

DOI: 10.5846/stxb201307271962

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.

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

姜丽娜,张黛静,宋 飞,刘 佩,樊婷婷,余海波,李春喜*

(河南师范大学生命科学学院, 新乡 453007)

摘要:以黄淮海麦区参加区试的 24 个小麦品种为材料,分析了拔节期低温胁迫对其叶片相对电导率、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、丙二醛(MDA)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的影响。结果表明,低温胁迫后,叶片相对电导率、可溶性糖含量、脯氨酸含量、MDA 含量、SOD 活性和 POD 活性均高于对照($P<0.01$),而可溶性蛋白含量低于对照($P<0.01$)。小麦叶片各指标存在极显著的品种间差异($P<0.01$)。以叶片各指标的相对值作为抗寒性指标,采用隶属函数法和极值点排序法计算参试品种的平均隶属度值为 0.19—0.63,综合排序值为 1.66—4.08。通过 K-means 聚类,将 24 个小麦品种聚为 5 类。其中良星 619、丰德存麦 1 号、B07-4056、石 H083-363、山农 055843 和良星 99 等 6 个品种抗寒性最强,宿 553、陕农 509、A-9、中原 6 号、徐麦 4036、舜麦 1718 和石麦 19 等 7 个品种抗寒性强,尧麦 16、C-44、山农 05-066、冀麦 585 和石 B05-7388 等 5 个品种抗寒性中等,偃展 4110、B-33、B05-6507 和石 4185 等 4 个品种抗寒性弱,石 06-6136 和石优 20 这 2 个品种抗寒性最弱。相关分析表明,平均隶属度值和综合排序值与相对可溶性糖含量、相对脯氨酸含量、相对 POD 活性呈正相关($P<0.05$),与相对 MDA 含量呈负相关($P<0.05$)。叶片可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、POD 活性及 MDA 含量可以作为拔节期小麦抗寒性的鉴定评价指标。

关键词:小麦;低温;叶片生理;抗寒性;隶属函数法;极点排序法

Evaluation of cold resistance of different wheat varieties based on physiological responses of leaves to low temperature at the jointing stage

JIANG Lina, ZHANG Daijing, SONG Fei, LIU Pei, FAN Tingting, YU Haibo, LI Chunxi*

College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China

Abstract: Cold injury is one of the main problems in winter wheat production in the Huanghuaihai wheat region. Winter wheat grows rapidly at the jointing stage, and becomes sensitive to the drops in temperatures that frequently occur in spring. Low temperature during the jointing stage restricts the growth of winter wheat and directly affects grain yield. Therefore, correctly evaluating and improving the cold resistance of wheat varieties is very important for grain security. In this study, we evaluated the cold tolerance of 24 wheat varieties grown in the Huanghuaihai region. The wheat plants were grown in pots outdoors, and they were moved into an artificial climate chamber and subjected to a cold treatment at the jointing stage. After the cold treatment, we measured seven physiological indices in leaves; relative electrical conductivity, soluble sugars content, soluble protein content, free proline content, malondialdehyde (MDA) content, superoxide dismutase (SOD) activity, and peroxidase (POD) activity. The results showed that the soluble protein content was lower in low-temperature-treated plants than in the control plants ($P<0.01$), while the other six indices showed higher values in the low-temperature-

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201203033);国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD16B14);河南省科技攻关计划项目(122102310311)

收稿日期:2013-07-27; **修订日期:**2014-03-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13703731637@sina.com

treated plants than in the control plants ($P<0.01$). Analysis of variance showed that the values of these seven physiological indices differed significantly among varieties both in low-temperature-treated and control plants ($P<0.01$). Compared with control plants, the low-temperature-treated plants showed a greater range of relative conductivity, soluble sugars content, soluble proline content, MDA content, and POD activity, but lower range of soluble protein content and SOD activity. The relative character value, that is, the proportion of the measured value in low-temperature-treated plants to that in control plants, eliminated the genetic background difference. For each wheat variety, we used the relative character values to calculate the average subordinative function value by the subordinative function method, and we calculated the comprehensive score by the polar ordination method. The average subordinative function values ranged from 0.19 to 0.63 and the comprehensive scores from 1.66 to 4.08. Among the 24 cultivars, Liangxing 619 showed the highest value and score, while Shiyou 20 showed the lowest. Using K-means clustering analysis, the 24 winter wheat cultivars were divided into five groups according to cold resistance; strong, high, medium, low, and weak. The strong cold resistance group contained six varieties; Lingxing 619, Fengdecunmai No.1, B07-4056, Shi H083-363, Shannong 055843, and Lingxing 99. The high cold resistance group contained seven varieties; Su 553, Shannong 509, A-9, Zhongyuan No.6, Xumai 4036, Shunmai 1718, and Shimai 19. The medium cold resistance group consisted of five varieties; Yaomai 16, C-44, Shannong 05-066, Jimai 585, and Shi B05-7388. The low cold resistance group contained Yanzhan 4110, B-33, B05-6507, and Shi 4185. Two varieties, Shiyou 20 and Shi 06-6136, were in the weak cold resistance group. Correlation analyses showed that the average subordinative function value and comprehensive score were significantly positively correlated with soluble sugars content and relative proline content ($P<0.01$), and with relative POD activity ($P<0.05$). The average subordinative function value and comprehensive score were significantly negatively correlated with relative MDA content ($P<0.05$). In conclusion, the soluble sugars content, free proline content, POD activity, and MDA content in leaves at the jointing stage can serve as cold-resistance indices. Wheat varieties with higher soluble sugars content, free proline content, and POD activity, but lower MDA content in leaves showed stronger cold resistance. Among the 24 varieties, Liangxing 619 showed the strongest cold resistance at the jointing stage, while Shiyou 20 showed the weakest.

Key Words: wheat; low temperature; leaf physiology; cold resistance; subordination function; polar ordination

低温冷(冻)害是黄淮海麦区频发的自然灾害之一,严重影响并制约着小麦的生长发育及产量的形成^[1-2]。低温胁迫后,植物体通过形态结构、内含物质和光合作用等一系列复杂的生理生化变化,对低温环境进行响应^[3-6]。研究表明,植物的抗寒性与细胞膜的流动性^[7]、膜脂过氧化程度^[8-9]、抗氧化酶活性^[9-11]、渗透调节物质含量^[12-13]密切相关。植物抗寒性是多基因控制的数量性状,单一的生理指标难以全面准确反映抗寒性的强弱,可结合与抗寒性有关的多个指标,利用隶属函数法^[14-15]、加权法^[16]、模糊评判法^[17]、极点排序法^[18]等进行抗寒性评价。其中,加权法和模糊评判法需要人为确定指标的权重值,而权重值的大小直接影响评判的结果。隶属函数法是根据模糊数学原理,计算的隶属函数值是多项指标综合的结果,能比较准确地反映出品种间的抗寒性差异,在小麦^[14]、果桑^[15]、甘蔗^[19]、葡萄^[20]

等均有应用。极点排序法,是将与抗寒性相关的多个指标进行权重分配,通过矩阵复合运算获得综合评价结果,已在甘蔗^[18]、辣椒^[21]、黄瓜^[22]等进行了应用,而在小麦抗寒上未见报道。本文以黄淮海麦区参加区试的24个小麦品种为材料,在人工气候室模拟拔节期低温,分析其对叶片生理的影响。以低温胁迫后各性状的相对值作为抗寒性评价指标^[14,23],通过隶属函数法和极点排序法对参试品种抗寒性进行鉴定,以筛选应对春季低温胁迫的抗寒性品种及抗寒性鉴定指标,为增强黄淮海区域小麦减灾抗灾能力提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试小麦品种及其供种单位如表1所示。

表 1 参试小麦品种的编号、名称以及供种单位
Table 1 Number, name and source of wheat varieties used in this study

编号 No.	品种名称 Variety	供种单位 Variety source	编号 No.	品种名称 Variety	供种单位 Variety source
1	石麦 19	河北省石家庄市农业科学研究院	13	山农 055843	山东农业大学
2	石优 20	河北省石家庄市农林科学研究所	14	良星 99	山东省德州市良星种子研究所
3	石 H083-366	河北省石家庄市农业科学研究院	15	良星 619	山东省德州市良星种子研究所
4	B05-6507	河北省石家庄市农业科学研究院	16	尧麦 16	山西省农业科学院
5	B07-4056	河北省石家庄市农业科学研究院	17	舜麦 1718	山西省农业科学院
6	石 06-6136	河北省石家庄市农业科学研究院	18	陕农 509	西北农林科技大学
7	石 B05-7388	河北省石家庄市农业科学研究院	19	徐麦 4036	徐州农业科学研究
8	石 4185	河北省石家庄市农业科学研究院	20	丰德存麦 1 号	河南省天存小麦改良技术研究所
9	冀麦 585	河北省农林科学院	21	宿 553	宿州市农业科学院
10	偃展 4110	河南省豫西农作物品种展览中心	22	A-9	河北省农林科学院
11	中原 6 号	河南谷得科技种业有限公司	23	B-33	河北省农林科学院
12	山农 05-066	山东农业大学	24	C-44	河北省农林科学院

2010 年 10 月 24 日在河南师范大学网室进行盆栽种植。各品种选取完整无损、大小均匀的小麦籽粒,播入米氏盆($h19\text{cm}\times\varphi23\text{cm}$)中,每盆装土 2.5kg,播种 30 粒。随机排列,每品种 4 盆。三叶期每盆定苗 15 株,常规管理。于 2011 年 4 月 5 日将低温组(每品种 2 盆)移入人工气候室中,16℃ 昼(16h,12000lx)/10℃ 夜条件下正常生长 1d,然后在 4℃ 昼(16h,12000lx)/4℃ 夜低温条件下连续处理 3d。对照组(每品种 2 盆)仍在网室中正常生长,环境温度如图 1 所示。处理结束后,分别取低温和对照各品种小麦的倒一叶用于生理指标的测定,每品种重复 2 次。

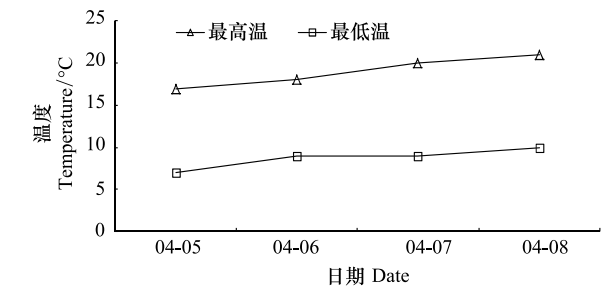


图 1 对照组环境温度
Fig.1 The environment temperature of Control

1.2 测定方法

相对电导率采用电导率仪法^[24],可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[24],可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法^[24],游离脯氨酸含量采用磺基水杨酸浸提-酸性茚三酮显色法^[25],丙二醛(MDA)含量

采用 TBA 比色法^[26],超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 比色法^[24],过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法^[27]。

1.3 数据分析

1.3.1 性状相对值

以公式 1^[15]计算性状相对值 x_j 作为评价品种抗寒性的指标:

相对值(x_j)=(低温处理下某一指标测定值/对照测定值) $\times 100\%$ (1)

1.3.2 相对性状的隶属度值

以公式 2 和公式 3 计算各品种相对性状的隶属度值^[14-15]。其中,与抗寒性呈正相关的各指标(可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量及 SOD 活性、POD 活性)隶属度值以公式 2 计算,与抗寒性呈负相关的各指标(MDA 含量和相对电导率)隶属度值以公式 3 计算。

每一品种相对性状隶属度值的平均数即为该品种的平均隶属度值:

$$U(x_{ij})=(x_{ij}-x_{jmin})/(x_{jmax}-x_{jmin})$$
 (2)

$$U(x_{ij})=1-(x_{ij}-x_{jmin})/(x_{jmax}-x_{jmin})$$
 (3)

式中, $U(x_{ij})$ 为*i*品种*j*指标的隶属函数值, x_{ij} 为*i*品种*j*指标的相对值, x_{jmin} 和 x_{jmax} 为各品种*j*指标相对值的最小值和最大值。

1.3.3 综合排序值

(1) 将指标相对性状值划分为 5 级,每一指标的得分级差(每得 1 分之差)记为 D,以公式 4 计算

各相对指标的得分级差 $D_j^{[18]}$ 。

$$D_j = (x_{j\max} - x_{j\min})/5 \quad (4)$$

(2) 对每一品种所测指标相对值进行分级,使每一品种的每一指标都得到相应级别值 E_{ij} 。当指标与抗寒性呈正相关时,该指标的 E_{ij} 值以公式 5 计算;当指标与抗寒性呈负相关时,该指标的 E_{ij} 值以公式 6 计算:

$$E_{ij} = [(x_{ij} - x_{j\min})/D_j] + 1 \quad (5)$$

$$E_{ij} = 5 - [(x_{ij} - x_{j\min})/D_j] + 1 \quad (6)$$

(3) 指标权重系数 B_j 为每一指标在综合评价中的权重,以公式 7 进行计算:

$$B_j = \text{某一指标的变异系数} / \text{各指标变异系数之和} \quad (7)$$

(4) 每一品种综合排序值 V_i 以公式 8 进行计算:

$$V_i = \sum E_{ij} \times B_j \quad (8)$$

1.3.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行数据处理和作图。

2 结果与分析

2.1 拔节期低温对小麦叶片生理指标的影响

2.1.1 相对电导率

正常生长条件下,参试的 24 个小麦品种叶片相对电导率平均为 $(23.08 \pm 3.99)\%$ (图 2), 品种间差异极显著 ($P < 0.01$), 以山农 05-066 (12 号) 叶片相对电导率表现最低, 石麦 19 (1 号) 最高。低温处理后, 叶片电解质外渗增加, 相对电导率极显著高于对照 ($P < 0.01$)。低温处理后, 不同品种小麦叶片相对电导率的极差值增加, 变异系数没有明显变化。与对照相比, 在供试的 24 个品种中, 山农 05-066 (12 号) 叶片相对电导率增幅最高 (291.68%), 而石麦 19 (1 号) 增幅最低, 仅为 72.63%。

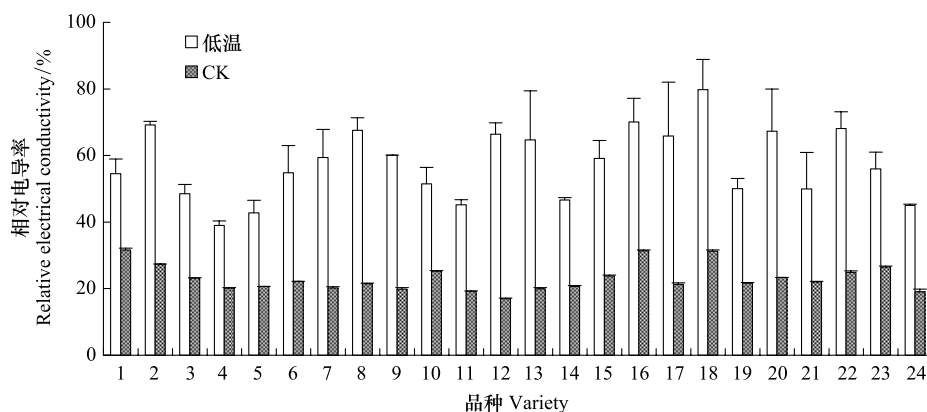


图2 低温胁迫下不同小麦品种叶片相对电导率

Fig.2 Relative electrical conductivity in wheat leaves in response to low temperature stress

2.1.2 可溶性糖含量

对照组叶片可溶性糖含量为 (18.05 ± 4.41) mg/g 干重 (图 3), 品种间差异极显著 ($P < 0.01$)。低温促进了小麦叶片可溶性糖的积累, 低温处理后小麦叶片可溶性糖含量平均为 (25.40 ± 5.89) mg/g 干重, 极显著高于对照 ($P < 0.01$), 且不同品种间极差值增加, 而变异系数没有明显变化。与对照相比, 良星 619 (15 号) 叶片可溶性糖含量增加了 97.80%, 而石 06-6136 (6 号) 仅增加了 4%。

2.1.3 可溶性蛋白含量

对照组小麦叶片可溶性蛋白含量平均为 (6.09 ± 1.98) mg/g 鲜重 (图 4), 品种间差异极显著 ($P <$

0.01)。低温处理后叶片可溶性蛋白含量为 (2.65 ± 1.35) mg/g 鲜重, 极显著低于对照 ($P < 0.01$), 且品种间可溶性蛋白含量极差值亦低于对照, 而品种间变异系数高于对照。与对照相比, 石 4185 (8 号) 叶片可溶性蛋白含量降低幅度最高 (86.73%), 而山农 05-066 (12 号) 仅降低了 5.58%。

2.1.4 游离脯氨酸含量

对照组小麦叶片游离脯氨酸含量平均为 (131.36 ± 73.70) μ g/g 鲜重 (图 5), 品种间差异极显著 ($P < 0.01$)。低温处理后, 叶片游离脯氨酸含量增加, 平均为 (236.33 ± 96.19) μ g/g 鲜重, 极显著高于对照 ($P < 0.01$), 其品种间极差值亦高于对照, 而变

异系数低于对照。与对照相比,良星 619(15 号)叶片脯氨酸含量增加了 350.43%,石 4185(8 号)仅增

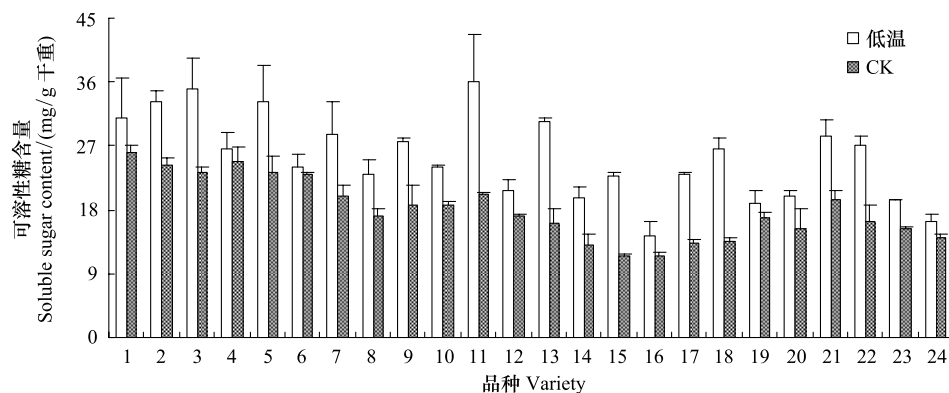


图 3 低温胁迫下不同小麦品种叶片可溶性糖含量

Fig.3 Soluble sugar content in wheat leaves in response to low temperature stress

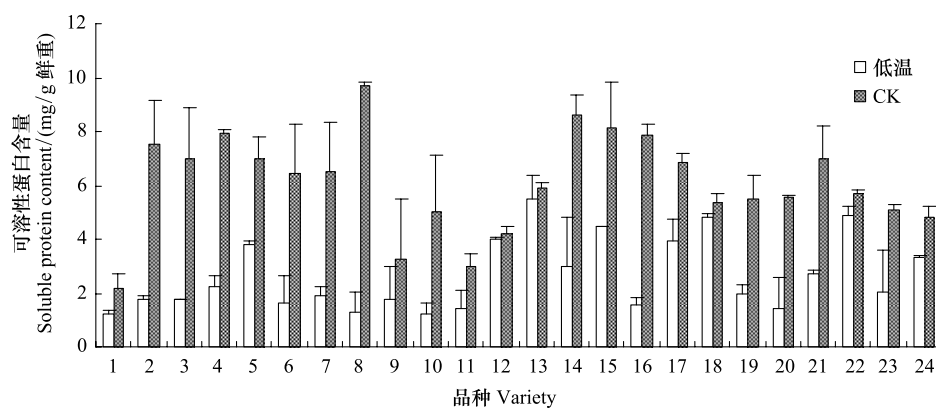


图 4 低温胁迫下不同小麦品种叶片可溶性蛋白含量

Fig.4 Soluble protein content in wheat leaves in response to low temperature stress

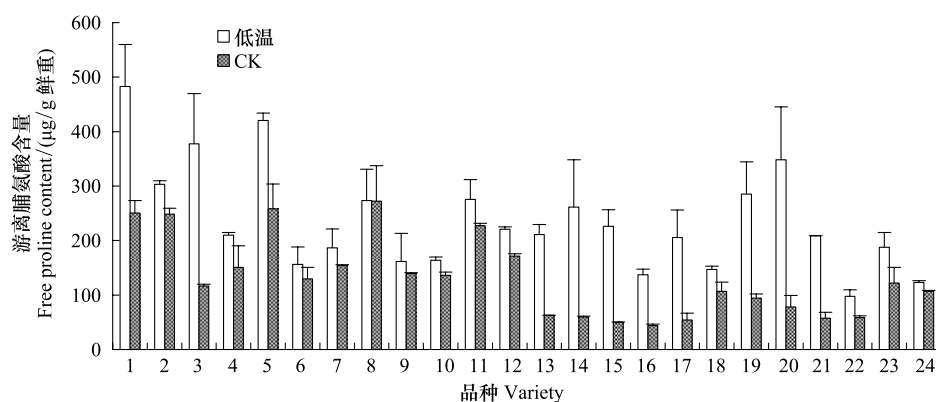


图 5 低温胁迫下不同小麦品种叶片游离脯氨酸含量

Fig.5 Free proline content in wheat leaves in response to low temperature stress

2.1.5 MDA 含量

对照组小麦叶片 MDA 含量平均为 (1.06 ± 0.29) $\mu\text{mol/g}$ 鲜重(图 6),品种间差异极显著($P < 0.01$)。

低温处理后,叶片 MDA 含量平均值为 (1.68 ± 0.46) $\mu\text{mol/g}$ 鲜重,极显著高于对照($P < 0.01$),且品种间极差值高于对照,而变异系数无明显变化。与对照

相比,石优 20(2 号)叶片 MDA 含量增加了 318.32%,而石 H083-363(3 号)仅增加了 10.34%。

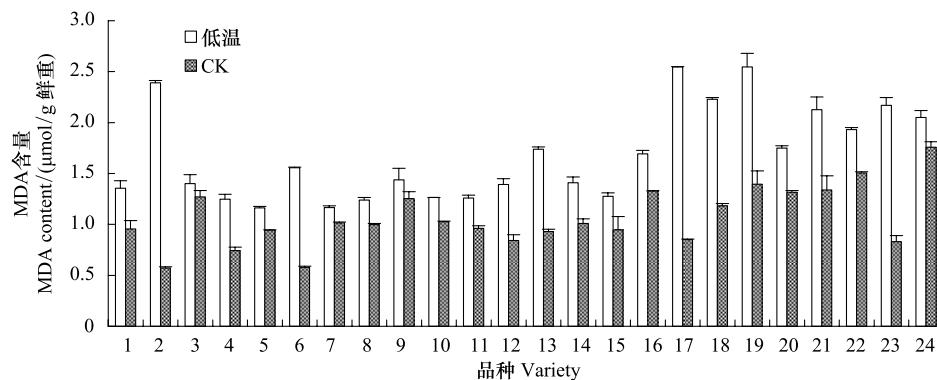


图 6 低温胁迫下不同小麦品种叶片 MDA 含量

Fig.6 MDA content in wheat leaves in response to low temperature stress

2.1.6 SOD 活性

对照组叶片 SOD 活性平均为 (278.27 ± 70.61) U/g 鲜重(图 7),品种间差异极显著($P < 0.01$)。低温处理后,叶片 SOD 活性为 (349.75 ± 45.96) U/g 鲜

重,极显著高于对照($P < 0.01$),且品种间极差值和变异系数均低于对照。与对照相比,石 H083-363(3 号)叶片 SOD 活性增加了 171.85%,而徐麦 4036(19 号)仅增加了 1.74%。

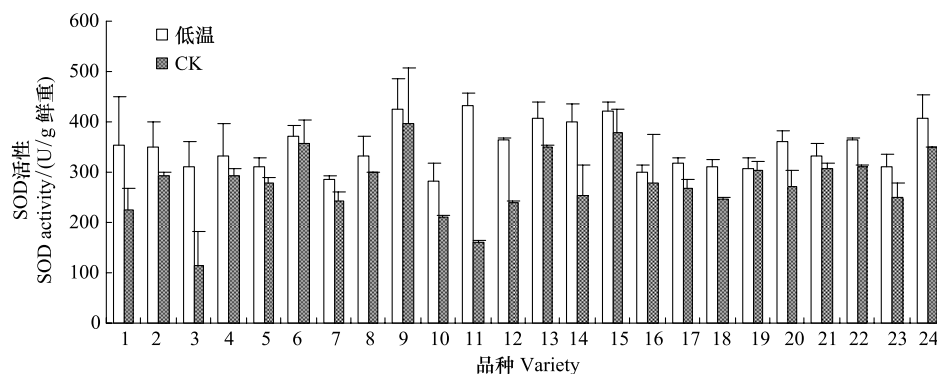


图 7 低温胁迫下不同小麦品种叶片 SOD 活性

Fig.7 SOD activity in wheat leaves in response to low temperature stress

2.1.7 POD 活性

对照组叶片 POD 活性平均为 (59.57 ± 22.83)

U/g 鲜重(图 8),品种间差异极显著($P < 0.01$)。低温处理后,叶片 POD 活性为 (103.50 ± 40.88) U/g 鲜

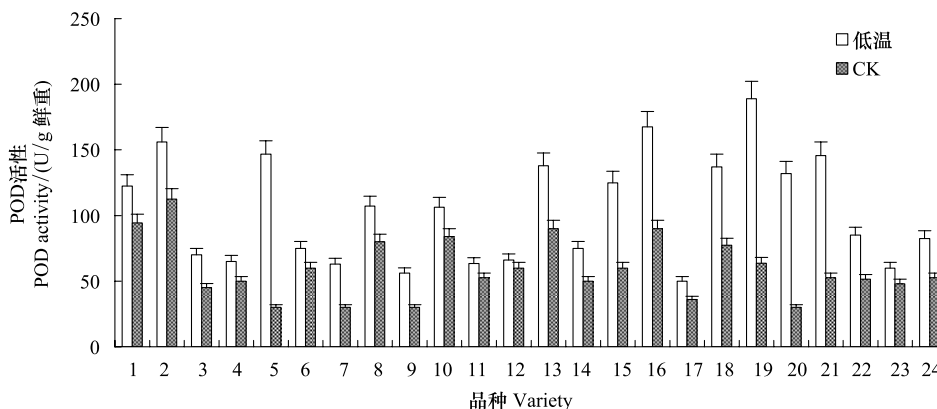


图 8 低温胁迫下不同小麦品种叶片 POD 活性

Fig.8 POD activity in wheat leaves in response to low temperature stress

重,极显著高于对照($P<0.01$),且品种间极差值高于对照,但变异系数未有明显变化。与对照相比,B07-4056(5号)增加了388.29%,而山农05-066(12号)仅增加了10.00%。

2.2 拔节期低温处理后小麦叶片相对性状值

计算各指标的相对性状值列于表2。低温胁迫后,相对电导率的相对值和相对脯氨酸含量较高,平

均值达到253.27%和223.47%,其次是相对POD活性和相对MDA含量,而相对可溶性蛋白含量较低。从各性状相对值的变异系数来看,相对脯氨酸含量、相对可溶性蛋白含量、相对POD活性的变异系数较高,均高于50%,其次是相对MDA含量和相对SOD活性。

表 2 各品种相对性状值/% Table 2 Relative character values of each variety								
编号 No.	品种名称 Variety	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	石麦 19	172.63	118.05	54.55	192.39	141.94	156.50	129.92
2	石优 20	252.86	136.93	23.13	122.00	418.33	119.18	138.67
3	石 H083-366	209.16	150.20	25.13	323.35	110.33	271.85	155.56
4	B05-6507	193.81	107.40	28.38	139.06	168.06	113.37	130.00
5	B07-4056	207.55	143.03	54.40	162.71	123.38	112.55	488.89
6	石 06-6136	246.86	104.00	25.56	120.70	268.85	104.42	125.00
7	石 B05-7388	293.27	143.88	29.44	120.86	115.05	117.00	210.00
8	石 4185	314.51	132.62	13.27	100.39	124.22	111.44	133.93
9	冀麦 585	302.34	147.79	54.19	116.18	114.80	107.75	187.50
10	偃展 4110	203.78	128.98	24.10	120.50	123.22	132.69	126.62
11	中原 6 号	234.85	177.75	48.19	121.25	130.83	271.10	120.63
12	山农 05-066	391.68	120.11	94.42	128.79	165.25	153.32	110.00
13	山农 055843	324.48	189.80	94.14	334.69	187.02	116.15	153.33
14	良星 99	225.44	152.12	34.59	436.92	139.65	157.79	150.00
15	良星 619	248.09	197.80	55.23	450.43	134.69	111.34	208.33
16	尧麦 16	223.71	126.21	19.86	313.24	127.30	107.67	186.11
17	舜麦 1718	309.04	171.43	57.26	377.56	299.73	117.72	138.89
18	陕农 509	255.66	195.60	90.48	137.07	188.22	126.24	177.48
19	徐麦 4036	231.33	113.00	35.53	302.73	182.64	101.74	297.00
20	丰德存麦 1 号	288.15	129.81	25.82	446.15	133.00	132.66	440.00
21	宿 553	227.39	144.65	38.70	362.08	158.97	108.31	277.55
22	A-9	273.77	164.25	86.31	165.69	128.08	117.71	165.28
23	B-33	211.46	127.03	39.50	153.60	261.67	123.77	125.00
24	C-44	236.59	115.42	69.17	115.03	116.72	116.46	157.14
平均 Average		253.27	143.24	46.72	223.47	169.25	133.70	188.87
标准差 Standard deviation		50.43	27.38	24.81	123.99	74.00	45.18	97.12
变异系数 Coefficient of variation		19.91	19.11	53.09	55.48	43.72	33.79	51.42

x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 和 x_7 分别表示相对电导率、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、MDA 含量、SOD 活性和 POD 活性的相对值

2.3 抗寒性评价

根据相对性状值,计算参试品种的平均隶属度值为0.19—0.63,综合排序值为1.66—4.08(图9)。平均隶属度值和综合排序值高,该品种的抗寒性强;反之,该品种的抗寒性弱。根据平均隶属度值和综合排序值对参试品种进行排序,结果不完全相同,二

者均以良星619表现最高,石优20表现最低。

以平均隶属度值和综合排序值对参试品种进行K-Means聚类,经过4次聚类迭代后将参试品种聚为5类,各类中心值列于表3。第Ⅰ类综合排序值和平均隶属度值均较高,抗低温能力最强;第Ⅴ类综合排序值和平均隶属度值均较低,抗低温能力最弱。

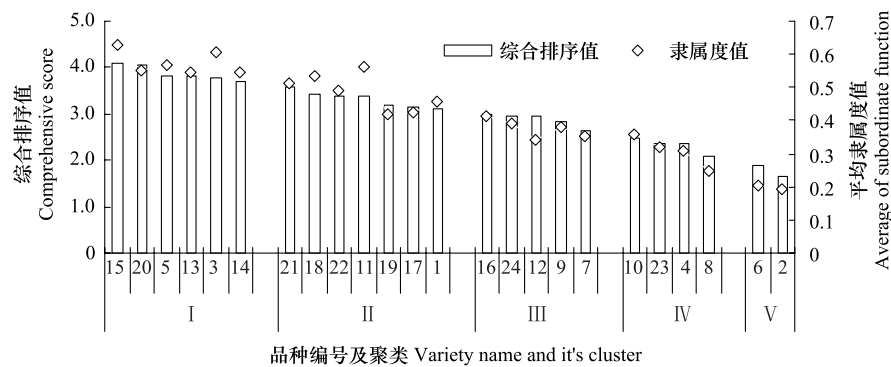


图9 各品种的平均隶属度值和综合排序值及其聚类类别
Fig.9 Average of subordinate function and comprehensive score of each variety and cluster membership

表3 聚类分析中的各类中心
Table 3 Cluster centers in cluster analysis

	聚类 Cluster				
	I	II	III	IV	V
综合排序值 Comprehensive score	3.87	3.32	2.87	2.32	1.77
平均隶属度值 Average of SF	0.57	0.49	0.37	0.31	0.20

各品种的聚类类别如图9所示。良星619、丰德存麦1号、B07-4056、石H083-363、山农055843和良星99等6个品种聚在第Ⅰ类,其抗寒性最强;宿553、陕农509、A-9、中原6号、徐麦4036、舜麦1718和石麦19等7个品种聚在第Ⅱ类,其抗寒性强;尧麦16、C-44、山农05-066、冀麦585和石B05-7388等5个品种聚在第Ⅲ类,其抗寒性中等;偃展4110、B-33、B05-6507和石4185等4个品种聚在第Ⅳ类,其抗寒性弱;石06-6136和石优20这2个品种聚在第Ⅴ类,其抗寒性最弱。

表4 各相对性状的相关分析
Table 4 Correlation analysis of relative indexes for cold resistance

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	CS	ASF
x_1	1.000								
x_2	0.230	1.000							
x_3	0.422 *	0.479 *	1.000						
x_4	-0.027	0.327	-0.068	1.000					
x_5	0.079	-0.049	-0.070	-0.076	1.000				
x_6	-0.169	0.204	-0.043	0.025	-0.223	1.000			
x_7	-0.091	-0.015	-0.093	0.339	-0.244	-0.224	1.000		
CS	-0.014	0.556 **	0.393	0.691 **	-0.506 *	0.268	0.511 *	1.000	
ASF	-0.149	0.640 **	0.347	0.621 **	-0.503 *	0.404	0.412 *	0.970 **	1.000

* 表示相关性达显著性水平($P<0.05$), ** 表示相关性达极显著水平($P<0.01$); CS 表示综合排序值, ASF 表示平均隶属度值

从相关关系来看(表4),平均隶属度值和综合排序值与叶片相对可溶性糖含量、相对脯氨酸含量呈极显著正相关($P<0.01$),与叶片相对POD活性呈显著正相关($P<0.05$),与叶片相对MDA含量呈显著负相关($P<0.05$)。二者与相对可溶性蛋白含量和相对SOD活性呈正相关,与相对电导率呈负相关。

从各品种的相对性状值来看(表2),良星619(15号)叶片相对可溶性糖含量和相对脯氨酸含量均最高,其平均隶属函数值和综合排序值亦排在首位,抗寒性最高。石H083-363(3号)叶片相对MDA含量最低,相对SOD活性最高,其隶属函数值和综合排序值分别为0.604和3.763,抗寒性属于第Ⅰ类;B07-4056(5号)叶片相对POD活性远高于其它品种,其隶属函数值和综合排序值分别为0.566和

3. 837, 抗寒性亦属于第 I 类。石优 20(2 号) 叶片相对 MDA 含量远高于其它品种, 其隶属函数值和综合排序值分别为 0.192 和 1.661, 其抗寒性最弱; 石 06-6136(6 号) 叶片相对可溶性糖含量和相对 SOD 活性较低, 而石 4185(8 号) 叶片相对可溶性蛋白含量和相对脯氨酸含量均最低, 这 2 个品种的抗寒性均弱, 仅略高于石优 20(2 号)。

3 讨论

拔节期是小麦快速生长期, 亦是对低温敏感的时期^[14]。低温胁迫下, 植物细胞发生一系列生理生化变化以适应和进行自我调节^[4-6]。生物膜是植物细胞与外界环境之间发生物质交换的通道, 各种逆境对植物细胞的影响首先作用于生物膜, 常以叶片电导率作为鉴定细胞膜透性以及破坏程度的重要指标^[7,28]。本研究表明, 拔节期低温胁迫后小麦叶片相对电导率较对照增加。因此, 低温胁迫使小麦叶片生物膜透性增加并且膜受损程度加大。

低温胁迫下可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸等渗透调节物质的含量发生变化, 植物可通过调节渗透浓度来启动脱落酸的合成, 诱发蛋白质的合成, 增加抗寒性^[9]。本研究表明, 拔节期低温胁迫后, 叶片可溶性糖含量和游离脯氨酸含量较对照增加, 在一定程度上可以促进蛋白质的合成, 但叶片中可溶性蛋白含量仍表现为低于对照。

低温胁迫下, 植物体内产生大量的活性氧自由基, 引发膜脂过氧化^[8], 产生膜脂过氧化产物 MDA, 且膜脂过氧化的程度随温度降低和胁迫时间延长而加重^[9], 同时植物体内还存在着 SOD、POD 等抗氧化酶系统以清除活性氧、降低逆境损伤^[9-11]。本研究表明, 拔节期低温胁迫下, 小麦叶片 SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量均高于对照。SOD 活性和 POD 活性的增加可以减轻低温对生物膜的迫害, 说明植株对低温产生了一定的响应。但是 MDA 含量的增加显示低温胁迫后叶片膜脂过氧化程度仍然呈现增高趋势。

不同小麦品种抗低温能力差异很大^[8,14,24,26-27,30-31]。有研究表明, 低温胁迫下小麦叶片 MDA 含量^[8,14]、可溶性蛋白含量^[8]下降, 电导率^[29]、SOD 活性^[6,29]、POD 活性^[6]、可溶性糖含量^[14]的变化存在品种间差异或变化不明显。这主要是由于品种特性、胁迫温

度强度、胁迫持续时间及小麦所处生育期不同而致。本研究表明, 拔节期低温胁迫后, 小麦叶片相对电导率、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、MDA 含量、POD 活性品种间极差值均高于对照, 而可溶性蛋白含量和 SOD 活性品种间极差值低于对照, 不同品种间各指标的增加(减少)量存在较大差异。计算各指标的相对性状值, 则可以消除品种自身遗传特性的影响^[8,14-15]。本研究表明, 低温胁迫后, 相对电导率的相对值以及相对脯氨酸含量较高, 而相对可溶性蛋白含量较低。由相对性状值, 通过隶属函数法和极点排序法, 计算出各品种的平均隶属度值和综合排序值, 并通过 K-means 聚类, 将参试品种聚成了 5 类。其中, 良星 619 抗低温能力最强, 而石优 20 抗低温能力最弱。

有关小麦抗寒性的评价指标, 已有研究并不完全一致。刘艳阳研究认为 SOD 活性、MDA 含量可以作为小麦抗寒性的评价指标^[6], 高志强认为电导率和可溶性糖含量是衡量小麦抗寒性较好的指标^[28]。本研究相关分析表明, 叶片相对可溶性糖含量、相对脯氨酸含量、相对 POD 活性与相对 MDA 含量与平均隶属度值和综合排序值相关关系显著, 认为这 4 个指标可以作为拔节期小麦抗寒性鉴定的主要评价指标。

本研究仅从叶片生理响应上分析了拔节期低温对小麦植株生长的影响, 而小麦的抗寒性不仅包含自身的遗传因素和生理特征, 更与外界环境因素密切相关。选育抗寒性强的品种、建立良种良法配套的高产栽培技术, 提高小麦的抗寒综合能力, 是目前小麦安全高效栽培生产中亟待解决的问题。

References:

- [1] Fang S B, Yang J J, Zhou G X. Change trend distributive characteristics of agrometeorological disasters in China in recent 30 years. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(5): 69-73.
- [2] Wang J F, Zhu Y Y, Liu H P. Main agrometeorological disasters and their impact in recent 28 a in Henan. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2007, 30(Suppl.): 9-11.
- [3] Cao H M, Shi Z M, Zhou X B, Lei P Z, Dong S G. A review on response of plant to low temperature and its cold resistance. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 310-314.
- [4] Gana J A, Sutton F, Kenefick D G. cDNA structure and expression patterns of a low-temperature-specific wheat gene *tacr7*. *Plant Molecular Biology*, 1997, 34: 643-650.

- [5] Minami A, Nagao M, Ikegami K, Koshiha T, Arakawa K, Fujikawa S, Takezawa D. Cold acclimation in bryophytes: low-temperature-induced freezing tolerance in *Physcomitrella patens* is associated with increases in expression levels of stress-related genes but not with increase in level of endogenous abscisic acid. *Planta*, 2005, 220: 414-423.
- [6] 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 of Triticeae Crops*, 2006, 26(4): 70-73.
- [7] Wang J Y, Yu S Q. Studies on resistance and membrane lipid fluidity of various breeds of cold-resistant wheat. *Biotechnology*, 1998, 8(2): 28-30.
- [8] Wang S G, Wang Z L, Wang P, Wang H W, Li F, Huang W, Wu Y G, Yin Y P. Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1064-1072.
- [9] Li C Y, Chen S S, Xu W, Li D S, Gu X, Zhu X K, Guo W S, Feng C N. Effect of low temperature at seedling stage on Antioxidation enzymes and Cytoplasmic Osmoticum of leaves in wheat cultivar Yangmai 16. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2293-2298.
- [10] Allen R D. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants. *Plant Physiology*, 1995, 107: 1049-1054.
- [11] Wang X N, Fu L S, Li Z F, Sun Y L, Wang Y B, Liu C, Wang J W, Chen Y X. Morphogenesis and physiological basis in wheat cultivars with different levels of cold-resistance during cold acclimation and freezing period. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(7): 1313-1319.
- [12] Wang X X, Li S D, Dong H R, Gao Z H, Dai S S. The relationship between tomato varieties resistance and ABA and soluble sugar content. *Acta Horticulturae Sinica*, 1998, 25(1): 56-60.
- [13] Liu H Y, Zhu Z J, Lv G H, Qian Q Q. Study on relationship between physiological changes and chilling tolerance in grafted watermelon seedlings under low temperature stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1325-1329.
- [14] Chen L, Wu S G, Li S M, Yin G H, Zhou L, Gu H M. Biochemical reaction and resistance analysis of jointing stage of winter wheat under low temperature stress. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(4): 42-46.
- [15] Yang M, Guo J Z. Evaluation of mulberry cold resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress. *Northern Horticulture*, 2012, (4): 29-32.
- [16] Du Y J, Yu L, Sun J X, Lu W H. Comprehensive assessment of cold resistance of three *Zoysia japonica* varieties. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(3): 6-16.
- [17] Xu N. Application of fuzzy comprehensive evaluation in the cold resistance identification of tea germplasms. *Tea in Fujian*, 1993, (3): 16-19.
- [18] Tang S Y, Yang L T, Li Y R. Response of different sugarcane genotypes to low temperature and evaluation for cold tolerance of sugarcane. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(4): 635-641.
- [19] Zhang B Q, Yang L T, Li Y R. Comparison of physiological and biochemical characteristics related to cold resistance in sugarcane under field conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(3): 496-505.
- [20] Zhang W E, Wang F, Pan X J. Comprehensive evaluation on cold hardiness of *Vitis* species by Subordinate Function (SF). *Journal of Fruit Science*, 2007, 24(6): 849-853.
- [21] Liu X M, Shang Q M, Zhang Z G. Low-temperature tolerance of pepper at germination stage and its evaluation method. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 18(3): 521-527.
- [22] Liu X M, Shang Q M, Wang X L, Zhang Z G, Liu J C, Cui S M. Studies on low temperature tolerance evaluation method of different cucumber varieties at early stage. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2010, 31(4): 154-160.
- [23] Ma W G, Cui H W, Li Y P, Zheng Y Y, Han R, Hu J. Effects of low temperature stress on physiological and biochemical characteristics of 20 tobacco cultivars and assessment of their cold tolerance at germination and seedling stages. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(2): 232-238.
- [24] Li H S. The experiment principle and technique on plant Physiology and biochemistry. Beijing: Higher Education Press, 2000, 167-139, 184-185, 195-197, 261-263.
- [25] Shanghai Institute of Plant Physiology; Academia Sinica, Shanghai Institute of Plant Physiology. *Modern Plant Physiology Laboratory Manual*. Beijing: Science Press, 1999: 303.
- [26] Hou F L. *Plant Physiology Experimental Course*. Beijing: Science Press, 2004, 91.
- [27] Ren X L, Li J R. Changes of active oxygen and some physiological indexes in the processes of maturation and senescence of apricot fruits. *Plant Physiogy Communications*, 1991, 27(1): 34-36.
- [28] Gao Z Q, Zhang G H, Zhang A Z, Miao G Y. The low temperature reaction of the different wheat varieties. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2002, 22(2): 109-112.
- [29] Yi Y, Zhang Y L, Guo Z F, Bai L P, Qiao X, Hou L B. Physiological responses of winter wheat's leaves to low temperature stress. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(1): 144-148.
- [30] Yu J, Zhang L, Cang J, Hao Z B, Wang D J. Research progress of cold resistance in winter wheat. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(11): 123-127.
- [31] Feng S W, Dong N, Hu T Z, Li G, Li X H, Ru Z G. Analysis on the integrated winter hardness of different wheat varieties. *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, 2010, 38(3): 4-7.

参考文献:

- [1] 房世波, 阳晶晶, 周广胜. 30 年来我国农业气象灾害变化趋

- 势和分布特征. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 69-73.
- [2] 王记芳, 朱业玉, 刘和平. 近 28a 河南主要农业气象灾害及其影响. 气象与环境科学, 2007, 30(增刊): 9-11.
- [3] 曹慧明, 史作民, 周晓波, 雷鹏志, 董生刚. 植物对低温环境的响应及其抗寒性研究综述. 中国农业气象, 2010, 31(2): 310-314.
- [6] 刘艳阳, 李俊周, 陈磊, 崔党群. 低温胁迫对小麦叶片细胞膜脂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.
- [7] 王纪元, 喻尚其. 不同抗寒性小麦品种的抗性与膜脂流动性的研究. 生物技术, 1998, 8(2): 28-30.
- [8] 王树刚, 王振林, 王平, 王海伟, 李府, 黄玮, 武玉国, 尹燕桦. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价. 生态学报, 2011, 31(4): 1064-1072.
- [9] 李春燕, 陈思思, 徐雯, 李东升, 顾骁, 朱新开, 郭文善, 封超年. 苗期低温胁迫对扬麦 16 叶片抗氧化酶和渗透调节物质的影响. 作物学报, 2011, 37(12): 2293-2298.
- [11] 王晓楠, 付连双, 李卓夫, 孙艳丽, 王玉波, 刘灿, 王金伟, 陈禹兴. 低温驯化及封冻后不同抗寒性小麦品种的形态建成及生理基础分析. 作物学报, 2009, 35(7): 1313-1319.
- [12] 王孝宣, 李树德, 东惠茹, 高振华, 戴善书. 番茄品种耐寒性与 ABA 和可溶性糖含量的关系. 园艺学报, 1998, 25(1): 56-60.
- [13] 刘慧英, 朱祝军, 吕国华, 钱琼秋. 低温胁迫下西瓜嫁接苗的生理变化与耐冷性关系的研究. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1325-1329.
- [14] 陈龙, 吴诗光, 李淑梅, 殷贵鸿, 周琳, 古红梅. 低温胁迫下冬小麦拔节期生化反应及抗性分析. 华北农学报, 2001, 16(4): 42-46.
- [15] 杨梅, 郭军战. 不同果桑品种对低温胁迫的反应及抗寒性评价. 北方园艺, 2012, (4): 29-32.
- [16] 杜永吉, 于磊, 孙吉雄, 鲁为华. 结缕草 3 个品种抗寒性的综合评价. 草业学报, 2008, 17(3): 6-16.
- [17] 许宁. 模糊综合评判在茶树种质资源抗寒性鉴定中的应用研究. 福建茶叶, 1993, (3): 16-19.
- [18] 唐仕云, 杨丽涛, 李杨瑞. 不同甘蔗基因型对低温胁迫的响应及其耐寒性评价. 热带作物学报, 2012, 33(4): 635-641.
- [19] 张保清, 杨丽涛, 李杨瑞. 自然条件下甘蔗品种抗寒生理生化特性的比较. 作物学报, 2011, 37(3): 496-505.
- [20] 张文娥, 王飞, 潘学军. 应用隶属函数法综合评价葡萄种间抗寒性. 果树学, 2007, 24(6): 849-853.
- [21] 刘雪梅, 尚庆茂, 张志刚. 辣椒不同品种种子萌芽期耐低温性及评价方法研究. 中国生态农业学报, 2005, 18(3): 521-527.
- [22] 刘雪梅, 尚庆茂, 王晓黎, 张志刚, 刘杰才, 崔世茂. 黄瓜不同品种耐低温性早期评价方法研究. 内蒙古农业大学学报, 2010, 31(4): 154-160.
- [23] 马文广, 崔华威, 李永平, 郑昀晔, 韩瑞, 胡晋. 20 个烟草品种低温逆境下发芽和苗期生理生化特性的变化及耐寒性评价. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 232-238.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000, 167-139, 184-185, 195-197, 261-263.
- [25] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海植物生理学会. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999: 303.
- [26] 侯福林. 植物生理学实验教程. 北京: 科学出版社, 2004, 91.
- [27] 任小林, 李嘉瑞. 杏果实成熟衰老过程中活性氧和几种生理指标的变化(简报). 植物生理学通讯, 1991, 27(1): 34-36.
- [28] 高志强, 张国红, 张爱芝, 苗果园. 不同小麦品种对低温的生理反应研究. 山西农业大学学报, 2002, 22(2): 109-112.
- [29] 衣莹, 张玉龙, 郭志富, 白丽萍, 乔雪, 侯立白. 冬小麦叶片对低温胁迫的生理响应. 华北农学报, 2013, 28(1): 144-148.
- [30] 于晶, 张林, 苍晶, 郝再彬, 王多佳. 冬小麦抗寒性的研究进展. 东北农业大学学报, 2008, 39(11): 123-127.
- [31] 冯素伟, 董娜, 胡铁柱, 李淦, 李笑慧, 茹振钢. 不同小麦品种抗低温能力比较. 河南科技学院学报, 2010, 38(3): 4-7.