

转基因小麦抗旱性鉴定及相关指标灰色关联度分析

罗 影¹,赵 军²,王剑虹³,裴怀弟⁴,张斌科⁵,叶春雷⁴,
李进京⁴,欧巧明⁴,王红梅⁴,王 炜⁴

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国农业科学院生物技术研究所/国家农作物基因资源和基因改良重大科学工程, 北京 100081;

3. 兰州职业技术学院生物工程系, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃省农业科学院生物技术研究所, 甘肃 兰州 730070;

5. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:以9份转 *ABP9* 基因春小麦株系 UC₄-1~UC₄-9 及其受体亲本宁春4号为材料,在雨养和灌溉条件下,对这些材料的主要农艺性状和部分生化指标进行了测定,采用隶属函数值法和抗旱性度量(*D*)值法对其抗旱性进行了综合评价,并利用灰色关联度法对相关抗旱性状与抗旱指数之间的关联度进行了分析评价。结果表明:6份转基因小麦的抗旱性较受体亲本宁春4号增强,3份材料的抗旱性较非转基因春小麦品种定西35增强;各农艺性状和生化指标与抗旱指数的关联度从高到低依次分别为株高、单穗粒重、穗长、SOD活性、穗粒数、结实小穗数、有效分蘖数、POD活性、千粒重、脯氨酸含量、MDA含量。

关键词:转基因小麦; *ABP9* 基因; 抗旱性鉴定

中图分类号: S512.1; S332.4 **文献标志码:** A

Characterization of drought resistance in transgenic wheat lines and grey correlation analyses of related traits

LUO Ying¹, ZHAO Jun², WANG Jian-hong³, PEI Huai-di⁴, ZHANG Bin-ke⁵, YE Chun-lei⁴,
LI Jin-jing⁴, OU Qiao-ming⁴, WANG Hong-mei⁴, WANG Wei⁴

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Biotechnology Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Genetics and Breeding, Beijing 100081, China;

3. Bioengineering Department of Lanzhou Vocational Technology College, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. Bio-technology Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

5. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A total of 11 traits, including 7 agronomic traits and 4 biochemical traits, was measured in nine *ABP9* - transgenic spring wheat lines and their donor parent Ningchun 4 that were grown in rain-fed (drought stress) and well-watered environments. Drought resistance capabilities of these materials were evaluated comprehensively by employing the methods of subordinate function and drought-resistance measure value (*D* value). Correlation degrees between these traits and drought resistance indexes were analyzed and evaluated using grey relational grade analysis method. The results showed that the drought resistance of the 6 transgenic wheat lines was better than that of their donor parent Ningchun 4. In particular, 3 lines even exhibited stronger drought resistance than a non-transgenic spring wheat cultivar Dingxi 35, which was commonly used as a control for testing drought resistance of drought - land spring wheat in the northwest China. Results of grey relational grade analyses indicated that the correlation degrees between these traits and drought resistance indexes were ranked from high to low in the following order: plant height, single spike weight, spike length, SOD activity, number of kernel per spike, effective tillers, POD activity, 1000-kernel weight, proline content, and then MDA content.

收稿日期:2014-02-09

基金项目:国家转基因生物新品种培育重大专项(2009ZX08005-013B);甘肃省科技支撑项目(1104NKCA073);甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2009GAAS15)

作者简介:罗 影(1989—),女,陕西渭南人,在读硕士,主要从事作物抗旱及生理生态研究。E-mail: luoying0402@gmail.com。

通信作者:王 炜(1975—),男,甘肃武山人,助理研究员,主要从事细胞工程与分子育种研究。E-mail: haploidbreeding@163.com。

Keywords: wheat; *ABP9* gene; drought resistance parameters; subordinate function coefficients; grey correlative analysis

全球 40% 的耕地面积位于干旱区,干旱是影响农业生产的最重要非生物胁迫因子^[1]。中国小麦主产区集中在干旱半干旱地区,在近年来干旱灾害天气频发,对我国小麦生产造成巨大损失的严重形势下,发掘、利用抗旱节水基因资源进行改良小麦品种的抗旱性尤为重要。分子生物学和基因工程的迅猛发展为利用转基因技术培育抗旱小麦新品种提供了一条有效途径^[2]。

研究表明,植物中 bZIP 类转录因子参与干旱、盐渍等逆境胁迫在内的广泛的生物学反应^[3]。中国农业科学院生物技术研究所赵军研究小组利用酵母单杂交的方法克隆到一个可与 *Cat1* 基因上游顺式作用元件 ABRE2 相互作用的 bZIP 类转录因子 *ABP9*^[4]。*ABP9* 参与 ABA 信号传导及 ROS 代谢调节^[5]。在转 *ABP9* 基因的拟南芥^[5]、高羊茅^[6]、苜蓿^[7]、大豆^[8]、水稻^[9]等植物中的研究表明,该基因可以显著提高植株对干旱、盐渍、低温抗旱等逆境的耐受性。同时,利用基因枪法将 *ABP9* 基因导入西北春麦区的主栽品种宁春 4 号小麦中,获得了稳定的宁春 4 号转基因系列纯系材料,经前期的抗逆性鉴定,*ABP9* 基因显著地提高了转基因小麦的抗旱性^[10]。

本试验以转 *ABP9* 基因春小麦纯系材料及受体品种宁春 4 号为研究对象,在雨养和灌溉两种栽培条件下,对这些材料的主要农艺性状和生化性状进行测定,采用隶属函数法进行抗旱性鉴定和综合评价,同时利用灰色关联度分析法对相关抗旱性状进行评价,以期对抗旱转基因小麦新品种的选育和鉴定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为 9 个转基因株系,UC₄-1、UC₄-2、UC₄-3、UC₄-4、UC₄-5、UC₄-6、UC₄-7、UC₄-8、UC₄-9、野生型对照宁春 4 号、非转基因春小麦品种定西 35 号。

1.2 试验方法

2011 年 3 月将上述材料种植在甘肃省农业科学院小麦转基因隔离试验区,2 行区,行长 1.8 m,每行均匀点播 189 粒,行距 0.20 m,随机机组设计,3 次重复。将其分设为旱地试验和水地试验。水地试验于拔节期、分蘖期、灌浆期各灌溉 1 次,共 3 次;灌

水每次 750 m³·hm⁻²(约为 75 mm 的降雨量),三次总计 2 250 m³·hm⁻²。旱地试验全生育期完全依靠自然降水。甘肃兰州地区 2011 年在春小麦生育期 3—7 月降水量约为 117 mm,属于较为干旱的年份。

测定生化指标时,于小麦抽穗期时取其叶片,用湿纱布擦干净后用液氮冷冻,带回实验室置于低温冰箱中,测定相关指标时取出。丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸方法^[11];脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法^[11];超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定参照 Chander 的方法^[12]、过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法^[13];在对农艺性状进行考种时,于小麦完熟后每份材料每个重复分别取 10 株测定株高、穗长、穗粒数、千粒重、单穗粒重、分蘖数、结实小穗数等 7 项指标。

1.3 数据分析

对所测定的生理生化和农艺性状等共计 11 项指标,参照相关文献^{[14]~[16]},利用如下公式计算抗旱系数、综合抗旱系数、抗旱指数、隶属函数值、抗旱性量度(*D*)值;并根据灰色系统理论,对各指标的抗旱系数按照公式(6)进行无量纲化处理,按照公式(7)、(8)计算关联系数和关联度^[17]。

$$\text{抗旱系数 } PI = X_s / X_r \quad (1)$$

$$\text{综合抗旱系数 } RI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI \quad (2)$$

$$\text{抗旱指数 } DI = (X_s / \bar{X}_s) \times PI \quad (3)$$

$$\text{隶属函数值 } \mu(x) = \frac{PI - PI_{i\min}}{PI_{i\max} - PI_{i\min}} \quad (4)$$

抗旱性度量值

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x) \times (|r_i| \div \sum_{i=1}^n |r_i|)] \quad (5)$$

$$\text{无量纲化值 } X'_i(k) = [x_i(k) - \bar{x}_i] / S_i \quad (6)$$

关联系数

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(K) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(K) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (7)$$

$$\text{关联度 } r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (8)$$

式中, X_s 和 X_r 分别为干旱胁迫和对照下各材料各指标的测定值, $\bar{X}_s$ 为该指标在干旱胁迫下的平均值; $PI_{i\min}$ 、 $PI_{i\max}$ 为各性状抗旱系数的最小值和最大值; r_i 为各性状抗旱系数与综合抗旱指数的相关系数;

$X'_i(k)$ 为数据无量纲处理后的结果、 $X_i(k)$ 为各材料各指标的抗旱系数、 $\overline{X_i}$ 和 S_i 分别为同一指标的平均值和标准差; ρ 为分辨系数,取值为 0 ~ 1,本研究中取值 0.5。所有的计算均采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 转 *ABP9* 基因春小麦纯系材料的各指标隶属函数值及抗旱性评价

作物的抗旱性是环境胁迫与基因型相互作用的

结果,通过不同时期生理、生化及农艺性状等指标发生一系列变化体现出来^[18]。本研究对转 *ABP9* 基因小麦在雨养和灌溉两种栽培条件下的 7 项农艺性状指标(株高、穗长、结实小穗数、千粒重、单穗粒重、有效分蘖、穗粒数)和 4 项生化指标(MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、脯氨酸含量)进行了测定(表 1 和表 2),并利用公式(1)计算出所测定的抗旱系数,通过相关分析计算各性状与综合抗旱系数(抗旱系数的平均值)的相关系数,继而利用公式(5)计算出各材料的隶属函数值。

表 1 转基因小麦在雨养条件下(干旱胁迫)的生化指标及农艺性状

Table 1 Biochemical and agronomic traits in transgenic wheat under rain – fed environment (drought stress)

材料 Materials	PH /cm	SL /cm	NS	TKW /g	SW /g	ET	NKS	MC /($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	SA /($\text{u}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	PA /($\text{u}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	PC /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
UC ₄ – 1	69.33	9.53	15.87	37.74	1.27	1.03	33.93	0.00332	45.1300	2792.5330	478.3210
UC ₄ – 2	68.67	8.68	14.97	41.90	1.34	1.02	31.93	0.00415	55.5560	2854.7560	385.9210
UC ₄ – 3	65.33	8.42	15.03	41.75	1.34	1.06	32.13	0.00323	54.8700	2838.4000	1174.3000
UC ₄ – 4	64.00	9.05	15.57	41.18	1.39	1.11	33.70	0.00323	77.2290	2910.2220	622.8820
UC ₄ – 5	63.33	8.72	14.63	40.83	1.38	1.03	33.90	0.00387	87.5170	2852.6220	324.4450
UC ₄ – 6	66.33	8.69	15.30	40.93	1.41	1.02	34.40	0.00363	70.2330	2825.6000	750.6760
UC ₄ – 7	64.33	8.82	15.47	41.93	1.45	1.09	34.50	0.00365	40.7410	2786.4890	625.1170
UC ₄ – 8	64.33	8.62	15.80	40.02	1.40	1.09	34.73	0.00369	48.5600	2849.0670	353.5060
UC ₄ – 9	67.33	8.64	14.60	40.62	1.26	1.04	30.87	0.00373	62.4140	2870.7560	897.1000
宁春 4 号 Ningchun 4	66.17	8.44	15.02	38.80	1.36	1.02	35.57	0.00370	49.8600	2877.1600	621.3910
定西 35 Dingxi 35	87.50	9.10	16.37	42.77	1.53	1.07	35.55	0.00366	42.9400	2717.2300	312.1500

注:PH,株高;SL,穗长;NS,结实小穗数;TKW,千粒重;SW,单穗粒重;ET,有效分蘖;NKS,穗粒数;MC,MDA 含量;SA,SOD 活性;PA,POD 活性;PC,脯氨酸含量;下表同。

Note: PH, Plant height; SL, Spike length; SNE, Spikelet numbers per ear; TKW, 1000-kernal weight; SW, Single spike weight; ET, Effective tillers; NKS, Number of kernel per spike; MC, MDA content; SA, SOD activity; PA, POD activity; PC, Proline content; The same as in the following table.

表 2 转基因小麦在灌溉条件下的生化指标及农艺性状

Table 2 Biochemical and agronomic traits in transgenic wheat under well-watered environment

材料 Materials	PH /cm	SL /cm	NS	TKW /g	SW /g	ET	NKS	MC /($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	SA /($\text{u}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	PA /($\text{u}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	PC /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
UC ₄ – 1	93.67	10.64	17.10	43.34	1.83	2.50	42.33	0.00311	42.2500	2690.1330	106.8580
UC ₄ – 2	89.00	10.55	16.47	47.79	2.01	2.89	42.00	0.00311	26.7490	2356.2670	93.4450
UC ₄ – 3	86.00	10.73	17.43	44.21	2.16	2.79	48.67	0.00269	39.3690	2640.3560	78.9150
UC ₄ – 4	87.67	10.60	17.30	43.18	2.06	2.79	47.80	0.00275	32.2360	2701.8670	83.3860
UC ₄ – 5	87.00	11.50	17.43	41.39	2.03	2.80	52.03	0.00281	22.6340	2791.1110	88.6020
UC ₄ – 6	85.67	10.38	16.43	44.36	2.06	2.80	46.43	0.00294	45.6790	2774.4000	78.5420
UC ₄ – 7	84.67	10.30	17.37	43.28	2.19	2.86	50.67	0.00316	23.1820	2663.8220	92.7000
UC ₄ – 8	81.67	10.36	16.90	44.75	1.98	2.52	44.23	0.00307	21.5360	2536.8890	80.4050
UC ₄ – 9	84.00	10.72	16.73	46.64	1.98	2.42	42.40	0.00332	28.6690	2638.5780	78.9150
宁春 4 号 Ningchun 4	85.67	9.78	17.65	44.94	2.10	2.31	47.18	0.00274	46.6390	2787.9110	102.3870
定西 35 Dingxi 35	124.67	10.91	18.38	45.02	2.06	2.66	44.07	0.00331	39.1630	2404.9780	93.2590

参照王刚^[2]、冷益丰^[15]、南炳东^[19]等直接用平均隶属函数值进行转基因植物抗旱性综合评价的方法,本研究的结果表明(表 3),在供试的 9 份转 *ABP9* 基因小麦中,6 份材料的平均隶属函数值均高于其受体亲本宁春 4 号,占参试材料的 66.67%,以

UC₄-8 的表现最为突出,超过宁春 4 号 40.80%,其次分别为 UC₄-2、UC₄-6、UC₄-4、UC₄-9、UC₄-1;而且 4 份转基因小麦 UC₄-8、UC₄-2、UC₄-6、UC₄-4 的平均隶属函数值超过西北春麦区旱地区域试验的非转基因对照品种定西 35。

表 3 转基因小麦农艺性状和生化指标的隶属函数值及抗旱性综合评价
Table 3 Subordinate function values of agronomic traits and biochemical indexes in different transgenic wheat lines as well as comprehensive evaluation of drought resistance in these materials

材料 Materials	PH	SL	SNE	TKW	SW	ET	NKS	MC	SA	PA	PC	平均值 Mean value	位次 Rank
UC ₄ -1	0.3842	1.0000	0.9284	0.0602	0.6017	0.6664	0.9670	0.0000	0.0000	0.1016	0.0979	0.4370	7
UC ₄ -2	0.6993	0.4693	0.7280	0.1087	0.3784	0.0000	0.7007	0.8617	0.3605	1.0000	0.0679	0.4886	2
UC ₄ -3	0.5798	0.1925	0.2402	0.6579	0.0000	0.3045	0.0555	0.4302	0.1163	0.2929	1.0000	0.3518	11
UC ₄ -4	0.2824	0.6951	0.6346	0.7336	0.4445	0.5068	0.3447	0.3456	0.4744	0.3038	0.3575	0.4657	4
UC ₄ -5	0.2616	0.0000	0.0000	1.0000	0.4858	0.1683	0.0000	1.0000	1.0000	0.0186	0.0273	0.3601	10
UC ₄ -6	0.7262	0.5744	0.9614	0.4818	0.5239	0.1280	0.5760	0.5398	0.1677	0.0000	0.5385	0.4743	3
UC ₄ -7	0.5810	0.7135	0.5364	0.8565	0.3411	0.3180	0.1891	0.2827	0.2463	0.1429	0.2945	0.4093	9
UC ₄ -8	0.8609	0.5370	1.0000	0.2513	0.7086	0.8982	0.8617	0.4341	0.4240	0.5417	0.0910	0.6008	1
UC ₄ -9	1.0000	0.3472	0.3488	0.0614	0.1307	0.8668	0.4933	0.1807	0.3963	0.3601	0.6954	0.4437	6
宁春 4 号 Ningchun 4	0.7075	0.7621	0.1218	0.0000	0.2227	1.0000	0.6599	0.9133	0.0003	0.0702	0.2360	0.4267	8
定西 35 Dingxi 35	0.0000	0.5519	0.5367	0.7039	1.0000	0.5565	1.0000	0.1234	0.0101	0.5768	0.0000	0.4599	5

由公式(3)所计算的抗旱性量度(*D* 值),在多种植物的抗旱性综合评价中得到了广泛的应用,许多研究者采用 *D* 值对植物的抗旱性进行综合评价^[16,18-24],取得了较为理想的结果。本研究对参试的 9 份转 *ABP9* 基因小麦的 11 项抗旱相关指标计算 *D* 值见表 4。结果表明,6 份转基因小麦的 *D* 值

超过受体亲本对照,依次分别为 UC₄-8、UC₄-6、UC₄-1、UC₄-9、UC₄-2、UC₄-4,其中 3 份材料的 *D* 值超过西北春麦区旱地区域试验的非转基因对照品种定西 35;UC₄-8 的表现依然突出,其 *D* 值为 0.5768,排名第一,超过受体亲本对照宁春 4 号 39.90%。

表 4 转基因小麦的 *D* 值及抗旱性综合评价
Table 4 *D* value of transgenic wheat lines and comprehensive evaluation of drought resistance in these materials

材料 Materials	PH	SL	SNE	TKW	SW	ET	NKS	MC	SA	PA	PC	<i>D</i> 值 <i>D</i> Value	位次 Rank
UC ₄ -1	0.0417	0.1082	0.0619	0.0015	0.1144	0.0169	0.1483	0.0000	0.0000	0.0055	0.0238	0.5222	3
UC ₄ -2	0.0760	0.0508	0.0485	0.0027	0.0719	0.0000	0.1074	0.0140	0.0033	0.0546	0.0165	0.4456	6
UC ₄ -3	0.0630	0.0208	0.0160	0.0165	0.0000	0.0077	0.0085	0.0070	0.0011	0.0160	0.2427	0.3993	9
UC ₄ -4	0.0307	0.0752	0.0423	0.0184	0.0845	0.0129	0.0529	0.0056	0.0043	0.0166	0.0867	0.4301	7
UC ₄ -5	0.0284	0.0000	0.0000	0.0251	0.0923	0.0043	0.0000	0.0162	0.0091	0.0010	0.0066	0.1831	11
UC ₄ -6	0.0789	0.0621	0.0641	0.0121	0.0996	0.0033	0.0883	0.0087	0.0015	0.0000	0.1307	0.5493	2
UC ₄ -7	0.0631	0.0772	0.0358	0.0215	0.0648	0.0081	0.0290	0.0046	0.0022	0.0078	0.0715	0.3856	10
UC ₄ -8	0.0935	0.0581	0.0666	0.0063	0.1347	0.0228	0.1321	0.0070	0.0039	0.0296	0.0221	0.5768	1
UC ₄ -9	0.1086	0.0376	0.0232	0.0015	0.0248	0.0220	0.0756	0.0029	0.0036	0.0196	0.1688	0.4885	5
宁春 4 号 Ningchun 4	0.0769	0.0824	0.0081	0.0000	0.0423	0.0254	0.1012	0.0148	0.0000	0.0038	0.0573	0.4123	8
定西 35 Dingxi 35	0.0000	0.0597	0.0358	0.0177	0.1901	0.0141	0.1533	0.0020	0.0001	0.0315	0.0000	0.5043	4

由平均隶属函数值和抗旱性量度 D 值分别对转基因小麦材料进行抗旱性综合评价的结果大体相同,如 UC₄-8 在两种评价方法中均排名第一;转基因小麦 UC₄-1、UC₄-2、UC₄-4、UC₄-6、UC₄-8、UC₄-9 的抗旱性均超过亲本对照。但也稍有差异,如 UC₄-2 在用平均隶属函数值时其综合抗旱性排名第 2,而用 D 值评价时则只位列第 6;UC₄-4 在前者中的排名为第 4,超过非转基因对照品种宁春 4 号,而在后者中的排名为第 7,低于宁春 4 号 3 个名次。

2.2 灰色关联度分析

根据灰色系统理论,关联度反映的是构成该系统的各性状组成的比较数列和参考数列间的密切程度,关联度越大,说明该数列和参考数列间的关系越

密切^[17,25-26]。本研究中,按灰色系统理论要求,将测定的 7 项农艺性状指标和 4 项生理生化指标的抗旱系数纳入一个灰色系统,各个性状视为该系统的一个灰因素,以产量抗旱指数为参考数列,通过公式(6)对各供试材料所测定的 11 项性状的抗旱系数数据进行无量纲化处理,再利用公式(7)和(8)分别计算关联系数和关联度,同时对各性状的关联度进行了排序(表 5)。由表 5 可以看出,株高(PH)与产量抗旱指数的关联度最大,为 0.6817,其余依次为单穗粒重(SW)、穗长(SL)、SOD 活性(SA)、穗粒数(NKS)、结实小穗数(SNE)、有效分蘖数(ET)、POD 活性(PA)、千粒重(TKW)、脯氨酸含量(PC)、MDA 含量(MC)。

表 5 转基因小麦主要农艺性状和生化指标与抗旱指数的关联度和关联序
Table 5 Correlation degrees and correlation order of agronomic traits, biochemical indexes and drought-resistance indexes in transgenic wheat lines

项目 Items	PH	SL	SNE	TKW	SW	ET	NKS	MC	SA	PA	PC
关联度 Correlation degree	0.6817	0.6676	0.6363	0.6175	0.6698	0.6330	0.6504	0.5954	0.6574	0.6198	0.6012
关联序 Correlative order	1	3	6	9	2	7	5	11	4	8	10

3 讨 论

作物的抗旱性是复杂的数量遗传性状,通过一系列生理生化和形态变化表现出来,具有单项研究的局限性和综合研究的复杂性^[14,27]。多年来,在作物的抗旱性鉴定指标的选择和评价方法上,国内外学者做了大量研究工作,提出了多种抗旱性鉴定指标与评价方法^[16]。从抗旱性鉴定指标来看,主要有形态指标、农艺性状指标和生理生化指标,不同的指标与作物抗旱性之间的关系,研究结果并不一致;在评价方法上,大多数研究者认为,由于抗旱性是多种因素综合作用的结果,采用多指标的综合评价比单指标评价更为 JP2 科学和客观^[28]。利用模糊数学的隶属函数分析法得到的抗旱性度量 D 值,既考虑各指标的相互关系,又考虑其重要性,能消除单个指标的片面性,因而可以较准确地评价各材料的抗旱性^[19]。

基于上述原因,本研究对用基因枪法转化西北春麦区主栽品种宁春 4 号所获得的 9 份转 *ABP9* 基因春小麦,测定了 7 项农艺性状和 4 项生化指标,通过计算各材料各性状的抗旱系数,利用相关分析法,获得了每份小麦材料的平均隶属函数值和抗旱性量度 D 值,参照不同研究者以平均隶属函数值^[2,15,19]以及用抗旱性量度 D 值的方法^[18-24]进行抗旱性综

合评价,结果表明两种评价方法所获得的结果大体相同,6 份转基因小麦 UC₄-1、UC₄-2、UC₄-4、UC₄-6、UC₄-8、UC₄-9 的抗旱性均较受体亲本宁春 4 号增强,其中以 UC₄-8 的表现最突出;但也有所差异,如 UC₄-2 和 UC₄-6 的抗旱性排名差异稍大(表 4、表 5)。由公式(5)可以看出,抗旱性度量 D 值与隶属函数值密切相关,但同时考虑了各性状指标的权重及各指标与综合抗旱系数之间的相关系数,由于不同的性状指标对作物抗旱性的贡献并非相同,因此用抗旱性度量 D 值对抗旱性进行综合评价应该更为准确。

灰色系统理论中的关联度分析是对动态系统进行量化比较的分析方法,系统中因素之间的关联度大,说明其变化态势接近,相互关系密切,反之,其相互关系疏远^[26]。利用灰色关联度分析法对各性状指标和抗旱性之间的关系进行评价,近年来在各种作物的抗旱性研究中也多有应用^[16-18,29-32]。关联序(关联度排名)结果显示(表 5),排名前 7 位的指标依次分别为株高、单穗粒重、穗长、SOD 活性、穗粒数、结实小穗数、有效分蘖数,可以看出,除 SOD 活性外,其余均为农艺性状指标,与王士强等^[17]的研究结果有较大差异,这可能与 *ABP9* 基因的作用有关。前期的研究表明 *ABP9* 基因在转基因拟兰芥中的组成型表达能够降低细胞内活性氧(ROS)水平,降低氧化损伤和细胞死亡,提高大量参与清除和调

控活性氧的胁迫应答基因的表达^[5],这样就使得在干旱胁迫环境下,植物体内参与调控活性氧的一些抗氧化酶及相关化学物质含量维持在较低的水平;至于 ABP9 在转基因小麦中的确切机制,还需要进一步研究。当然,由于抗旱性研究的复杂性,也不能排除供试材料的基因型、生长环境及取材时期等因素对研究结果的影响。

参 考 文 献:

[1] Araus J L, Slafer G A, Reynolds M P, et al. Plant breeding and drought in C3 cereals: What should we breed for? [J]. Ann Bot, 2002, 89(7): 925-940.

[2] 王 刚,刘曙东,闵东红,等. W16 转济麦 19 小麦株系抽穗期抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 1-6.

[3] 杨 颖,高世庆,唐益苗,等. 植物 bZIP 转录因子的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 730-737.

[4] 王 磊,赵 军,范云六. 玉米 *Cat1* 基因顺式元件 ABRE2 结合蛋白 ABP9 的基因克隆及功能分析[J]. 科学通报, 2002, 47(15): 1167-1171.

[5] Zhang X, Wang L, Meng H, et al. Maize ABP9 enhances tolerance to multiple stresses in transgenic Arabidopsis by modulating ABA signaling and cellular levels of reactive oxygen species[J]. Plant Mol Biol, 2011, 75(4-5): 365-378.

[6] 张 磊,吴金霞,董 芳,等. 抗逆转 *ABP9* 基因黑麦草和高羊茅植株的鉴定[J]. 草业科学, 2010, 27(7): 72-77.

[7] 李 静. 玉米 *ABP9* 基因转化紫花苜蓿及其抗旱性分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.

[8] 王昌陵,赵 军,李英慧,等. 转录因子 *ABP9* 转化大豆 (*Glycine max* L.) 及遗传转化条件优化[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1908-1916.

[9] 于兆鹏. 逆境诱导启动子驱动 *ABP9* 表达的转基因纯系水稻植株的分子鉴定及抗旱性分析[D]. 临汾: 山西师范大学, 2012.

[10] 吴 巍. 转 *ABP9* 基因小麦纯合株系的创制与干旱、低氮逆境的抗性鉴定[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.

[11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 142-151.

[12] Chander M S. Enzymic associations with resistance to rust and powdery mildew in pea[J]. Indian Journal of Horticulture, 1990, 47(3): 341-345.

[13] 王韶唐. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987.

[14] 祁旭升,刘章雄,关荣霞,等. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 665-674.

[15] 冷益丰,张 彪,赵久然,等. 转基因玉米种子萌发期抗旱性鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 177-182.

[16] 谢小玉,张 霞,张 兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485.

[17] 王士强,胡银岗,余奎军,等. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2452-2459.

[18] 祁旭升,王兴荣,许 军,等. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3076-3087.

[19] 武仙山,昌小平,景蕊莲. 小麦灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(4): 626-632.

[20] 南炳东,陈耀锋,闵东红,等. 不同水分胁迫下转 *TaEBP* 基因小麦株系拔节期抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 23-28.

[21] 王曙光,朱俊刚,孙黛珍,等. 山西小麦地方品种幼苗期抗旱性的鉴定[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 39-45.

[22] 黎冬华,刘文萍,张艳欣,等. 芝麻耐旱性的鉴定方法及关联分析[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1425-1433.

[23] 杨进文,朱俊刚,王曙光,等. 用 GGE 双标图及隶属函数综合分析山西小麦地方品种抗旱性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1031-1038.

[24] 王曙光,孙黛珍,周福平,等. 六倍体小黑麦萌发期抗旱性分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1403-1408.

[25] 周晓果,张正斌,徐 萍. 小麦主要育种目标的灰色系统方法探讨[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21(2): 81-84.

[26] 王正航,武仙山,昌小平,等. 小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 217-227.

[27] 景蕊莲. 作物抗旱研究的现状与思考[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 82-88.

[28] 王俊娟,叶武威,王德龙,等. PEG 胁迫条件下 41 份陆地棉种质资源萌发特性研究及其抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(6): 840-846.

[29] 杨子光,王书子,吴少辉,等. 灰色关联分析在小麦品种抗旱性鉴定上的应用[J]. 中国农学通报, 2002, 18(2): 42-43.

[30] 何 玮,范 彦,王 琳,等. 三峡库区野生红三叶苗期抗旱性灰色关联分析[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 255-259.

[31] 张文英,智 慧,柳斌辉,等. 谷子全生育期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(5): 560-565.

[32] 张志方,刘 亚,任 雯,等. 转 *TsVP* 基因玉米抗旱性鉴定研究[J]. 生物技术进展, 2013, 3(3): 206-210.