文章编号:1000-7601(2020)01-0125-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.17

不同小麦品种对晚霜冻的响应及抗霜性评价

席吉龙[1],王　珂[1],杨　娜[1],席天元[1],张建诚[1],
姚景珍[1],席凯鹏[1],李永山[1],贾秀领[2]

(1.山西省农业科学院棉花研究所,山西 运城 044000;2.河北省农林科学院粮油作物研究所,河北 石家庄 050035)

摘　要:为评价小麦品种的抗晚霜冻能力,以 16 个小麦品种为材料,在自然霜冻条件下测定叶片相对电导率、叶绿素含量、叶绿素荧光参数(*Fv/Fm*)、光合速率、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量等生理生化指标,及幼穗冻伤率、产量及产量结构等,应用各指标相对值进行隶属度(*D* 值)综合评价及聚类分析。结果表明:小麦拔节期霜冻胁迫后,叶片叶绿素含量、叶绿素荧光参数(*Fv/Fm*)、光合速率的平均值分别降低 5.9%、1.0%、34.4%,叶片 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、MDA 含量、相对电导率平均值分别上升 46.7%、33.7%、8.4%、20.8%、32.8%,各指标品种间存在显著($P<0.05$)或极显著的差异($P<0.01$)。参试品种的平均隶属度值为 0.192~0.911,幼穗冻伤率为 1.3%~41.8%,产量为 4 328.1~8 222.3 kg·hm^{-2},产量和产量结构差异显著。通过隶属度平均值(*D* 值)、幼穗冻伤率和产量聚类,将 16 个小麦品种聚为 5 类,I 类:济麦 22、临 Y8012、山农 28;II 类:舜麦 1718、济麦 23、中麦 36、烟农 1212;III 类:山农 30、晋麦 84 号、衡杂 102、师栾 02-1、科农 2009、周麦 18;IV 类:冀麦 325、西农 585;V 类:西农 529。从第 I 类品种到第 V 类品种,冬性越来越弱,春性越来越强,抗晚霜冻能力越来越弱。

关键词:小麦;晚霜冻;生理指标;幼穗冻伤率;产量;隶属函数法

中图分类号:S512.1;S42.5　　**文献标志码**:A

Evaluation of responses of different wheat varieties to spring frost injury and their frost resistance

XI Jilong[1], WANG Ke[1], YANG Na[1], XI Tianyuan[1], ZHANG Jiancheng[1],
YAO Jingzhen[1], XI Kaipeng[1], LI Yongshan[1], JIA Xiuling[2]

(1. *Cotton Research Institute*, *Shanxi Academy of Agricultural Sciences*, *Yuncheng*, *Shanxi* 044000, *China*;
2. *Institute of Cereal and Oil Crops of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 050035, *China*)

Abstract: The experiment was conducted to evaluate wheat varieties responses to late frost with 16 wheat varieties in the field in Southern Shanxi Province. The physiological and other indices including relative electrical conductivity, chlorophyll content, fluorescence parameters (*Fv/Fm*), photosynthetic rate, malondialdehyde (MDA) content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, and catalase (CAT) activity, frostbite rate, yield, and yield component after natural frost injury happened in spring were measured. The relative value of each index was used for the comprehensive evaluation of membership degree (*D* value) and cluster analysis. The results showed that the chlorophyll content, fluorescence parameters (*Fv/Fm*), and photosynthetic rate of wheat leaves decreased by 5.9%、1.0%、and 34.4%, respectively while the SOD activity, POD activity, CAT activity, MDA content, and relative electrical conductivity of leaves increased by 46.7%、33.7%、8.4%、20.8%、and 32.8% after frost stress at the jointing stage, respectively. There were significant differences ($P<0.05$ or $P<0.01$) among varieties. The average membership value of varieties was 0.192~0.911, the frostbite rate of young ears was 1.3%~

收稿日期:2019-01-27　　**修回日期**:2019-05-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300203);"十二五"农村领域国家科技支撑计划课题(2015BAD22B03)

作者简介:席吉龙(1963-),男,山西新绛人,副研究员,主要从事作物抗逆生理栽培及调控研究。E-mail:shxxjl1963@163.com

通信作者:席天元(1964-),山西永济人,研究员,主要从事作物栽培技术研究和农业技术推广工作。E-mail:tianyuanxi@sohu.com

41.8%, and the yields ranged from 4 328.1 to 8 222.3 kg · hm^{-2}. The yield and yield structure were significant different. Based on *D* value and frostbite rate of young panicle and yield, 16 wheat varieties were clustered into 5 categories. Category I included Jimai 22, LinY8012, and Shannong 28; Category II included Shunmai 1718, Jimai 23, Zhongmai 36, and Yannong 1212; Category III included Shannong 30, Jinmai 84, Hengza 102, Shiluan 02-1, Kenong 2009, and Zhoumai 18; Category IV included Jimai 325, and Xinong 585; Category V included Xinong 529. From I to V, winteriness was weaker, while springiness was stronger and the ability to resist late frost was weaker. Therefore, higher frost resistant wheat variety should be planted.

Keywords: wheat; frost resistance; physiological index; frostbite rate of young panicle; yield; subordinate function analysis

霜冻害是小麦生产上的主要气象灾害之一。小麦完成春化后生长发育加快,随着幼穗分化期的推进,对低温的敏感性增加,幼穗的抗霜力总体呈下降的趋势[1-3]。小麦晚霜冻主要发生在春季 3 月下旬到 4 月上中旬,此时幼穗迅速发育,是影响穗粒数和产量的关键时期。发生晚霜冻致使叶片、穗下茎、幼穗不同程度受害,幼穗部分死亡或全穗枯死 ,造成不同程度的减产[4-5]。小麦霜冻年际发生频率为 30%~40%[6]。在气候变暖背景下,一方面小麦种植区域向北和向高海拔地区推移扩大,品种选择偏春性化,小麦拔节抽穗期缩短,抽穗提早,抗寒力降低。另一方面异常低温气候趋多趋强[7-8],致使晚霜冻的成灾面积上升、危害程度加重[9],对小麦生产构成严重威胁。小麦晚霜冻害的发生与气候、土壤、植株营养和水分、栽培方式等有关,但品种抗寒性是关键性内在因素[10]。选育抗霜性强的品种是减轻霜冻害的重要途径,因此鉴定品种的抗霜性对小麦生产具有重要意义。

小麦抗霜性是小麦受到低于 0℃ 及以下的低温胁迫后,通过一系列复杂的生理生化反应及形态结构的变化,对低温环境进行响应[11-12]。研究表明,植物的抗寒性与叶绿素含量[13]、光合作用[14-15]、叶绿素荧光[15-16]、细胞膜的通透性[17]、膜脂过氧化程度[15]、抗氧化酶活性[19]、丙二醛含量[20]、可溶性蛋白含量[20]密切相关。前人常用这些生理生化指标鉴定品种抗寒性,并采用多种指标来综合评价作物的抗寒性。隶属函数法是综合评价作物抗逆性的常用方法[20],能比较准确地反映出多个品种间的抗寒性差异。目前,在模拟低温盆栽环境下,通过生理生化指标对小麦的抗寒性评价研究较多[21-22],少有自然低温大田环境下,用生理生化指标结合幼穗形态及产量进行的抗寒性研究。本研究以黄淮海麦区北片三个不同类型、具有典型特点的 16 个主栽新品种为材料,在拔节期自然低温霜冻环境下,分析叶片生理生化变化和植株形态变化。以霜冻前后各性状的相对值作为抗霜性评价指标,通过隶属函数法和聚类分析法对参试品种抗霜性进行综合鉴定与评价,筛选出抗霜性品种及抗霜性鉴定指标,为气候变暖背景下小麦品种选育与抗霜减灾提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西省农业科学院棉花研究所牛家凹农场进行,试验所在地属黄河流域西北部小麦区,试验地前茬为小麦,土壤为壤质土,肥力均匀,播前 0~20 cm 耕层土壤有机质 12.36 g · kg^{-1},全氮 0.74 g · kg^{-1},有效磷 9.5 mg · kg^{-1},速效钾 174.4 mg · kg^{-1}。播前基施尿素 293.5 kg · hm^{-2},重过磷酸钙 326.0 kg · hm^{-2},返青期追施尿素 195.5 kg · hm^{-2}。

1.2 试验材料

供试小麦品种及其选育单位如表 1 所示。

1.3 试验设计

以 16 个小麦品种为 16 个处理,每个品种以霜冻前为对照重复 3 次,随机区组排列,小区面积 15 m^2。2017 年 10 月 8 日播种,行距 25 cm,各处理基本苗控制在 255 万株 · hm^{-2},依据千粒重、发芽率及田间出苗率计算播量,水肥等田间管理一致,于返青期和开花期各灌水 60 mm。2018 年 4 月 7 日凌晨试验地出现自然低温,温度为-2.6℃~-1.1℃,持续时间 5 h,4 月 6 日 20:00 至 4 月 7 日 10:00 气温变化见图 1。

1.4 测定内容与方法

1.4.1 基本调查 在小麦主要生育期调查群体结构及个体发育情况。在春季霜冻后进行植株形态、幼穗冻伤率等调查。成熟期调查产量和产量结构。

表 1　供试小麦品种及其选育单位

Table 1　Name and source of wheat varieties used in this study

编号 No.	品种 Variety	选育单位 Variety source
1	冀麦 325 Jimai 325	河北省农林科学院粮油作物研究所 Cereal Oil Crop Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences
2	衡杂 102 Hengza 102	河北省农林科学院旱作农业研究所 Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences
3	师栾 02-1 Shiluan 02-1	河北师范大学和栾城原种场 Hebei Normal University and Luancheng Seed Farm of Hebei Province
4	科农 2009 Kenong 2009	中国科学院遗传与发育生物学研究所 Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Science
5	山农 28 Shannong 28	山东农业大学 Shandong Agricultural University
6	烟农 1212 Yannong 1212	山东省烟台市农业科学研究院 Yantai Academy of Agricultural Sciences
7	济麦 22 Jimai 22	山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences
8	山农 30 Shannong 30	山东农业大学 Shandong Agricultural University
9	济麦 23 Jimai 23	山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences
10	周麦 18 Zhoumai 18	河南省周口市农业科学院 Zhoukou Institute of Agricultural Sciences
11	舜麦 1718 Shunmai 1718	山西省农业科学院棉花研究所 Cotton Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences
12	晋麦 84 Jinmai 84	山西省农业科学院棉花研究所 Cotton Research Institute, Shanxi Academy of Ggricultural Sciences
13	临 Y8012 Lin Y8012	山西省农业科学院小麦研究所 Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences
14	中麦 36 Zhongmai 36	中国农业科学院作物科学研究所 Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences
15	西农 529 Xinong 529	西北农林科技大学 Northwest A & F University
16	西农 585 Xinong 585	西北农林科技大学 Northwest A & F University

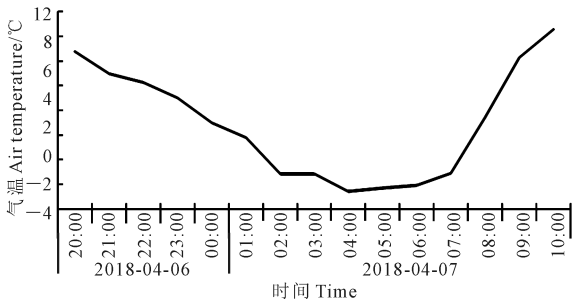

图 1　晚霜冻期间的气温变化

Fig.1　Temperature changes during frost

1.4.2　生理生化指标测定　在晚霜冻来临前 3 d 和晚霜冻后 3 d 对各品种分别进行以下测定。叶绿素含量用日本 SPAD-502 叶绿素仪测定,每小区选 5 株测定上部第 1 片完全展开叶,每个叶片测定一次。叶绿素荧光参数用美国 OS-30P 叶绿素荧光仪测定,每小区选 5 株测定上部第 1 片完全展开叶,于晴天上午 9：00—12：00 测量,测量前将叶片预先暗适应 30 min,测 PSⅡ原初光能转化效率(Fv/Fm),取 5 片叶的平均值作为测定值。光合作用采用英国生产的 LCPRO 便携式光合测定仪[23],每小区随机选取上部第 1 片完全展开叶 3 片,在叶片相同部位测定,每个叶片测定 3 min 左右,测得小麦光合速率(Pn)等参数,取 3 片叶的平均值分析使用。过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法[24],过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法[21],超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 比色法[24],丙二醛(MDA)含量采用 TBA 比色法[21],相对电导率采用电导率仪法[24]。

1.5　数据分析

1.5.1　性状相对值　以公式(1)计算性状抗冻系数相对值(x_j),作为评价品种抗霜性的指标:

$$x_j = \text{低温处理下某指标测定值} / \text{对照测定值} \times 100\% \quad (1)$$

1.5.2　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[25]。其中,与抗寒性呈正相关的各指标(叶绿素、叶绿素荧光、光合速率、SOD 活性、POD 活性、CTA 活性)隶属度值依据公式(2)计算,与抗寒性呈负相关的各指标(MDA 含量和相对电导率)隶属度值依据公式(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:

$$U(x_{ij}) = (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (2)$$

$$U(x_{ij}) = 1 - (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (3)$$

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,$x_{j\min}$ 和 $x_{j\max}$ 为各品种 j 指标相对值的最小值和最大值。

1.5.3　隶属度平均值评价法　以多个性状的隶属度平均值作为评价指标,平均隶属度值高,该品种的抗寒性强;反之,该品种的抗寒性弱。

1.6　统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件对数据进行处理,采用 DPS 7.05 数据分析软件进行方差分析(用新复极差法进行多重比较)、聚类分析。

2 结果与分析

2.1 晚霜冻对小麦叶片生理指标的影响

2.1.1 相对电导率 在霜冻来临前的正常生长条件下,参试 16 个小麦品种叶片相对电导率平均为33.5%(图 2),以晋麦 84 号叶片相对电导率表现最高,为 40.6%,以冀麦 325 最低,为 25.5%。霜冻发生后,叶片细胞膜受损电解质渗出增加,相对电导率平均高出对照 32.8%,品种间差异极显著($P<0.01$),不同品种小麦叶片相对电导率变动幅度比霜冻前增加。在供试的 16 个品种中,以霜冻前为对照,周麦 18 叶片相对电导率增幅最高,为47.7%,而济麦 22 增幅最低,仅为 16.6%。

2.1.2 叶绿素相对含量(SPAD 值) 叶绿素在光合作用中起吸收光能的作用,其含量直接影响到光合作用。霜冻前对照组叶绿素相对含量 SPAD 值平均为 57.56,以西农 529 的值最高,为 60.68,临 Y8012 叶绿素含量最低,为 52.57(图 3)。霜冻后叶绿素含量平均为 54.18,比对照低 5.9%,品种间差异极显著($P<0.01$)。与霜冻前相比,西农 529 叶片叶绿素含量降低幅度最大,降低了 15.6 %,而烟农 1212 仅降低了 0.6 %。表明晚霜冻使叶绿素含量下降,叶绿素含量的下降主要是由于叶绿素合成受到抑制。

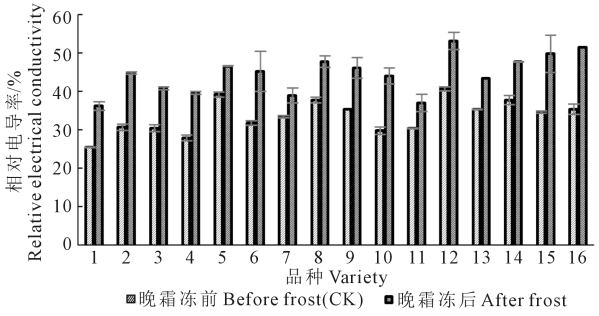

图 2 拔节期霜冻害后小麦叶片相对电导率

Fig.2 Relative electrical conductivity in wheat leaves after spring frost injury

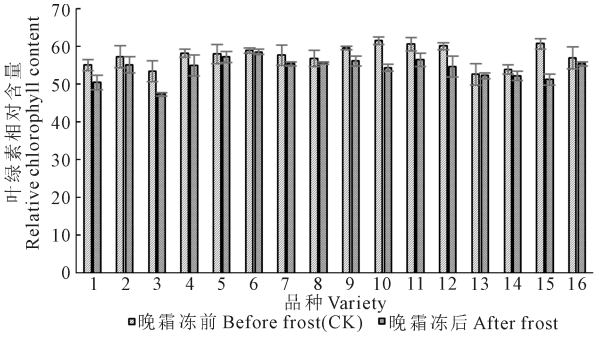

图 3 拔节期霜冻害后小麦叶片叶绿素相对含量

Fig.3 Relative chlorophyll content in wheat leaves after spring frost injury

2.1.3 叶绿素荧光参数(Fv/Fm) 由图 4 看,霜冻前对照组叶绿素荧光参数(Fv/Fm)平均为 0.821,以周麦 18 的值最高,为 0.836,以冀麦 325 的最低,为 0.812。霜冻后小麦叶片叶绿素素荧光参数(Fv/Fm)平均值为 0.813,平均降低 1.0%,品种间差异显著($P<0.05$),降幅最大的西农 529,叶片叶绿素含量降低了 2.9%,而烟农 1212 仅降低了 0.3%。

2.1.4 光合速率 光合速率是反映植物光合作用强弱的重要指标。由图 5 看,在霜冻来临前的正常生长条件下,参试的 16 个小麦品种叶片光合速率平均为 14.63 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$(图 5),以山农 30 叶片光合速率最高,为 16.09 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,以冀麦 325 最低,为 11.94 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。霜冻后叶片光合速率平均降低 34.4%,不同品种光合速率变动幅度比霜冻前增加,品种间差异显著($P<0.05$)。在供试的 16 个品种中,各品种霜冻后与霜冻前(对照)相比,科农 2009 叶片光合速率降幅最高,为 44.0%,而山农 28 降幅最低,仅为 26.4%。

2.2 晚霜冻对小麦保护酶及丙二醛的影响

2.2.1 POD 活性 正常生长条件下,参试的 16 个小麦品种 POD 活性平均为 50.5 $U \cdot g^{-1}$(图 6),以西

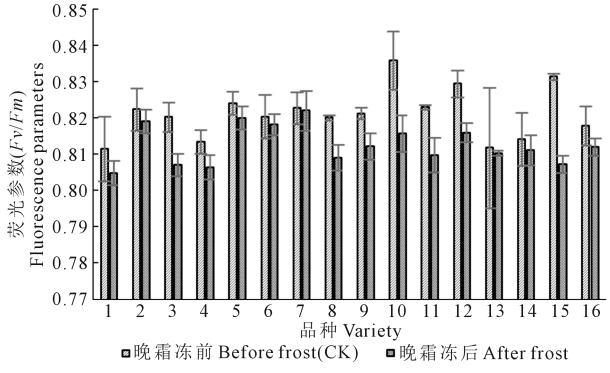

图 4 拔节期霜冻害后小麦叶片荧光参数

Fig.4 Fluorescence parameters (Fv/Fm) of wheat leaves after spring frost injury

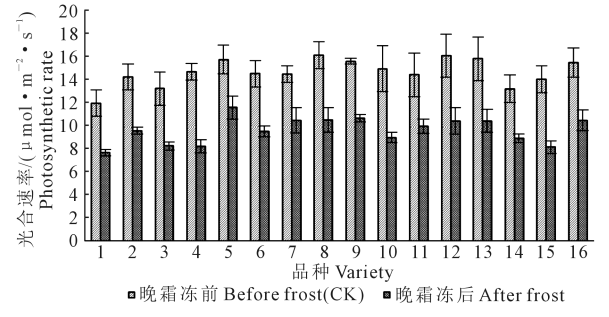

图 5 拔节期霜冻害后小麦叶片光合速率

Fig.5 Photosynthetic rate of wheat leaves after spring frost injury

农 585 叶片 POD 活性最高,为 61.12 U·g^{-1},以衡杂 102 最低,为 44.4 U·g^{-1}。霜冻后叶片 POD 活性平均为 67.5 U·g^{-1},POD 活性高出对照 33.7%,品种间差异极显著($P<0.01$)。与对照相比,在供试的 16 个品种中,济麦 23 叶片 POD 活性增幅最高,为 61.9%,而西农 585 增幅最低,仅为 15.7%。

2.2.2　CAT 活性　正常生长条件下 16 个小麦品种 CAT 活性平均为 2 735.4 U·g^{-1}(图 7),以山农 30 叶片 CAT 活性最高,为 3 132.4 U·g^{-1},以晋麦 84 号最低,为 2 486.6 U·g^{-1}。霜冻后叶片 CAT 活性平均为 2 966.1 U·g^{-1},CAT 活性高于对照 8.4%,品种间差异显著($P<0.05$)。与对照相比,在供试的 16 个品种中,济麦 23 号叶片 CAT 活性增幅最高,为 21.6%,而山农 30 却降低 4.5%。

2.2.3　SOD 活性　正常生长条件下 16 个小麦品种 SOD 活性平均为 277.4 U·g^{-1}(图 8),以西农 529 叶片 SOD 活性最高,为 354.8 U·g^{-1},以师栾 02-1 最低,为 234.4U·g^{-1}。霜冻后叶片 SOD 活性平均为 406.9 U·g^{-1},SOD 活性高于对照 46.7%,品种处理间差异极显著($P<0.01$)。与对照相比,在供试的 16 个品种中,济麦 23 叶片 SOD 活性增幅最高为 83.8%,而科农 2009 仅提高了 8.8%。参试小麦品种叶片 SOD 活性均有提高,说明小麦增强了对低温逆境的适应能力,且不同小麦品种对逆境的适应能力不同。

2.2.4　MDA 含量　正常生长条件下 16 个小麦品种的 MDA 含量平均为 20.52 nmol·g^{-1}(图 9),以晋麦 84MDA 含量最高,为 33.25 nmol·g^{-1},以临 Y8012 最低,为 16.76 nmol·g^{-1}。霜冻处理后,MDA 含量平均为 24.79 nmol·g^{-1},比对照提高 20.8%,品种间差异极显著($P<0.01$)。与对照相比,在供试的 16 个品种中,小麦功能叶 MDA 含量变化不同,科农 2009MDA 含量增幅最高,为 39.2%,而山农 28 提高了 7.2%。抗霜性较强的小麦品种 MDA 积累少、膜质过氧化程度低,抗霜性较弱的小麦品种 MDA 积累多、膜质过氧化程度高。MDA 含量的增加显示霜冻对小麦伤害程度较重。

2.3　晚霜冻对小麦产量构成因素及产量的影响

小麦在拔节中后期遇自然霜冻后,起初穗下节和幼穗出现水渍状水肿,冻害程度不易分辨,抽穗后穗部冻害症状逐渐明显,4 月 25 日调查结果表明(表 2),不同品种幼穗死伤率差异显著,幼穗死伤率

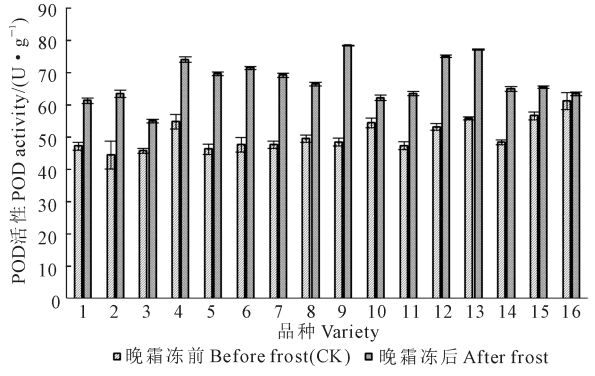

图 6　拔节期霜冻害后叶片 POD 活性

Fig.6　POD activity of wheat leaves after spring frost injury

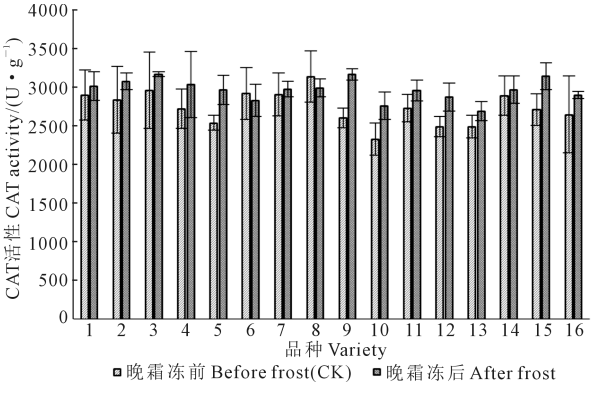

图 7　拔节期霜冻害后叶片 CAT 活性

Fig.7　CAT activity in wheat leaves after spring frost injury

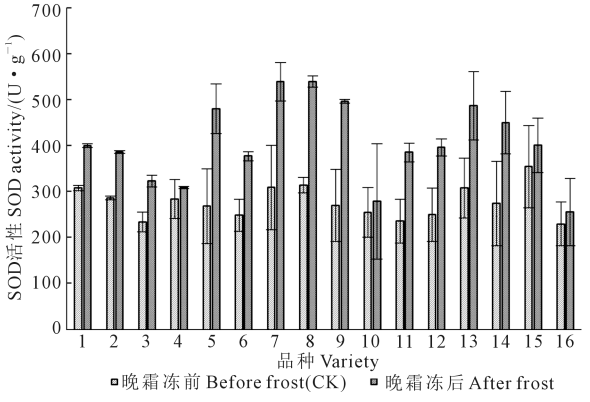

图 8　拔节期霜冻害后小麦叶片 SOD

Fig.8　SOD activity in wheat leaves after spring frost injury

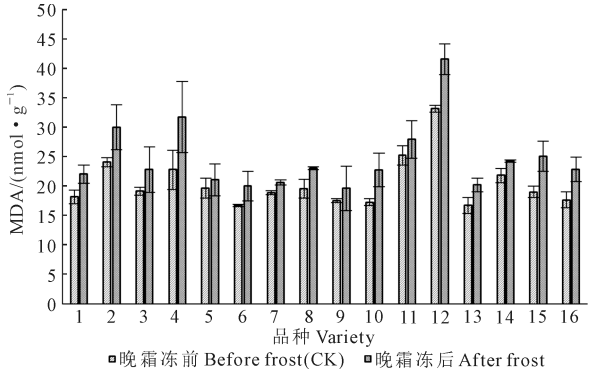

图 9　拔节期霜冻害后小麦叶片 MDA

Fig.9　MDA content in wheat leaves after spring frost injury

表 2 晚霜冻对小麦产量和产量构成因素的影响

Table 2 Effects of low temperature at jointing stage on wheat yield and its constructed component

品种 Variety	幼穗死伤率/% Frostbite rate of young spike (2018-04-25)	穗数/(10^4 · hm^{-2}) Spike numbers	穗粒数/(粒 · 穗$^{-1}$) Grains numbers per spike	千粒重/g 1000-grain weight	产量/(kg · hm^{-2}) Yield
山农 28 Shannong 28	2.6b	561.6ab	29.8bcd	48.24bc	8049.5ab
济麦 22 Jimai 22	1.3b	558.9ab	30.4bcd	48.32bc	8222.3a
济麦 23 Jimai 23	3.2b	530.3ab	25.1e	55.41a	7348.9abc
临 Y8012 Lin Y 8012	7.3b	533.6ab	29.6bcd	51.67ab	8069.4ab
中麦 36 Zhongmai 36	3.6b	534.9ab	29.6bcd	47.90bcd	7560.3abc
舜麦 1718 Shunmai 1718	7.2b	498.2b	31.5bc	46.17cd	7257.3abc
烟农 1212 Yannong 1212	8.6b	453.6b	34.0b	49.92bc	7681.2ab
山农 30 Shannong30	11.3b	457.6b	32.0bc	48.95bc	7110.9abc
晋麦 84 Jinmai 84	16.8ab	499.6b	28.9cde	48.77bc	7059.8bcd
衡杂 102 Hengza 102	17.2ab	536.3ab	29.4cde	45.41cd	7060.5bcd
冀麦 325 Jimai 325	20.8ab	484.9b	30.4bcd	43.00d	6260.5cde
师栾 02-1 Shiluan 02-1	17.5ab	635.7a	29.8bcd	36.30e	6864.0bcde
西农 585 Xinong 585	26.9ab	454.9b	27.7cde	46.05cd	5784.2de
科农 2009 Kenong 2009	23.5ab	508.3b	40.2a	34.50d	6972.8bcd
周麦 18 Zhoumai 18	41.8a	496.9b	31.3bc	45.63cd	7030.1bcd
西农 529 Xinong 529	38.0a	338.8c	25.7de	50.46bc	4328.1f

注:同列不同字母表示 $P<0.05$ 水平下差异显著($P<0.05$)

Note: Values followed by different letters in a column were significantly different treatments at $P<0.05$ level.

在 1.3%~41.8%。按幼穗死伤率高低分为 3 类:幼穗死伤率低的有济麦 22、山农 28、济麦 23、中麦 36、临 Y8012、舜麦 1718、烟农 1212、山农 30;幼穗死伤率高的有西农 529、周麦 18;其余幼穗死伤率属中间类。从表 2 可见,拔节期遇霜冻造成幼穗死伤,从而有效穗数和穗粒数减少,对不同小麦品种的产量和产量结构影响显著,产量 4 328.1~8 222.3 kg · hm^{-2}。说明不同品种的抗霜性存在差异,拔节期霜冻减产的主要原因是有效穗数和穗粒数的减少。

2.4 小麦拔节期霜冻生理生化指标的隶属度法评价

小麦抗冻性是一个复杂的综合性状,用单项指标评价都有片面性,需多指标综合评价。根据多项生理指标的测定值,用公式(1)求出各单项指标的抗冻系数。利用公式(2)、(3)进一步计算每一品种的平均隶属度值,根据各品种的隶属度平均值 D(表 3),评价品种抗冻能力的大小。对参试品种抗冻性进行强弱排序,其中山农 28 的 D 值最大,表明该品种抗冻性最强,其次为济麦 22、济麦 23、临 Y8012、中麦 36、舜麦 1718 麦等,西农 529、周麦 18、科农 2009、西农 585、师栾 02-1、冀麦 325 的 D 值较小,表明其抗冻性差。

2.5 小麦拔节期抗晚霜性综合评价

采用最长距离法,以各品种 8 个性状的隶属度平均值、幼穗冻伤率、产量三个指标进行聚类分析,结果分为五类(见图 10):I 类:济麦 22、临 Y8012、山农 28;II 类:舜麦 1718、济麦 23、中麦 36、烟农 1212;III 类:山农 30、晋麦 84 号、衡杂 102、师栾 02-1、科

表 3　晚霜冻后小麦品种综合隶属度值

Table 3　The value of each cultivar's subordinative function value

品种 Variety	相对电导率 Relative electrical conductivity	叶绿素 Chlorophyll content	荧光参数 *Fv/Fm* Fluorescence parameters	光合速率 Photosynthetic rate	POD	SOD	CAT	MDA	*D*(平均值) (Average value)
山农 28 Shannong 28	0.929	0.946	0.855	1.000	0.802	0.818	0.934	1.000	0.911
济麦 22 Jimai 22	1.000	0.770	1.000	0.931	0.716	0.259	0.871	0.938	0.811
济麦 23 Jmai 23	0.560	0.651	0.641	0.699	1.000	1.000	1.000	0.852	0.800
临 Y8012 LINY 8012	0.798	0.995	0.967	0.563	0.597	0.482	0.654	0.579	0.704
中麦 36 Zhongmai 36	0.690	0.831	0.899	0.663	0.527	0.271	0.732	0.877	0.686
舜麦 1718 Shunmai 1718	0.843	0.586	0.460	0.736	0.522	0.497	0.725	0.897	0.658
烟农 1212 Yannong 1212	0.183	1.000	0.940	0.545	0.797	0.058	0.570	0.620	0.589
山农 30 Shannong 30	0.679	0.892	0.555	0.526	0.521	0.000	0.838	0.669	0.585
晋麦 84 Jinmai 84	0.556	0.434	0.456	0.508	0.643	0.762	0.659	0.437	0.557
衡杂 102 Hengza 102	0.058	0.793	0.890	0.649	0.672	0.489	0.349	0.462	0.545
冀麦 325 Jimai 325	0.177	0.478	0.741	0.469	0.451	0.325	0.281	0.569	0.437
师栾 02-1 Shiluan 02-1	0.435	0.277	0.462	0.370	0.281	0.435	0.388	0.627	0.409
西农 585 Xinong 585	0.080	0.852	0.777	0.665	0.000	0.534	0.033	0.311	0.406
科农 2009 Kenong 2009	0.197	0.671	0.727	0.000	0.541	0.614	0.000	0.000	0.344
周麦 18 Zhoumai 18	0.000	0.267	0.177	0.236	0.180	0.882	0.006	0.237	0.248
西农 529 Xinong 529	0.140	0.000	0.000	0.121	0.204	0.784	0.057	0.227	0.192

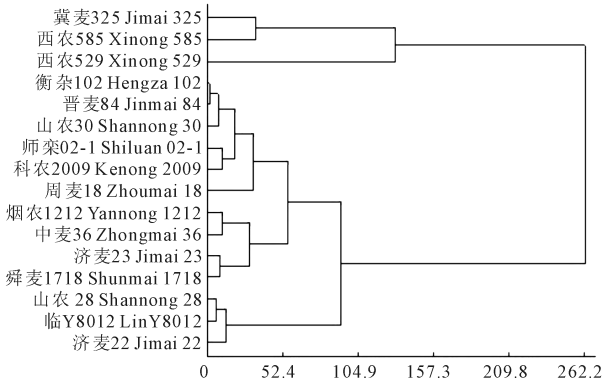

图 10　参试小麦品种抗晚霜冻聚类分析

Fig.10　Cluster tree chart of wheat varieties on frost resistance

农 2009、周麦 18;Ⅳ 类:冀麦 325、西农 585;Ⅴ 类:西农 529。从第 Ⅰ 类品种到第 Ⅴ 类品种,冬性越来越弱,春性越来越强,抗晚霜冻能力越来越弱。

3　讨　论

植物为适应低温胁迫环境通过细胞一系列生理生化变化而进行自我调节[11]。细胞膜是细胞与环境发生物质交换的主要通道,当质膜受低温逆境伤害时,膜的通透性发生变化,常以叶片电导率作为鉴定细胞膜伤害程度和所测材料抗逆性的大小[25]。本研究表明,拔节期小麦受到霜冻胁迫后叶片相对电导率较对照显著增加。因此,霜冻使小麦叶片膜透性增加并且膜受损程度加大。

陈思思[14]、王瑞霞[15]等研究表明,低温胁迫下叶片绿素含量、叶绿素荧光参数(*Fv/Fm*)、光合速率发生变化。本研究表明,霜冻胁迫后叶片叶绿素含量下降,直接影响叶绿素荧光参数和光合速率显著下降。

低温胁迫打破了细胞内自由基的产生和清除平衡状态,自由基过多,引发膜脂过氧化作用[26],产生有害的过氧化产物 MDA。随温度降低和胁迫时间的延长膜脂过氧化作用加重[27],然而,植物体中还存在着 SOD、POD 等抗氧化酶防御系统,以清除活性氧、降低逆境损伤[28]。本研究表明,小麦拔节期霜冻使小麦叶片 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 MDA 含量均高于对照。SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性的增加可以清除自由基减轻低温对生物膜的伤害。但是 MDA 含量的增加显示膜脂过氧化作用加重,即霜冻对小麦伤害程度较重。

倒春寒对小麦产量及产量构成的影响已有相关研究[15,29-30]。在高于突变温度区间的晚霜冻胁迫下,穗粒数的下降是产量损失的主要原因,在低于突变温度区间的晚霜冻胁迫下,不仅穗粒数下降,而且部分植株死亡,使穗数也显著降低[29-30]。王瑞霞等[15]认为拔节期和孕穗期低温胁迫可导致小麦茎、幼穗受冻,穗数和穗粒数显著减少,小麦产量均显著下降。胡新等[31]研究认为每百穗中各级冻害穗数、穗粒数和实际籽粒重均显著低于未受冻穗,因此导致小麦减产。本研究表明,参试小麦各品种的幼穗均受到不同程度的伤害,幼穗冻伤率1.3%~41.8%,说明不同小麦品种抗霜冻特性存在差异。受冻小麦幼穗表现为不抽穗、空心穗、缺粒穗,导致穗数、穗粒数和籽粒产量降低。不同小麦品种间产量和产量构成差异显著。本研究还发现,主茎和大分蘖的幼穗冻死后,晚生蘖(再生分蘖)快速生长可以成穗和结实,但 16 个品种的晚生蘖穗粒数平均降低 45.1 %,千粒重降低 36.1 %,单穗重平均降低了 65.1 %。晚生穗理论上可弥补霜冻灾害带来的部分产量损失,实际上晚生穗比正常穗成熟期推迟 5~7 d,无法实施机械统一收获,混收后造成数量多而品质降低的情况。

在对多个抗霜性指标进行更加准确的综合评价时,目前多用主成分分析法[18]、隶属函数法[25]、聚类分析[32]等方法,其中隶属函数法在作物抗寒性评价方面应用较多。本试验应用多指标相对性状值,计算出各品种的平均隶属度值,进行了综合评价。并通过平均隶属度值、幼穗冻伤率、产量聚类,将供试材料聚为 5 个类群,通过隶属度平均值(D 值)、幼穗冻伤率和产量聚类,将 16 个小麦品种聚为 5 类,I 类:济麦 22、临 Y8012、山农 28;II 类:舜麦 1718、济麦 23、中麦 36、烟农 1212;III 类:山农 30、晋麦 84 号、衡杂 102、师栾 02-1、科农 2009、周麦 18;IV 类:冀麦 325、西农 585;V 类:西农 529。从第 I 类品种到第 V 类品种,冬性越来越弱,春性越来越强,抗晚霜冻能力越来越弱。

综合评价结果客观反映了品种的抗霜性。D 值的排序与聚类分析有较高的吻合度。单一运用 D 值排序虽可得到鉴定材料的抗寒性综合评价,却无法得到鉴定材料之间的遗传关系,也不容易对抗寒性进行分类或分级;仅用聚类分析虽然能较好地反映鉴定材料在抗寒性方面的遗传关系,却易对鉴定材料抗寒敏感性结果造成偏差。只有将两者有机地结合使用,才能较为全面地对供试材料进行抗寒级别划分和抗寒性评价。因此,在开展作物抗寒性评价时,建议将隶属函数法和聚类分析方法结合使用。

培育优良抗低温品种是应对小麦晚霜冻的一条经济有效的途径,田间品种鉴定结果为小麦抗逆减灾和育种提供了重要依据。在田间鉴定的基础上,结合位点基因型的分子标记鉴定, 深入研究小麦抗寒性基因,揭示基因在小麦抗寒性中的作用及机制。开展田间鉴定、常规育种、基因工程、细胞工程育种等多个学科相结合的系统研究,培育出适应未来气候变化的优良品种。

4 结 论

在小麦拔节期遇自然霜冻(-2.6℃~-1.1℃)突袭 5 h,16 个不同小麦品种拔节期功能叶叶绿素含量、叶绿素荧光参数(Fv/Fm)、光合速率下降,叶片 SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性、相对电导率均不同程度地上升。通过隶属度平均值(D 值)、幼穗冻伤率和产量聚类,将 16 个小麦品种聚为 5 类,I 类:济麦 22、临 Y8012、山农 28;II 类:舜麦 1718、济麦 23、中麦 36、烟农 1212;III 类:山农 30、晋麦 84 号、衡杂 102、师栾 02-1、科农 2009、周麦 18;IV 类:冀麦 325、西农 585;V 类:西农 529。从第 I 类品种到第 V 类品种,冬性越来越弱,春性越来越强,抗晚霜冻能力越来越弱。隶属函数法和聚类分析方法结合使用是进行小麦抗霜性综合评价的有效方法。

参 考 文 献:

[1] 曾正兵,钟秀丽,王道龙, 等. 冬小麦拔节后幼穗低温敏感期的鉴定[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 297-300.

[2] 钟秀丽, 王道龙, 吉田久, 等. 冬小麦品种抗霜冻力的影响因素分析[J]. 作物学报, 2007, 33(11):1810-1814.

[3] Mahfoozi S, Limin A E, Ahakpaz F, et al. Phenological development and expression of freezing resistance in spring and winter wheat under field conditions in Northwest Iran[J]. Field Crops Research, 2006, 97(2):182-187.

[4] 钟秀丽, 王道龙, 赵鹏, 等, 黄淮麦区小麦拔节后霜冻的农业气候区划[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1):11-15.

[5] Cromey M G, Wright D S C, Boddington H J. Effects of frost during grain filling on wheat yield and grain structure[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 1998, 26(4):279-290.

[6] 李茂松,王道龙, 钟秀丽, 等. 冬小麦霜冻害研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 72-78.

[7] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近40年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. 应用气象学报. 2010, 21(1): 29-36.

[8] 刘 笑,何学敏,游松.1986-2015 年华北平原农业气象灾害的变化特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):257-263.

[9] 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[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 69-73.

[10] 游光霞, 孙果忠, 张秀英, 等. 中国黄淮海地区小麦品种抗寒性及其与 VRN1 基因型的关系[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 557-564.

(下转第 147 页)