在上述 4 个试验点的适应性最强; 试验点 WL、TC、CJ 与 L10、L50、L27、L25 等材料归属另一扇形区, 即这些材料在这 3 个试验点的适应性较强, 并且 L10、L50 在这 3 个试验点的适应性最强; 其他未与试验点划入同一扇区的材料, 则在上述 7 个试验点的适应性一般或较差。

皮燕麦种质的适应性分析如图 1B 所示, 第一主成分 (PC1) 的效应为 64.2%, 第二主成分 (PC2) 的效应为 14.5%, GGE 双标图可以解释 G 和 GE 互作效应 78.7% 的信息。材料 P12、P17、P16、P01、P08、P09 在试验点 TC、CJ 的适应性较好, 其中 P17 适应性最好; 材料 P03、P10、P02 在试验点 CF、ZJK、LS、HD 以及 WL 的适应性较强, 其中 P02 适应性最强; 其他不属于上述 2 个扇形区的材料, 则在所有 7 个试验点的适应性一般或较差。



A: 裸燕麦; B: 皮燕麦

A: Naked oat, B: Hulled oat

图 1 基于 GGE 双标图分析的燕麦种质适应性

Fig. 1 Adaptability of oat germplasm based on GGE biplot analysis

2.4 燕麦种质的稳定性及其性状综合表现

如图 2 所示, 小圆圈表示所有试验点的平均水平, 过原点和该圆圈的向量为平均环境向量 (轴)。过原点的平均环境轴的双向垂线反映的是种质与环境相互作用的倾向性, 由各材料作平均环境轴的垂线也是反映这种互作的倾向性, 垂线越长即越偏离平均环境轴, 说明该材料所考察性状受试验点环境影响越大即越不稳定; 垂线在平均环境轴上的落点

越靠前, 说明该材料的综合表现越接近或超过小圆圈所代表的平均水平。

由图 2A 可以看出, L19、L23、L06、L55、L59 等材料的稳定性较好, L50、L39、L18、L28 等材料的稳定性较差; 同时, L28、L19、L50、L27、L25、L23 等材料的性状综合表现较好, L59、L16、L53、L45、L33 等材料的性状综合表现较差; 综合考察稳定性和性状综合表现, L19、L23、L06 等材料在 7 个试验点的性

状综合表现较好且较稳定。皮燕麦种质的稳定性与性状综合表现如图 2B 所示,由图可知:P15、P13、P03、P08 等材料的稳定性较好,P05、P04、P17、P02 等品种的稳定性较差;P02、P01、P17、P16 等材料的性状综合表现较好,P19、P15、P06、P18 等材料的性状综合表现较差;综合考察,P01、P16、P09 等材料在 7 个试验点的性状综合表现较好且较稳定。

图 2A 所反映的种质材料性状综合表现与表 3 中基于种质材料 *D* 值的平均值的排序并不一致,如:图 2A 中的 L50 明显“滞后”L19,而表 3 中 L50

却排在 L19 前面。图 2B 所反映的种质材料性状综合表现与表 4 中基于种质材料 *D* 值的平均值的排序也不一致,如:P09 和 P12 在图 2B、表 4 中的排序正好相反。究其原因,表 3、表 4 中的平均值考虑了基因型主效应、环境主效应、GE 互作效应 3 种效应,而实际上环境主效应不仅与种质材料的性状综合表现无关反而会对其评价形成干扰,而图 2A、图 2B 只考虑与基因型效应相关的基因型主效应和 GE 互作效应。这也表明,在评价种质材料的性状综合表现时,剔除环境主效应是有必要的。

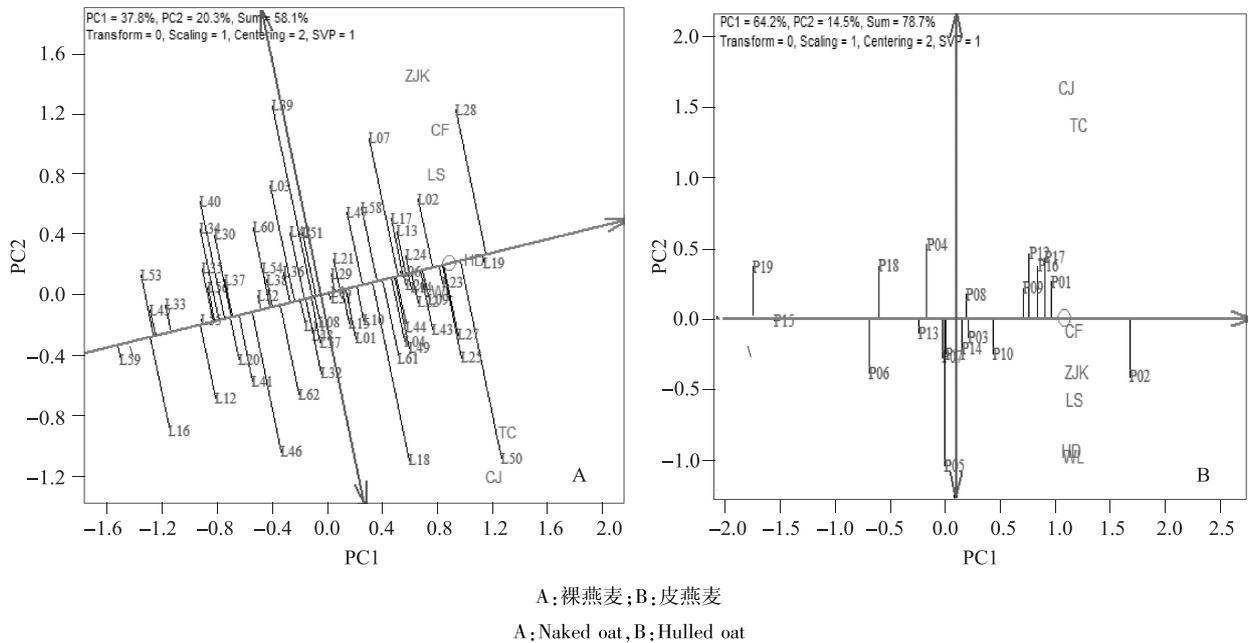


图 2 基于 GGE 双标图分析的燕麦种质稳定性与性状综合表现

Fig. 2 Stability and integrated trait of oat germplasm based on GGE biplot analysis

3 讨论

3.1 加权隶属函数法的应用

加权隶属函数法通过无量纲化将各性状观测值都转换为[0,1]的隶属函数值,从而将不同性状放到了同一比较平台上,这样既增强了性状观测值的可读性,同时也为整合不同性状的观测值奠定了基础。以某性状的变异系数在所有性状变异系数中所占比例为该性状的权重,从性状的变异程度客观地赋予了不同性状相应的权重,作为对综合性状的贡献。类似于抗逆性综合评价^[17-18],加权隶属函数法在作物种质资源农艺性状综合鉴定与评价中也有较好的应用前景。

3.2 GGE 双标图的应用

以产量为例,一般的区试中环境主效占产量总变异的 80% 以上,而品种主效和 GE 互作效应多小

于 10%^[21]。虽然环境主效很大,但它与种质评价等相关分析并无关联。对燕麦种质材料农艺性状或品质的综合评价,方差分析^[22]、主成分分析^[23-24]、AMMI 模型^[25]、基于熵权赋权重的灰色关联度分析^[26-27]等方法均有应用,但相较于 GGE 双标图,这些分析方法无一例外地纳入了环境主效,种质评价势必会受环境效应的巨大影响而不能得到公正评价,这也解释了本研究中基于种质材料 *D* 值平均值的排序(表 3,表 4)与图 2 分析结果的不一致;而 GGE 双标图只考虑与基因型相关的效应并以双标图的形式直观呈现,对元数据具有很强的可读性,基于余弦-遗传相关系数等值原理^[28]所作辅助线能发掘元数据更多的信息。

图 1A、图 2A 所解释的裸燕麦 G 主效和 GE 互作效应的信息为 58.1%,而图 1B、图 2B 所解释的皮燕麦 G 主效和 GE 互作效应的信息为 78.7%。显

然,相比于裸燕麦,皮燕麦的 GGE 双标图能更有效地反映其数据中的 G 效应和 GE 交互效应。但是,不管是皮燕麦还是裸燕麦,根据严威凯^[5]的计算方法,它们各自两个主成分的信息比(IR)都大于 1,也就是说,对应的 GGE 双标图能够揭示元数据中最主要的规律。

3.3 燕麦优异种质材料的筛选与利用

就适应性而言,83113-6、二苡麦在乌兰察布、塔城、昌吉表现最好,73014-336、坝苡三号在张家口、赤峰、凉山、海东表现最好;Bauntebue 在赤峰、乌兰察布、张家口、凉山、海东表现最好,坝燕一号在塔城、昌吉表现最好。针对稳定性,裸燕麦坝苡三号、晋 8609-1、LY03-02、二秋苡麦和皮燕麦 64 燕麦、品 16、Banner、LY01-12 等材料较为稳定。对于性状综合表现,裸燕麦 73014-336、坝苡三号、二苡麦、品 2 和皮燕麦 Bauntebue、7641M-9、坝燕一号、青引一号等材料表现较好。这些材料在所有试点的平均表现

如表 5 所示。其中,(1)坝苡三号在适应性、稳定性以及性状综合 3 方面都有很好的表现,作为当下华北地区的主栽品种之一已经体现了其较好的实际生产价值,同时也具备向西部地区推广生产的潜力;基于其在主穗小穗数、主穗粒重以及穗轮层数的突出表现,也可作为亲本材料用于杂交育种。(2)73014-336、二苡麦、Bauntebue、坝燕一号等材料不仅具有很强的适应性,而且性状综合表现较好,其中的坝燕一号目前已是河北等地区的主栽品种,73014-336 在主穗小穗数、穗轮层数表现出色,二苡麦在千粒重、有效分蘖数有突出表现,Bauntebue 在主穗小穗数、千粒重和穗轮层数方面最为突出;但是,它们的表现试验点间的差异较大,因此挖掘它们在表现较好的试验点环境下的优异性状潜力并应用于栽培或育种具有现实意义。(3)晋 8609-1、LY03-02、二秋苡麦、64 燕麦、品 16、Banner、LY01-12 等材料稳定性非常好,可作为亲本材料用于杂交育种。

表 5 燕麦材料筛选及其在试验点的平均表现

Table 5 Total performance of selected oat accessions in all test sites

编号 Code	名称 Name	生育日数 (d) Growing days	株高 (cm) Plant height	主穗小穗数 No. of spikelet	主穗粒重(g) Grain weight per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	有效分蘖数 No. of tillers	穗轮层数 No. of ear layer
L06	LY03-02	107.43	125.73	42.17	2.28	23.34	3.64	6.17
L10	83113-6	102.43	127.67	42.69	2.07	23.09	3.66	6.17
L19	坝苡三号	110.71	139.33	51.94	2.47	22.54	3.21	6.64
L23	晋 8609-1	106.29	121.71	48.73	2.82	23.61	3.54	5.90
L27	品 2	110.71	120.87	45.71	2.38	22.08	3.31	7.24
L28	73014-336	104.71	121.43	57.33	2.78	23.04	3.04	6.90
L50	二苡麦	105.57	126.71	51.11	2.41	23.85	4.43	6.03
L55	二秋苡麦	104.29	129.10	36.77	1.43	19.38	3.34	5.44
P01	7641M-9	107.43	120.94	61.66	2.93	28.30	3.69	6.27
P02	Bauntebue	108.43	140.76	63.37	3.35	38.32	2.77	7.06
P03	Banner	107.43	126.13	50.31	2.17	24.69	4.83	5.57
P08	LY01-12	108.43	138.96	50.41	2.00	24.78	3.50	6.79
P13	品 16	103.14	108.36	43.63	2.16	30.14	3.95	6.01
P15	64 燕麦	107.14	90.59	23.36	1.42	32.21	4.23	4.87
P16	青引一号	102.57	126.47	47.77	3.16	33.21	3.81	6.01
P17	坝燕一号	108.86	121.47	41.59	3.32	36.36	4.13	5.97

4 结论

在分析评价燕麦主穗粒重、千粒重等农艺性状时,应将裸燕麦与皮燕麦区别对待。本研究中,主穗粒重在裸燕麦材料中变异程度最大,有效分蘖数在皮燕麦中变异性最为丰富,而其余 5 个性状的变异程度

与皮裸性几乎无关。利用加权隶属函数并结合 GGE 双标图的方法可对燕麦农艺性状进行有效综合分析,进而对参试材料的适应性、稳定性以及性状综合表现作出科学评价。坝苡三号在适应性、稳定性以及性状综合表现上都有出色的表现,73014-336、二苡麦、Bauntebue、坝燕一号具有很好的适应性和性状综合

表现,晋 8609-1、LY03-02、二秋莠麦、64 燕麦、品 16、Banner、LY01-12 具有很好的稳定性。

参考文献

- [1] 郑殿升,张宗文.大粒裸燕麦(莠麦)(*Avena nuda* L.)起源及分类问题的探讨[J].植物遗传资源学报,2011,12(5):667-670
- [2] 董玉琛,郑殿升.中国作物及其野生近缘植物[M].北京:中国农业出版社,2006:250-254
- [3] Cooper M, Stucker R E, Delacy I H, et al. Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield [J]. *Crop Sci*, 1997, 37: 1168-1176
- [4] Yan W K, Hunt L A, Sheng Q, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot [J]. *Crop Sci*, 2000, 40: 597-605
- [5] 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
- [6] 金石桥, 许乃银. GGE 双标图在中国农作物品种试验中应用的必要性探讨[J]. 种子, 2012, 21(12): 89-92
- [7] Yan W K, Falk D E. Biplot analysis of host-by-pathogen data [J]. *Plant Dis*. 2002, 86: 1396-1401
- [8] 尚毅, 李少钦. 用双标图分析油菜双列杂交试验[J]. 作物学报, 2006, 32(2): 243-248
- [9] Yan W K, Tinker N A. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype \times environment interaction [J]. *Crop Sci*, 2005, 45(3): 1004-1016
- [10] 陈四龙, 李玉荣. 用 GGE 双标图分析种植密度对高油花生生长和产量的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(7): 1328-1335
- [11] 王瑾, 周立杰, 李玉荣, 等. 不同栽培方式对芝麻农艺性状及产量的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(12): 253-256
- [12] 郭数进, 李玮瑜, 马艳芸, 等. 山西不同生态型大豆品种苗期耐低温性综合评价[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 990-1000
- [13] 胡新中, 罗勤贵, 欧阳韶晖, 等. 裸燕麦酶活性抑制方法及品质比较[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(5): 46-50
- [14] Yan W K, Molnar S J, Fregeau-Reid J, et al. Associations among oat traits and their responses to the environment [J]. *J Crop Improv*, 2007, 20(1/2): 1-29
- [15] 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
- [16] 彭远英, 颜红海, 郭来春, 等. 燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2478-2491
- [17] 陈新, 宋高原, 张宗文, 等. PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6): 1188-1195
- [18] 陈新, 张宗文, 吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 2038-2046
- [19] 张恩来. 燕麦核心种质构建及其遗传多样性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008
- [20] 郑殿升, 王晓鸣, 张京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 43-53
- [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
- [22] 南春芹, 李建设, 孟庆立, 等. 加拿大燕麦种质在陕西杨凌的适应性评价[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3): 75-81
- [23] 柴继宽, 赵桂琴, 师尚礼. 7 个燕麦品种在甘肃二阴区的适应性评价[J]. 草原与草坪, 2011, 31(2): 1-6
- [24] 郑曦, 魏臻武, 武自念, 等. 不同燕麦品种(系)在扬州地区的适应性评价[J]. 草地学报, 2013, (2): 272-279
- [25] 衣莹, 齐华, 金路路, 等. 基因型和环境效应对燕麦 β -葡聚糖含量的影响[J]. 杂粮作物, 2009, 29(5): 333-336
- [26] 刘刚, 赵桂琴, 魏黎明. 基于熵权赋权法的灰色系统理论在燕麦品种综合评价中的应用[J]. 中国草地学报, 2007, 29(3): 84-89
- [27] 侯建杰, 赵桂琴, 焦婷, 等. 6 个燕麦品种(系)在甘肃夏河地区的适应性评价[J]. 草原与草坪, 2013, 33(2): 26-37
- [28] Kroonenberg P M. Introduction to biplots for $G \times E$ tables [M]. Queensland: Research Report No. 51, University of Queensland, 1995