

# 室内冷冻法鉴定小麦抗寒性的研究

赵瑞玲<sup>1</sup>, 赵勇<sup>2</sup>, 徐渴<sup>2</sup>, 李嘉豪<sup>2</sup>, 张树华<sup>1</sup>, 杨学举<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学生命科学学院, 保定 071001; <sup>2</sup>河北农业大学农学院, 保定 071001)

**摘要:** 冬季冻害是制约我国北方小麦生产的重要因素之一, 田间鉴定小麦抗寒性方法易受环境影响。本研究以 209 份抗寒性存在显著差异的小麦种质资源为材料, 进行人工冷冻处理, 测定不同冷冻温度处理下植株电导率及冷冻成活率, 分析相对电导率、冷冻成活率和半致死温度与田间冻害等级的相关性, 以建立室内鉴定小麦抗寒性的最适方法, 为小麦抗寒性育种提供优良品种资源。结果表明, -14 ℃处理 3 h 后的冷冻成活率与冻害等级呈显著负相关, 该方法可快速、准确鉴定小麦不同品种抗寒性, 同时鉴定出河农 05(9)7-11-4-15、冀麦 585、乐 639、石麦 15、保 5108、石新 828、众麦 1 号和河农 7069 等抗寒性较强品种。

**关键词:** 小麦; 室内冷冻法; 抗寒性; 冷冻成活率; 相对电导率; 半致死温度

## Identification of Cold Resistance Wheat Varieties by Laboratory Freezing Method

ZHAO Rui-ling<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>, XU Ke<sup>2</sup>, LI Jia-hao<sup>2</sup>, ZHANG Shu-hua<sup>1</sup>, YANG Xue-ju<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Life Science of Hebei Agricultural University, Baoding 071001;

<sup>2</sup>College of Agronomy of Hebei Agricultural University, Baoding 071001)

**Abstract:** Winter freezing seriously threatens the yield stability of common wheat in the north area of China. Test for freezing resistance under the field condition largely depended on the environmental climate. By taking use of artificial freezing, we investigated the relative conductivity and freezing survival rate of the plants under different freezing treatments in 209 wheat varieties, with a purpose of obtaining excellent variety resources for cold resistance breeding of wheat. Furthermore, we analyzed the correlation of relative conductivity, freezing survival rate and lethal temperature with field frost damage grade. The results showed a significant negative correlation between the freezing survival rate and freezing injury level after treatment for 3 h at -14 ℃ (correlation coefficient = -0.427). By cold treatment under different temperatures, we found the optimal temperature condition that could be used to identify the cold resistance at seedling stage. As a result, several cold resistance varieties such as Henong 05(9)7-11-4-15, Jimai 585, Le 639, Shimai 15, Bao 5108, Shixin 828, Zhongmai 1 and Henong 7069 were obtained.

**Key words:** wheat; cold resistance; freezing survival rate; relative conductivity; lethal temperature

小麦是我国主要粮食作物之一, 低温寒害作为农业生产中一种严重的自然灾害, 对小麦产量造成巨大损失<sup>[1-2]</sup>。尽管近年来全球气候变暖, 降低了

对小麦抗寒性的考验, 但个别年份仍会出现极端天气情况, 这大大增加了小麦冻害发生的可能性, 且气候变暖导致春前积温有所增加, 改变了小麦在春

收稿日期: 2018-07-19 修回日期: 2018-08-17 网络出版日期: 2018-10-22

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181019.1544.003.html>

第一作者研究方向为植物资源与活性物质开发, E-mail: zrling000@163.com

通信作者: 杨学举, 研究方向为小麦遗传育种, E-mail: shmyxj@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0100600); 河北省科技支撑计划(16226320D)

**Foundation project:** The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0100600), Science and Technology Planning Project of Hebei province (16226320D)

季和冬季的生长发育状态,从而导致冻害发生<sup>[3]</sup>。因此,在新形势下对于小麦抗寒性的研究仍具有重要的意义。目前,对于小麦抗寒性鉴定的研究主要集中在形态学、细胞学、生理生化、分子生物学等方面。蒋志春等<sup>[4]</sup>通过田间鉴定小麦死株率、死茎率和冻害等级来评价小麦抗寒性。刘艳阳等<sup>[5]</sup>和Bohn等<sup>[6]</sup>研究表明,低温后的细胞膜透性可用来评价小麦品种的抗寒性。朱根海等<sup>[7]</sup>利用电导率配以logistic方程求拐点温度,通过确定植物组织的低温半致死温度(LT<sub>50</sub>),进而评价植物的抗寒性。姜丽娜等<sup>[8]</sup>通过测定小麦拔节期低温胁迫下叶片的生理指标,发现可溶性糖、游离脯氨酸、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)含量,可作为小麦拔节期抗寒性鉴定评价指标。Yan等<sup>[9]</sup>根据*Vrn-A1*、*Vrn-B1*、*Vrn-D1*、*Vrn-B4*等4个基因的A基因组启动子区域,以及A、B、D3个基因组内含子区域在冬春性材料间存在插入或缺失的多态性,开发出8对引物作为区分冬春性基因型的分子标记。牟永潮等<sup>[10]</sup>发现热激蛋白、*CS66*、*Wcor8*等相关基因表达情况与小麦抗寒性有重要关系,可作为鉴定小麦抗寒性的分子指标。

准确鉴定抗寒性是冬小麦品种越冬性遗传改良的重要基础,可以在调查小麦越冬后田间调查越冬返青率,也可在室内控温冷冻处理后通过生理生化指标鉴定<sup>[11-14]</sup>。田间调查抗寒性易受环境因素

的影响,特别是遇到暖冬不易鉴定出小麦的抗寒性的真实情况。生理生化指标测定存在测定技术繁琐,测定误差较大,鉴定结果常与小麦真实越冬返青率不相吻合。小麦抗寒性分子标记开发也处于研究阶段,受基因型和检测技术的影响,其检测的效率不高。因此,寻找室内快速、准确鉴定小麦抗寒性的方法尤为重要。人工模拟低温环境是根据冬小麦长期气象资料,设置一系列低温梯度。该方法可控性强,准确度高,是目前进行植物抗寒性评价常用方法<sup>[15]</sup>。因此,本研究以209份抗寒性存在显著差异的小麦种质资源为材料,采用人工气候室模拟北方麦区大田越冬环境,通过测定不同温度处理下小麦苗期相对电导率和冷冻成活率,分析与小麦田间越冬冻害等级的相关性,探寻室内快速、准确鉴定小麦抗寒性的最适方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

选取来源广泛,且在抗寒性上差异较大的209份小麦种质为材料,包含201份我国小麦主产区(河北、北京、天津、山西、陕西、河南、山东、安徽、江苏、甘肃等省市)的主推品种和区域试验中的参试品系,以及8份美国、墨西哥、意大利等国家广泛种植的小麦品种资源,供试材料在河北省生长发育正常,综合表现较好(表1)。

表 1 209 份供试小麦材料  
Table 1 209 wheat varieties used in this study

编号 Number	名称 Name	来源 Origin	编号 Number	名称 Name	来源 Origin	编号 Number	名称 Name	来源 Origin
1	河农 2552	中国河北	13	石 05-7388	中国河北	25	豫展 10	中国河南
2	河农 825	中国河北	14	冀 5265	中国河北	26	新麦 9	中国河南
3	河农 826	中国河北	15	冀麦 585	中国河北	27	新麦 21	中国河南
4	河农 6425	中国河北	16	藁优 9409	中国河北	28	新麦 0208	中国河南
5	河农 5290	中国河北	17	金禾 9123	中国河北	29	兰考 906	中国河南
6	河农 130-12	中国河北	18	乐 639	中国河北	30	洛麦 21	中国河南
7	远大 1 号	中国河北	19	H6756	中国山东	31	百农 207	中国河南
8	河农 05 (9) 7-11-4-15	中国河北	20	富麦 5 号	中国河北	32	百农 160	中国河南
9	邯麦 9 号	中国河北	21	沧麦 119	中国河北	33	矮抗 58	中国河南
10	邯 09-41344	中国河北	22	沧麦 6005	中国河北	34	丰收 60	中国河南
11	冀麦 38	中国河北	23	周麦 28	中国河南	35	温麦 6 号	中国河南
12	石 00-7221	中国河北	24	豫麦 52 资	中国河南	36	秋乐 2122	中国河南

表 1(续)

编号 Number	名称 Name	来源 Origin	编号 Number	名称 Name	来源 Origin	编号 Number	名称 Name	来源 Origin
37	存麦 8 号	中国河南	76	周麦 18	中国河南	115	长 4853	中国山西
38	晋春 13	中国山西	77	轮早 3 号	中国山东	116	荔高 6 号	中国陕西
39	晋麦 54	中国山西	78	矮丰 3 号	中国甘肃	117	陕 160	中国陕西
40	临抗 1 号	中国山西	79	泛麦 5	中国河南	118	陕农 138	中国陕西
41	长 4738	中国山西	80	农大 211	中国北京	119	西农 509	中国陕西
42	陕麦 150	中国陕西	81	冀麦 24	中国河北	120	小偃 597	中国陕西
43	小偃 81	中国河北	82	河农 822	中国河北	121	长旱 58	中国北京
44	农大 212	中国北京	83	河农 583	中国河北	122	长武 134	中国北京
45	农大 5181	中国北京	84	河农 4198	中国河北	123	CA1092	中国北京
46	京 411	中国北京	85	河农 6049	中国河北	124	科遗 10-6089	中国北京
47	科遗 10-6014	中国北京	86	河农 05 (206) 3-10-4-9	中国河北	125	京冬 17 号	中国北京
48	京冬 8 号	中国北京	87	邯 00-7050	中国河北	126	京麦 989	中国北京
49	中种麦 17	中国北京	88	邢麦 3	中国河北	127	DH155	中国北京
50	CA0045	中国北京	89	婴泊 700	中国河北	128	CA1004	中国北京
51	轮选 103	中国河北	90	冀麦 26	中国河北	129	轮选 1690	中国北京
52	轮选 987	中国北京	91	石麦 15	中国河北	130	宿 552	中国江苏
53	津农 6 号	中国天津	92	石家庄 8 号	中国河北	131	淮麦 33	中国江苏
54	津 07214	中国天津	93	石 4366	中国河北	132	淮核 0308	中国江苏
55	未来 0818	中国安徽	94	保 5108	中国河北	133	安农 0807	中国安徽
56	ENESCO	意大利	95	石新 828	中国河北	134	山农大 6-7-8	中国山东
57	阿夫	意大利	96	冀麦 30 (冀 5418)	中国河北	135	7DL·7Ag	墨西哥
58	Atlas66	美国	97	分支 1 号	中国河北	136	山农大 3-2-1	中国山东
59	Seri	墨西哥	98	藁优 9908	中国河北	137	三颗寸	中国河北
60	徐 8133	中国江苏	99	众麦 1 号	中国河南	138	石 4185	中国河北
61	徐 9158	中国江苏	100	科育 11	中国河北	139	山农 06-27	中国山东
62	淮麦 30	中国江苏	101	华麦 1 号	中国河北	140	OASIS	墨西哥
63	保丰 0601	中国江苏	102	周麦 25	中国河南	141	马奎斯	加拿大
64	山农 20	中国山东	103	郑麦 101	中国河南	142	徐 9074	中国江苏
65	泰农 18	中国山东	104	郑麦 103	中国河南	143	保丰 702	中国江苏
66	宁麦资 22	中国山东	105	新麦 19	中国河南	144	连 5152	中国江苏
67	宁麦资 28	中国山东	106	洛麦 24	中国河南	145	淮麦 18	中国江苏
68	科农 2009	中国北京	107	丰德存 1 号	中国河南	146	徐麦 2103	中国江苏
69	皖 50	中国安徽	108	晋麦 30	中国山西	147	山农 10-2	中国山东
70	衡观 35	中国河北	109	临汾 7061	中国山西	148	山农 11	中国山东
71	豫麦 34 号	中国河南	110	临优 145	中国山西	149	泰农 19	中国山东
72	郑麦 7698	中国河南	111	吕早 1608	中国山西	150	鲁麦 14	中国山东
73	郑麦 0856	中国河南	112	舜麦 1718	中国山西	151	烟农 19	中国山东
74	周麦 16	中国河南	113	太 13606	中国山西	152	烟农 999	中国山东
75	周麦 22	中国河南	114	运早 20410	中国山西	153	汶农 17	中国山东

表 1(续)

编号 Number	名称 Name	来源 Origin	编号 Number	名称 Name	来源 Origin	编号 Number	名称 Name	来源 Origin
154	良星 99	中国山东	173	众信 5199	中国河北	192	博单 30	中国山东
155	科农 3106	中国北京	174	新麦 3 号	中国河北	193	博北 3	中国山东
156	皖 38	中国安徽	175	保 5168	中国河北	194	博北 4	中国山东
157	衡 5364	中国河北	176	宝麦 8 号	中国河北	195	徐麦 29	中国江苏
158	Ci-5	墨西哥	177	许科 168	中国河南	196	淮 0705	中国江苏
159	花培 3 号	中国河南	178	国麦 301	中国河南	197	明天 07292	中国江苏
160	豫麦 57	中国河南	179	洛麦 05095	中国河南	198	鲁原 502	中国山东
161	河农 9206	中国河北	180	晋麦 47	中国山西	199	济麦 22	中国山东
162	河农 7069	中国河北	181	临资 217	中国山西	200	烟农 21	中国山东
163	邯 6172	中国河北	182	运早 618	中国山西	201	潍阴 84137	中国山东
164	石新 618	中国河北	183	长 4640	中国山西	202	荷麦 13	中国山东
165	金博士 731	中国河北	184	秦农 142	中国陕西	203	皖麦 52	中国安徽
166	冀麦 518	中国河北	185	陕 225	中国陕西	204	皖麦 53	中国安徽
167	衡 136	中国河北	186	武农 148	中国陕西	205	阜 84111	中国安徽
168	衡 7228	中国河北	187	西农 1376	中国陕西	206	周麦 26	中国河南
169	科农 1006	中国河北	188	农大 3432	中国北京	207	陕农 33	中国陕西
170	保 5067	中国河北	189	科遗 11-6072	中国北京	208	小偃 22	中国陕西
171	金丰 7183	中国河北	190	中麦 175	中国北京	209	徐麦 31	中国江苏
172	正早 36	中国河北	191	轮选 901	中国北京			

1.2 田间种植

2016 年秋,在平均气温较低的北部冬麦区,选取保定市(115°48′E,38°85′N)、保定涞源县(114°67′E,39°37′N)、沧州青县(116°80′E,38°58′N)种植供试材料。2017 年秋将供试材料种植于保定市、唐山乐亭县(118°9′E,39°42′N)、

沧州青县(4 个地区 10 月至次年 3 月的日平均气温变化见图 1、图 2)。试验地均为小麦育种科研用地,肥力均匀,管理规范。采用完全随机设计,行长 150 cm,行距 25 cm,株距 2.5 cm,3 次重复。常规田间管理。于 2 月底至 3 月初小麦返青后,调查植株冻害等级。

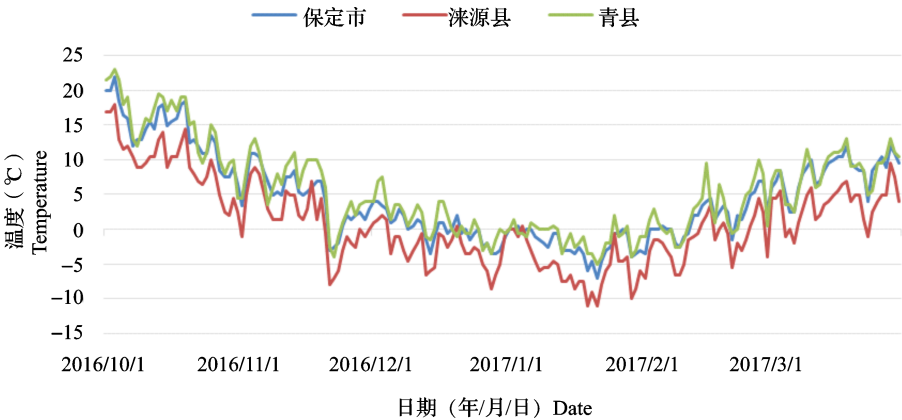


图 1 2016-2017 年 3 个地区的日均气温变化图

Fig.1 Daily average temperature of three locations in winter of 2016 to 2017

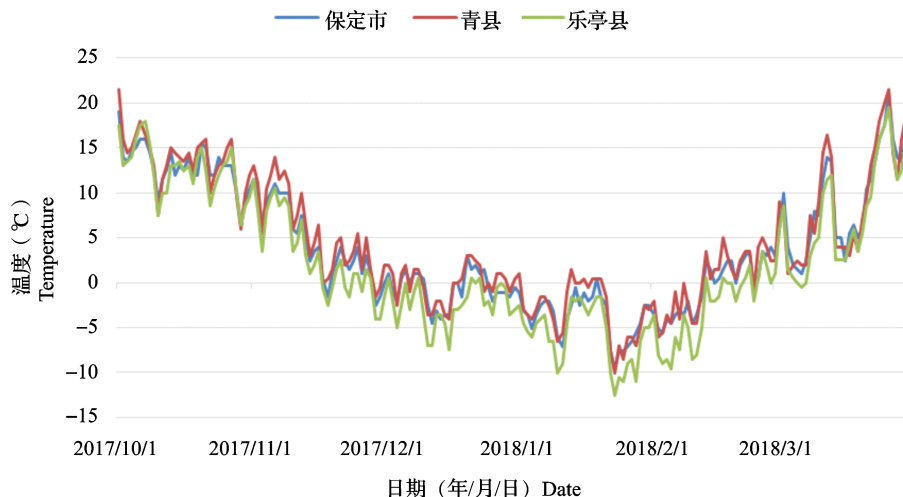


图2 2017-2018年3个地区的日均气温变化图

Fig.2 Daily average temperature of three locations in winter of 2017 to 2018

### 1.3 室内培养

浸泡法催芽,将露白后的种子种在花盆中,每个品种3次重复,40株/盆,蛭石培养,置于人工气候室20℃16h光照培养至3叶期(20d),期间浇灌hogland营养液。之后在人工气候室4℃12h光照/0℃12h黑暗条件下冷驯化2周。驯化结束后进行冷冻试验,统计冷冻成活率并测定相对电导率。

### 1.4 抗寒性鉴定

**1.4.1 田间冻害等级的鉴定** 依据返青期叶片和茎受冻害程度进行鉴定,并分为5级,参照申宗坦<sup>[16]</sup>的鉴定方法,0级:叶片没有冻死部分;1级:叶片冻死部分仅限于叶尖,下部叶片未受冻或很少,全田绿色叶多;2级:叶片冻死部分少于绿叶部分,但下部叶片冻死者较多,地面有枯黄叶;3级:叶片冻死部分多于绿叶部分,地面可见整片枯叶,绿色叶片较少;4级:上下部叶片全部冻死枯黄,全是枯叶,甚至全株死亡。记载时,可增设“+”、“-”符号作补充,如2+表示比2级冻害重些,2-表示比2级冻害轻些。统计分析时,冻害等级1+、2-、2、2+、3-、3、3+、4可分别由4、5、6、7、8、9、10、11代替,以方便计算。

**1.4.2 冷冻成活率的测定** 取小麦分蘖节(根茎以上2~3cm和根系0.5~1cm)部分<sup>[17]</sup>,在人工气候室置于-3℃24h,之后以2℃/h梯度降温至-16℃,5个处理温度(-8℃、-10℃、-12℃、-14℃、-16℃),每个温度处理20株(3次重复)3h。冷冻结束后对样品进行4℃解冻20h。20℃恢复培养2周,统计并计算冷冻成活率。冷冻成活率=冷冻成

活株数/总株数×100%<sup>[18]</sup>。

**1.4.3 相对电导率的测定** 用METTLER TOLEDO FE30型电导仪测定。将新鲜的分蘖节用去离子水洗净表面的蛭石和残存营养液,拭干表面水分后剪成1mm小段,准确称取0.2g混匀样品,置于20mL具塞刻度试管中,加入20mL去离子水,真空泵抽滤15min,缓缓放入空气,样品沉入水下,将试管室温放置振荡培养箱中振荡1h,测定其电导率(C1),然后将带样试管盖塞放入水浴锅中100℃煮沸15min,杀死叶片组织,取出后冷却至室温,摇匀,测其终电导率(C2)。每个样品3次重复。相对电导率=C1/C2×100%<sup>[19]</sup>。

**1.4.4 半致死温度的测定** 低温胁迫下细胞相对电导率与胁迫温度之间的关系呈S型曲线,与Logistic方程: $y=k/(1+ae^{-bx})$ 具有较好的拟合度。利用Excel、SPSS 19.0软件,将各处理温度下的相对电导率用Logistic方程拟合,方程中,y为细胞电导率,x为处理温度;a、b、k为方程参数<sup>[20]</sup>。通过直线回归分析,得a、b值及相关系数R,半致死温度 $LT_{50}=\ln a/b$ ,根据相对电导率测定结果和各品种半致死温度 $LT_{50}$ ,确定抗寒性<sup>[21]</sup>。

### 1.5 统计分析

应用Excel 2007软件对数据进行统计分析,SPSS 19.0软件对数据进行描述性统计、相关性分析、回归分析和聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 越冬后田间冻害等级分布

6个环境下,田间鉴定小麦的冻害等级分布在

1+、2-、2、2+、3-、3、3+、4 共 8 个等级(表 2), 其中, 2017 年在涞源试点, 冻害等级的最小值为 2-, 最大值为 4, 变异系数最大, 为 27.03%; 2018 年在青县试点冻害等级最小值为 1+, 最大值为 4, 变异系数最小, 为 7.55%。此外, 由于 2018 年日平均气温普遍低于 2017 年同时期气温, 故 2018 年冻害较严重。在 6 个环境

下, 抗寒性表现好的品种有保 5108、京 411、石家庄 8 号、河农 05(9)7-11-4-15、河农 7069、石新 828、众麦 1 号、石麦 15 等; 抗寒性中等的品种有轮选 1690、衡观 35、周麦 16、长 4640、济麦 22、科农 2009、烟农 999、轮选 901 等; 抗寒性差的品种有晋春 13、博北 3、博北 4、Seri、OASIS、博单 30、阿夫、武农 148 等。

表 2 不同试点冻害等级  
Table 2 Statistics of freeze damage at different regions in 2017 and 2018

试点 Regions	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数(%) CV
2017 保定 2017Baoding	4	11	6.46	0.82	12.69
2017 涞源 2017Laiyuan	5	11	7.03	1.90	27.03
2018 保定 2018Baoding	4	11	9.29	0.81	8.72
2018 唐山 2018Tangshan	6	11	9.58	1.27	13.26
2017 青县 2017Qingxian	4	11	6.39	0.89	13.93
2018 青县 2018Qingxian	5	11	9.14	0.69	7.55

1+、2-、2、2+、3-、3、3+、4 分别由 4、5、6、7、8、9、10、11 代替冻害等级  
1+, 2-, 2, 2+, 3-, 3, 3+, 4 were replaced by 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 and 11 respectively

2.2 室内不同温度处理下品种冷冻成活率的比较分析  
经过 5 个不同温度处理 3 h 后, 不同小麦品种的冷冻成活率差异显著 ( $P<0.01$ ) (表 3)。-8℃ 冷冻处理后供试材料的成活率介于 61.82%~100.00% 之间(图 3), 平均成活率为 97.22%, 主要集中在区间 90.01%~100.00% 中, 样本数量为 194 个, 占参试品种总数的 92.82%; 存活率在 60.01%~70.00%、70.01%~80.00% 和 80.01%~90.00% 的品种占极少数, 分别为 1、3 和 11 个。其中成活率为 100.00% 的品种数量为 106 个, 占参试总数的 50.71%。品种晋春 13 的成活率最小, 为 74.47% 的是。此温度下供试材料成活率的变异系数最小, 为 5.09%。

表 3 不同温度冷冻处理后小麦成活率  
Table 3 Survival rates of wheat seedling plants after freezing treatment under different temperature conditions

温度(℃) Temperature	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	显著性 Sig.
-8	61.82	100.00	97.22	4.95	5.09	**
-10	0.00	100.00	89.67	14.24	15.88	**
-12	0.00	100.00	72.97	25.21	34.55	**
-14	0.00	98.04	44.92	31.06	69.14	**
-16	0.00	90.48	15.20	19.76	130.04	**

\*\* : 在 0.01 水平显著, 不同  
\*\* : Significant at 0.01 level, the same as below

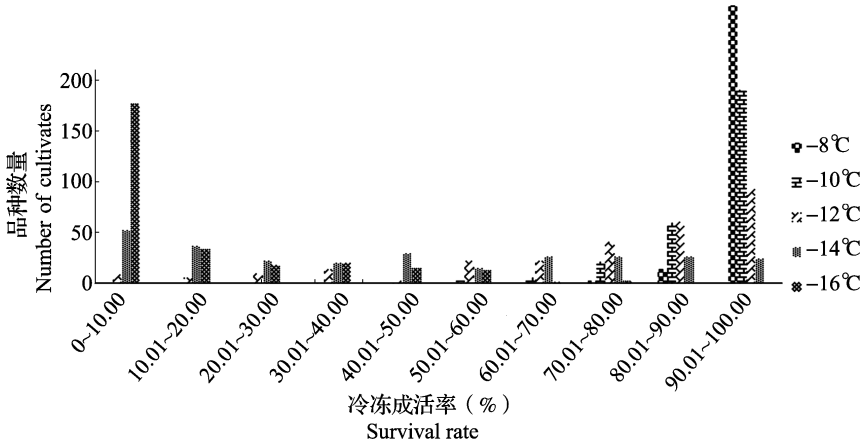


图 3 不同温度冷冻处理后小麦成活率分布  
Fig.3 Distribution of wheat varieties post after freezing treatment

-10 ℃ 冷冻处理后供试材料的成活率介于 0~100.00% 之间, 平均成活率为 89.67%, 主要集中在 90.01%~100.00% 区间, 样本数量为 136 个, 占参试品种总数的 65.07%, 成活率为 100.00% 的品种数量为 43 个, 占参试总数的 20.57%, 品种晋春 13 在此温度冷冻后全部死亡, 成活率为 0。该温度下供试材料成活率的变异系数为 15.88%。

-12 ℃ 冷冻处理后供试材料的成活率介于 0~100.00% 之间, 平均成活率为 72.97%, 主要集中在 80.01%~90.00% 和 90.01%~100.00% 区间, 样本数量分别为 44 和 67 个, 占参试品种总数的 20.05% 和 32.06%, 成活率为 100.00% 的品种数量为 6 个。成活率为 0 的品种有 3 个, 分别为品种晋春 13、西农 509 和武农 148。该温度下供试材料成活率的变异系数为 34.55%。

-14 ℃ 冷冻处理后供试材料的成活率介于 0~98.04% 之间, 各区间品种数量分布均匀, 平均成活率为 44.92%, 品种保 5108 成活率最高 (98.04%), 成活率为 0 的品种数量有 12 个, 该温度下供试材料成活率的变异系数为 69.14%。

-16 ℃ 冷冻处理后成活率介于 0~90.48% 之间, 其中主要集中在 0~10.00% 区间, 品种数量为 126 个, 占参试小麦总数的 60.29%, 平均成活率为 15.20%, 成活率最高的品种为众麦 1 号 (90.48%), 成活率为 0 的品种数量为 67 个, 占参试品种总数的 32.06%, 该温度下的变异系数最大, 为 130.04%。

以邯 09-41344、冀 5265、衡观 35、秋乐 2122、晋春 13 为例 (5 个品种田间冻害等级均值分别为 7.50、7.75、8.42、8.58、11.00), 不同温度处理下小麦冷冻成活率逐渐降低 (图 4), 其中, 晋春 13 下降最快, -10 ℃ 条件下全部死亡, 冀 5265 下降最缓慢, 衡观 35 下降速度处于中间水平, 这与田间冻害等级的

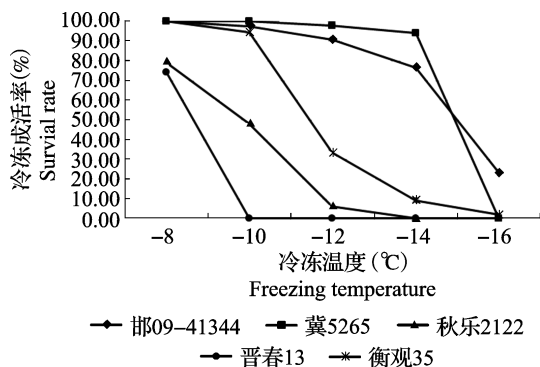


图 4 不同冷冻温度下 5 个品种的成活率变化  
Fig.4 The survival rate of five varieties post freezing treatment

结果一致。图 5 为 5 个品种室内冷冻处理后恢复培养 2 周后的长势情况, 说明不同品种在每个冷冻温度处理下的成活率不同。



图中 10、14、36、38、70 分别代表品种邯 09-41344、冀 5265、衡观 35、秋乐 2122、晋春 13

10, 14, 36, 38, and 70 represent the varieties, Han 09-41344, Ji 5265, Hengguan 35, Qiule 2122, Jinchun 13

图 5 不同冷冻温度下 5 个品种的恢复生长情况  
Fig.5 The recovery growth of five varieties under different freezing temperatures

### 2.3 不同温度处理下品种相对电导率的比较分析

209 份供试的小麦品种在 5 个不同温度处理 3 h 后的相对电导率差异显著 ( $P < 0.01$ ) (表 4)。 $-8$  ℃ 冷冻处理后供试材料相对电导率分布在 6 个区间 (图 6), 均值为 47.07%, 主要集中在区间 40.01%~50.00%, 品种数量为 96 个, 占参试品种总数的 45.93%。相对电导率最大值品种农大 211 的电导率为 76.38%, 为最小值品种周麦 25 的电导率

为 25.71%。-10 ℃ 冷冻处理后的各小麦品种的相对电导率均有所增加,均值为 52.49%,其中相对电导率最大的品种徐 9074,电导率为 71.67%,相对电导率最小的品种科遗 10-6014,电导率为 31.56%;电导率在区间 50.01%~60.00% 品种数量最多,为 101 个,占参试品种总数的 48.33%。-12 ℃ 冷冻处理后的各小麦电导率均值为 62.79%,其中最大值品种新麦 9 的电导率为 90.31%,最小值品种邢麦 3 的电导率为 44.25%。该温度下供试材料电导率分布主要集中在 50.01%~60.00% 区间,变异系数最大,为 19.08%,表明 -12 ℃ 冷冻 3 h 后各品种受冻害的差异较大。-14 ℃ 冷冻处理后的相对电导率均值为 71.95%,最大值品种 Atlas66 的电导率为 92.17%,最小值品种农大 211 的电导率为 46.41%,此温度下供试材料电导率的区间分布较均匀。-16 ℃ 冷冻处理后相对电导率均值为 80.79%,最小值为 50.30,最大值为 94.88%,其中相对电导率大于 70% 的品种数量占参试品种总数的 88.04%,表明品种在该温度下小麦冻害最为严重,变异系数最小,仅为 9.84%,

说明多数品种受冻害程度一致。

表 4 不同温度冷冻处理后小麦相对电导率  
Table 4 Relative conductivity of wheat after different temperature freezing treatment

温度(℃) Temperature	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	显著性 Sig.
-8	25.71	76.38	47.07	7.76	16.48	**
-10	31.56	71.67	52.49	7.26	13.84	**
-12	44.25	90.31	62.79	9.98	15.89	**
-14	46.41	92.17	71.95	10.37	14.37	**
-16	50.30	94.88	80.79	7.95	9.84	**

此外,同一品种在不同温度冷冻处理下的电导率不同,随着处理温度的降低,相对电导率逐渐升高(图 7)。以品种邯 09-41344、冀 5265、秋乐 2122、晋春 13、衡观 35 为例,随着处理温度的降低,5 个品种的相对电导率均升高,-8 ℃ 处理温度下相对电导率

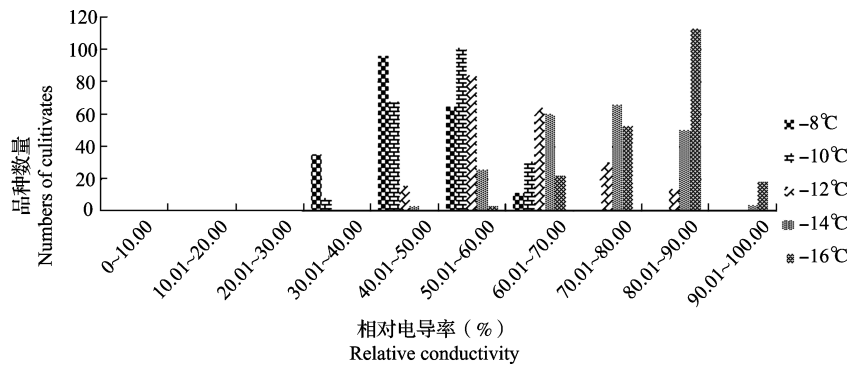


图 6 不同温度冷冻处理后小麦相对电导率分布  
Fig.6 Distribution of relative conductivity after freezing treatment

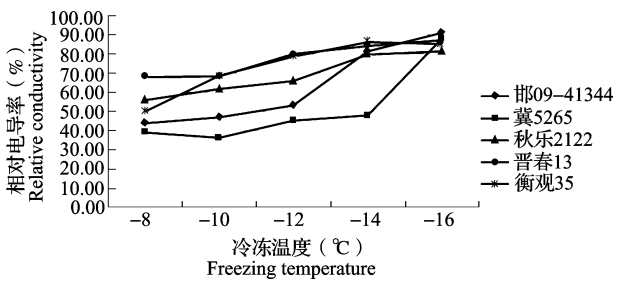


图 7 不同冷冻温度下 5 个品种的相对电导率变化  
Fig.7 The relative conductivity of five varieties post freezing treatment

大小顺序为晋春 13> 秋乐 2122> 衡观 35> 邯 09-41344> 冀 5265;-16 ℃ 时,5 个品种的相对电导率均集中在 80.01%~90.00% 水平,值的大小差异很小。

品种冀 5256 的相对电导率整体水平较其他 4 个品种低,晋春 13 和衡观 35 的相对电导率水平除 -8 ℃ 冷冻处理外,其他温度均一致。冀 5265 的相对电导率在区间 -14~-16 ℃ 迅速升高,而邯 09-41344 的相对电导率在 -12~-14 ℃ 迅速升高,说明这两个品种对低温的适应能力不同。

2.4 半致死温度分析

采用电导法配合 Logistic 回归方程计算出不同小麦品种的半致死温度(表 5),通过不同低温处理后,209 份小麦品种半致死温度范围为 -4.30~-15.29 ℃,均值为 -8.41 ℃。其中半致死温度较低的品种有农大 211(-15.29 ℃)、乐 639(-11.46 ℃)、河农 9206(-10.25 ℃)等,这些品种在其他鉴定指标

中抗寒性表现均较好,半致死温度最高的品种为晋春 13,该品种为春性小麦品种,在其他鉴定指标中抗寒性表现差。

## 2.5 小麦室内抗寒性状与田间冻害等级的相关性分析

室内抗寒性状与大田冻害等级之间相关系数分析结果(表 6)表明,冻害等级在 6 个环境下均表现出极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数在 0.482~0.713 之间。 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温处理下的冷冻成活率与每个环境的冻害等级之间均呈极显著负相关,相关系数均值分别为  $-0.302$ 、 $-0.427$ 、 $-0.336$ ;相对电导率中, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温处理下的电导率与 6 个环境的冻害等级呈显著( $P<0.05$ )正相关, $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度处理下的相对电导

率除与 E3、E4、E6 显著相关外,在其他环境下相关均不显著, $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度处理下的相对电导率与 6 个环境的冻害等级相关均不显著;半致死温度与 6 个环境的冻害等级均呈极显著相关,相关系数均值为 0.325 ( $r<0.427$ )。因此, $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温处理 3 h 后,小麦冷冻成活率与田间冻害等级相关系数最高,室内可以通过  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温冷冻 3 h 后的小麦冷冻成活率来鉴定不同小麦品种抗寒性大小。

## 2.6 小麦抗寒指标的聚类分析

利用 SPSS 19.0 数据处理软件中的系统聚类法,根据 6 个环境下田间冻害等级和室内  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理下的小麦冷冻成活率两个抗寒指标对 209 份供试材料进行聚类分析,在遗传距离为 12 处,可将供试品种分成 3 类(图 8)。

表 5 不同小麦品种的半致死温度 ( $LT_{50}$ )

Table 5 Semi-lethal temperature ( $LT_{50}$ ) of different wheat varieties

项目 Item	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	拟合度 $R^2$
$LT_{50}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) Lethal temperature	-4.30	-15.29	-8.41	1.08	12.87	0.86**~1.00**

表 6 室内抗寒指标与 6 个环境的冻害等级之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between indoor cold resistance index and frost damage grade in six environments

	FDG-E1	FDG-E2	FDG-E3	FDG-E4	FDG-E5	FDG-E6	FSR-1	FSR-2	FSR-3	FSR-4	FSR-5	REC-1	REC-2	REC-3	REC-4	REC-5	$LT_{50}$
FDG-E1	1.000																
FDG-E2	0.618**	1.000															
FDG-E3	0.629**	0.573**	1.000														
FDG-E4	0.528**	0.563**	0.519**	1.000													
FDG-E5	0.645**	0.604**	0.702**	0.713**	1.000												
FDG-E6	0.586**	0.482**	0.672**	0.534**	0.685**	1.000											
FSR-1	-0.266**	-0.331**	-0.197**	-0.172*	-0.072	-0.077	1.000										
FSR-2	-0.304**	-0.421	-0.253**	-0.199**	-0.181**	-0.222**	0.665**	1.000									
FSR-3	-0.283**	-0.537**	-0.294**	-0.246**	-0.247**	-0.209**	0.452**	0.670**	1.000								
FSR-4	-0.358**	-0.559**	-0.477**	-0.394**	-0.386**	-0.392**	0.318**	0.441**	0.685**	1.000							
FSR-5	-0.309**	-0.519**	-0.408**	-0.218**	-0.288**	-0.275**	0.233**	0.312**	0.426**	0.525**	1.000						
REC-1	0.212**	0.173**	0.190**	0.152**	0.216**	0.151*	-0.121	-0.175*	-0.276**	-0.280**	-0.149*	1.000					
REC-2	0.228**	0.228*	0.278**	0.246**	0.312**	0.278**	-0.181**	-0.217**	-0.242**	-0.124	-0.183**	0.419**	1.000				
REC-3	0.208**	0.173*	0.239**	0.187**	0.247**	0.277**	-0.045	-0.093	-0.287**	-0.233**	-0.197**	0.327**	0.388**	1.000			
REC-4	0.121	0.098	0.149*	0.143*	0.104	0.155*	-0.084	-0.084	-0.181**	-0.199**	-0.211**	0.286**	0.301**	0.511**	1.000		
REC-5	0.002	0.046	0.023	0.014	0.014	0.044	0.037	-0.001	-0.133	-0.175*	-0.078	0.238**	0.068	0.352**	0.594**	1.000	
$LT_{50}$	0.326**	0.415**	0.317**	0.289**	0.327**	0.276**	-0.237**	-0.277**	-0.286**	-0.139*	-0.234**	0.260**	0.398**	0.306**	0.136	-0.198**	1.000

FDG、FSR、REC 分别代表冻害等级、冷冻成活率、相对电导率, E1、E2、E3、E4、E5、E6 分别代表 2017 保定、2017 涿源、2018 保定、2018 乐亭、2017 青县、2018 青县共 6 个环境。1~5 分别代表  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理温度;\*: 在 0.01 水平显著;\*: 在 0.05 水平显著

FDG, FSR, REC represent the frost damage grade, freezing survival rate and relative conductivity, respectively. E1, E2, E3, E4, E5, and E6 represent 2017 Baoding, 2017 Laiyuan, 2018 Baoding, 2018 Laoting, 2017 Qingxian, 2018 Qingxian respectively. 1~5 represent freezing temperature in  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , \*\*: significant at 0.01 level; \*: significant at 0.05 level

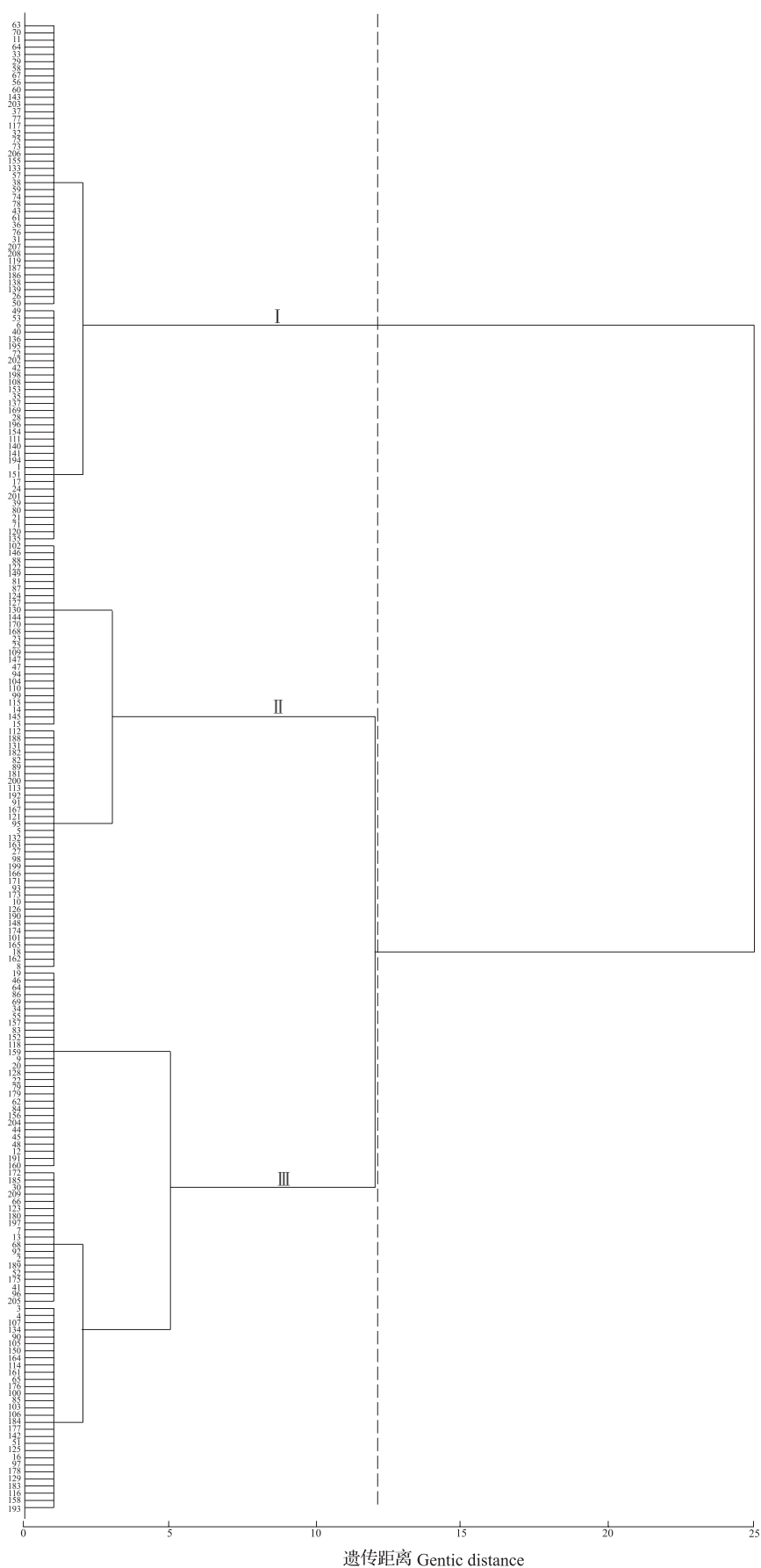


图 8 209 份小麦抗寒性状聚类分析图

Fig.8 Cluster of 209 wheat varieties using phenotypic datasets

I 类共 73 份材料,分布地区最广,来自国内河北、河南、山西等 10 个省份(表 7)以及国外加拿大等国家,其中天津市、甘肃省供试材料全部分布于此类;河南省、陕西省、山东省和国外的供试材料主要分布在此类中,分别占各自地区供试材料总数的 48.57%、66.67%、44.00% 和 87.50%。该类特点是冻害等级高于 2+, 冷冻成活率小于 23.53%, 品种抗寒性弱。此类中包括晋春 13、阿夫、Atlas66、Seri、OASIS、武农 148、博北 4 和徐麦 29 等品种。

表 7 各地区小麦品种在 I~III 类中的百分比

Table 7 Percentage of wheat varieties in each

region in the I - III category

(%)

地区 Region	I	II	III
河北 Hebei	15.87	42.86	41.27
河南 Henan	48.57	17.14	34.29
山西 Shanxi	31.25	43.75	25.00
陕西 Shanxi	66.67	0.00	33.33
北京 Beijing	16.67	33.33	50.00
天津 Tianjin	100.00	0.00	0.00
山东 Shandong	44.00	24.00	32.00
江苏 Jiangsu	37.50	37.50	25.00
安徽 Anhui	28.57	0.00	71.43
甘肃 Gansu	100.00	0.00	0.00
国外 Abroad	87.50	0.00	12.50

II 类共 60 份材料,来自 6 个省(市)份,其中河北省、山西省的供试材料主要分布在此类,分别占各自地区供试材料总数的 42.86% 和 43.75%。该类特点是冻害等级低于 2+, 冷冻成活率高于 69.12%, 品种抗寒性较强。此类中包括河农 05(9)7-11-4-15、冀麦 585、乐 639、石麦 15、保 5108、石新 828、众麦 1 号和河农 7069 等品种。

III 类共 76 份材料,来自国内 8 个省份以及国外地区,其中北京市和安徽省的供试材料主要分布在此类,分别占各自地区供试材料总数的 50.00% 和 71.43%。该类特点是冻害等级介于 2~3+ 之间,冷冻成活率为 24.19%~66.67%, 品种抗寒性中等。此类中包括洛麦 21、长 4738、泰农 18、科农 2009、轮选 1690、烟农 999、长 4640 和轮选 901 等品种。

### 3 讨论

抗寒性是小麦广适性的重要特性之一<sup>[22]</sup>。低

温冻害引起小麦生长发育期间一系列的适应性变化,可从植株外部特征(死苗、死蘖、枯叶率)和内部生理因素变化方面来判定<sup>[23-24]</sup>。田间鉴定是从外部特征研究小麦抗寒性,例如计算枯株、枯茎的百分率法和田间目测法等田间直接鉴定方法,对小麦的外部特征变化进行统计调查。冻害等级是对品种抗寒性最直观的鉴定方法<sup>[25-27]</sup>。目前认为大田直接鉴定法是最可靠的鉴定方法,张丽华等<sup>[28]</sup>对黄淮海南部小麦的抗寒性进行鉴定,得出小麦越冬期的枯叶率可与死苗、死蘖率同时作为小麦抗寒性鉴定的重要指标。由于田间鉴定受环境影响较大,需要设计多年多点重复试验,耗时长、工作量大,因此需要找到一个快速准确简便的鉴定方法。此外,植物的抗寒性是一个非常复杂的数量性状,与冬春性相关联又不完全紧密连锁<sup>[29]</sup>,孙果忠等<sup>[30]</sup>利用分子标记技术,对 134 份小麦品种进行研究,探讨了春化 VRN-1 等位基因组成与耐寒性的关系,研究发现,来源于同一生态区的品种,其耐寒性一般随着 VRN-1 显性等位基因控制的春化效应的增强而降低。小麦的耐寒性是一个复杂的性状,除与春化基因有关外,还与品种的抗逆性(抗旱、耐瘠薄)幼苗习性、分蘖节入土深度等因素有关<sup>[14]</sup>,尽管一些品种 VRN-1 等位基因组成相同,但耐寒性却存在很大差异,因此,尽管许多春化基因和抗寒位点相继被报道,但真正能用于分子育种生产实践中的却很少。人工模拟抗寒性鉴定是在室内给予作物连续低温,测定低温下能反映作物受损伤程度的指标的方法,更具可重复性,可设置多个冷冻温度,比较不同冷冻温度下植物受冻害情况,继而评价植物抗寒性。细胞膜是对逆境最敏感的原始反应部位,低温发生时,膜透性增加,大量电解质外渗,使植物细胞浸提液电导率增大<sup>[31]</sup>。通过测定电导率并结合 logistic 方程求得植物的半致死温度,来评价植物本身的抗寒性是一种十分重要的方法。小麦越冬成活的部位为分蘖节,低温冷冻后,测定该部位的电导率可以鉴定冷冻后植株的受伤害程度。本研究通过测定不同小麦品种冷冻后分蘖节部的电导率,得出 LT<sub>50</sub> 与田间冻害等级显著正相关( $r=0.325$ ),因此该指标可以作为室内鉴定抗寒性的方法。

冷冻成活率是室内鉴定小麦抗寒能力最直接的鉴定方法,也是植株抗寒能力的最终体现。本研究通过对小麦分蘖节相对电导率和冷冻成活率的测

定,与田间小麦越冬冻害等级做相关性分析得出,充分冷驯化后以  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  冷冻 3 h 之后的小麦冷冻成活率与田间冻害等级呈显著负相关,且相关系数最大 ( $r=0.427$ ),与电导率求得半致死温度方法相比,测定方法更为简便准确,为室内鉴定小麦抗寒性的最适新方法,同时鉴定出河农 05(9)7-11-4-15、冀麦 585、乐 639、石麦 15、保 5108、石新 828、众麦 1 号和河农 7069 等抗寒性较强的品种。

## 参考文献

- [1] 郑大伟,李茂松,霍志国.2008 年南方低温冰雪灾害对农业的影响及对策.防灾科技学院学报,2008,10(2):1-4  
Zheng D W, Li M S, Huo Z G. Effects of 2008 snow disaster in southern China on agriculture and countermeasures. Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 2008, 10(2): 1-4
- [2] 李艳,王式功,马玉霞.全球气候变暖对我国小麦的影响研究综述.环境研究与检测,2006,19(2):11-13  
Li Y, Wang S G, Ma Y X. Review of the effects of global warming on Wheat in China. Environmental Study and Monitoring, 2006, 19(2): 11-13
- [3] 沈漫,王明麻,黄敏仁.植物抗寒机理研究进展.植物学通报,1997,14(2):1-8  
Shen M, Wang M M, Huang M R. Advances in research on mechanism of cold resistance in plants. Chinese Bulletin of Botany, 1997, 14(2): 1-8
- [4] 蒋志春,辛艳,吕志梅,周芳臣,李红梅,韩桂丽.冬小麦抗寒性级别划分与鉴定试验.天津农林科技,2005(1):7-8  
Jiang Z C, Xin Y, Lv Z M, Zhou F C, Li H M, Han G L. Classification and identification of winter wheat cold resistance. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, 2005(1): 7-8
- [5] 刘艳阳,李俊周,陈磊,崔党群.低温胁迫对小麦叶片细胞膜脂质过氧化产物及相关酶活性的影响.麦类作物学报,2006,26(4):70-73  
Liu Y Y, Li J Z, Chen L, Cui D Q. Effect of low temperature stress on peroxidation product of membrane lipids and activity of related enzymes in wheat seedling leaves. Journal Triticeae Crops, 2006, 26(4): 70-73
- [6] Bohn M, Luthje S. Plasma membrane lipid alterations induced by cold acclimation and abscisic acid treatment of winter wheat seedlings differing in frost resistance. Plant Physiology, 2007(164): 146-156
- [7] 朱根海,刘祖祺,朱培仁.应用 logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究.南京农业大学学报,1986,9(3):11-16  
Zhu G H, Liu Z Q, Zhu P R. Application of Logistic equation to determine the semi lethal temperature of plant tissues at low temperature. Journal of Nanjing Agricultural University, 1986, 9(3): 11-16
- [8] 姜丽娜,张黛静,宋飞,刘佩,樊婷婷,余海波,李春喜.不同品种小麦叶片对拔节期低温的生理响应及抗寒性评价.生态学报,2014,34(15):4251-4261  
Jiang L N, Zhang D J, Song F, Liu P, Fan T T, Yu H B, Li C X. Evaluation of cold resistance of different wheat varieties based on physiological responses of leaves to low temperature at the jointing stage. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4251-4261
- [9] Yan L, Fu D M, Li C C, Blechl A, Tranquilli G, Bonafede M, Sanchez A, Valarik M, Yasuda S, Dubcovsky J. The wheat and barley vernalization gene *Vrn3* is an orthologue of FT. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006(103): 19581-19586
- [10] 牟永潮,崔红,于晶,苍晶,曾俨,孟健男.低温胁迫下东农冬麦 1 号分蘖节 SSH 文库的构建及文库中 3 个基因的表达模式.作物学报,2011,37(5):918-923  
Mu Y C, Cui H, Yu J, Cang J, Zeng Y, Meng J N. Expression analysis of three genes from SSH library constructed using tillering nodes of Dongnongdongmai 1 under low temperature. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(5): 918-923
- [11] Badawi M, Danyluk J, Boucho B, Sarhan F. The *CBF* gene family in hexaploid wheat and its relationship to the phylogenetic complexity of cereal *CBFs*. Molecular Genetics and Genomics, 2007, 277(5): 533-554
- [12] Fowler D B, Limin A E, Wang S Y, Ward R W. Relationship between low-temperature tolerance and vernalization response in wheat and rye. Canadian Journal of Plant Science, 1996, 76(1): 37-42
- [13] Mastrangelo A M, Belloni S, Barilli S, Cattivelli L. Low temperature promotes intron retention in two ecor genes of durum wheat. Planta, 2005, 221(5): 705-715
- [14] 赵玉田,梁博文.冬小麦抗冻性鉴定的方法指标及筛选.中国农业科学,1987,20(6):74-80  
Zhao Y T, Liang B W. Methods and screening of the identification of winter wheat frost resistance. Scientia Agriculture Sinica, 1987, 20(6): 74-80
- [15] 李卓夫,李莹,王晓楠.不同抗寒性冬小麦品种间冷冻后电导率与成活率比较分析.东北农业大学学报,2014,45(6):1-5  
Li Z F, Li Y, Wang X N. Comparative analysis of electrical conductivity and survival rate on winter wheat varieties with different cold resistances after freezing treatment. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(6): 1-5
- [16] 申宗坦.作物育种学实验.北京:中国农业出版社,1992  
Shen Z T. Experiment of crop breeding. Beijing: China Agriculture Press, 1992
- [17] Gusta L V, Boyachek M, Fowler D B. A system for freezing biological materials. Horticulture Science, 1978, 13: 171-172
- [18] 陈超,宋吉仁,王晓楠,付连双,谢冬微,李卓夫.寒地冬小麦抗寒性评价方法的初探.中国农学通报,2014,30(18):55-59  
Chen C, Song J R, Wang X N, Fu L S, Xie D W, Li Z F. Assessment Method of Cold-resistance on Winter Wheat. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(18): 55-59
- [19] Fowler D B, Gusta L V, Tyler N J. Selection for winter hardiness in wheat. III. Screening methods. Crop Science, 1981, 5: 896-901
- [20] 许瑛,陈发棣.菊花 8 个品种的低温半致死温度及其抗寒适应性.园艺学报,2008,35(4):559-564  
Xu Y, Chen F D. The  $LT_{50}$  and cold tolerance adaptability of chrysanthemum during a natural drop in temperature. Acta Horticulture Sinica, 2008, 35(4): 559-564
- [21] 盖钧镒.试验统计方法.北京:中国农业出版社,2000:56-59  
Gai J Y. Test statistical method. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 56-59

- [ 22 ] Briggie L W, Curtis B C. Wheat worldwide. In wheat and wheat improvement. USA, 1987: 1-32
- [ 23 ] 皇甫自起, 常守乾, 李秀花, 陈德华. 豫东地区小麦冻害调查分析. 河南农业科学, 1996 ( 4 ): 3-6  
Huangfu Z Q, Chang S Q, Li X H, Chen D H. Investigation and analysis of wheat frost damage in the east of Henan province. Journal of Henan Agricultural Sciences, 1996 ( 4 ): 3-6
- [ 24 ] 任永波, 段拥军. 作物抗寒性鉴定指标的分类及其应用. 西昌农业高等专科学校学报, 2002, 16 ( 2 ): 43-46  
Ren Y B, Duan Y J. Classification and application of crop cold resistance identification index. Journal of Xichang Agricultural College, 2002, 16 ( 2 ): 43-46
- [ 25 ] 王红飞, 李锡香, 董洪霞, 王海平, 宋江萍, 邱杨, 张晓辉, 沈镒. 黄瓜核心种质芽期低温耐受性鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2016, 17 ( 1 ): 6-12  
Wang H F, Li X X, Dong H X, Wang H P, Song J P, Qiu Y, Zhang X H, Shen D. Cold tolerance identification at germination stage of cucumber core germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17 ( 1 ): 6-12
- [ 26 ] 程嘉琪, 沈镒, 李锡香, 王海平, 邱杨, 宋江萍. 黄瓜核心种质低温耐受性的田间评价. 植物遗传资源学报, 2012, 13 ( 4 ): 660-665  
Cheng J Q, Shen D, Li X X, Wang H P, Qiu Y, Song J P. Field evaluation of resistances to low temperature in core collections of cucumber germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13 ( 4 ): 660-665
- [ 27 ] 柏斌, 吴俊, 庄文, 姚栋萍, 李莺歌, 邓启云. 广适性光温敏不育系 Y58S 幼穗分化期耐冷性表现及生理机制. 植物遗传资源学报, 2017, 18 ( 4 ): 646-652  
Bai B, Wu J, Zhang W, Yao D P, Li Y G, Deng Q Y. Studies on cold tolerance of widely adaptable PTGMS line Y58S and its physiological mechanism at booting stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18 ( 4 ): 646-652
- [ 28 ] 张丽华, 梁双波, 崔永增, 张丽, 姚海坡, 贾秀领. 黄淮海南部小麦抗寒性比较及指标筛选. 中国农学通报, 2014, 30 ( 12 ): 77-81  
Zhang L H, Liang S B, Cui Y Z, Zhang L, Yao H P, Jia X L. Comparison of cold resistance in winter wheat and index selection in the south of Huanghuaihai. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30 ( 12 ): 77-81
- [ 29 ] 刘方方. 小麦抗寒相关基因克隆及分子标记开发. 合肥: 安徽农业大学, 2016  
Liu F F. Cloning of cold-related resistance genes and molecular marker development in wheat. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016
- [ 30 ] 孙果忠, 李海霞, 雷秀玉, 朱东旭, 王海波. 小麦品种耐寒性与春化 VRN-1 等位基因的关系研究. 植物遗传资源学报, 2013, 14 ( 2 ): 270-277  
Sun G Z, Li H X, Lei X Y, Zhu D X, Wang H B. Relationship analysis between cold hardiness and vernalization VRN-1 alleles in wheat varieties. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14 ( 2 ): 270-277
- [ 31 ] 王宝山. 逆境植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2010: 26-30  
Wang B S. Adversity plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2010: 26-30