

## 中国主要马铃薯栽培品种抗寒性的鉴定与评价

魏亮<sup>1,2</sup>, 徐建飞<sup>1</sup>, 卞春松<sup>1</sup>, 段绍光<sup>1</sup>, 胡军<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 庞万福<sup>1</sup>, 于卓<sup>2</sup>, 金黎平<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国农业科学院蔬菜花卉研究所/农业部薯类作物生物学和遗传育种重点实验室, 北京100081; <sup>2</sup>内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特010019

**摘要:** 以抗寒能力较强的马铃薯野生种 *Solanum acaule* 材料03079-431为对照, 采用室内电导率法对115个马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 品种进行了抗寒性鉴定, 评价了我国主要马铃薯栽培品种的抗寒能力。115个马铃薯品种冷驯化前的半致死温度 (LT<sub>50</sub>) 介于-1.0~-4.1°C之间, 85.3%的品种LT<sub>50</sub>高于-3°C, 其中, ‘晋薯2号’、‘克新2号’、‘郑薯5号’和‘郑薯6号’的LT<sub>50</sub>低于-3.5°C, 具有较强的抗寒能力。依据抗寒能力聚类分析, 将115个供试品种分为低温敏感型、中抗寒型、抗寒型3类, 分别占供试材料的29.6%、55.7%和14.7%。通过田间自然霜冻法进行相关分析验证, 结果显示: 自然霜冻鉴定结果与LT<sub>50</sub>测定结果的相关性达极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 相关系数达到0.9287, 表明室内鉴定结果真实可信。比较分析部分品种冷驯化前后的LT<sub>50</sub>发现, 各个品种冷驯化前后的LT<sub>50</sub>变化很小, 表明普通栽培种冷驯化能力较弱或无冷驯化能力。

**关键词:** 马铃薯; 抗寒性; 半致死温度

马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 是重要的粮菜兼用作物, 在全国各地一年四季均有种植。近年来随着我国马铃薯产业的不断发展及需求变化, 特别是南方冬作区种植面积的不断扩大, 马铃薯的发展潜力更加巨大 (屈冬玉等2007)。然而, 马铃薯生长期间常常遭受霜冻及寒潮等危害, 导致马铃薯受灾, 产量严重下降。生产上常通过调整播期、覆盖和喷施防冻液等措施来避开或减轻低温危害, 但选育抗寒能力较强的马铃薯品种是最有效的途径 (李飞和金黎平2007)。

我国马铃薯育种经过70多年的发展, 取得了很大进步, 根据查询国家和各省品种审定公告, 到2016年12月育成并审定了600多个马铃薯品种, 目前生产上大面积应用的有110多个品种, 但我国主要马铃薯栽培品种抗寒能力的相关研究报道相对较少 (杨超英等2014; 涂卫等2015)。因此, 系统地鉴定和评价我国主要马铃薯栽培品种的抗寒能力尤显必要。本研究结合离体叶片电导率法与田间自然霜冻法对我国审定的115个马铃薯栽培品种进行了抗寒性鉴定, 以期为我国马铃薯生产、品种应用与抗寒性遗传改良提供参考。

### 材料与amp;方法

#### 1 试验材料

供试的115个马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 栽培品种和1个马铃薯野生种 *Solanum acaule* 材料03079-431 (李飞和金黎平2007) 由中国农业科学院蔬菜花卉研究所马铃薯育种组提供。

#### 2 材料种植

用于驯化前抗寒性分析的115个栽培品种和1个野生种材料03079-431 (对照) 于2011年3月末至4月初分3批移栽到中国农业科学院蔬菜花卉研究所南口基地马铃薯专用温室中, 扦插于直径和高均为10 cm的塑料钵内 (栽培基质为体积比1:1的草炭土和蛭石, 基质中加入了复合肥及鸡粪), 每个材料6盆、每盆1株, 温室内温度20~25°C, 生长40 d后, 取倒四叶顶小叶进行低温处理及电导率测定。

用于田间霜冻鉴定的材料于2011年9月29日播种于南口露地网棚中, 根据品种的熟期播种, 每个材料播种一行, 每行8株, 行距50 cm, 株距为15 cm, 以 *S. acaule* 野生种03079-431为对照, 小区四周以‘中薯3号’为保护行, 网棚覆盖塑料。

用于低温驯化的材料于2011年9月末移栽到南口温室, 每个材料6盆、每盆1株, 以03079-431为对照。生长3周后移入中国农业科学院蔬菜花卉研究所马铃薯组人工气候室进行冷驯化, 驯化温度设置白天4°C, 晚间2°C, 光照14 h·d<sup>-1</sup>, 光照强度为100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 驯化2周。驯化后取倒四叶顶小叶进行低温处理及电导率测定。

#### 3 电导率测定及半致死温度 (LT<sub>50</sub>) 分析

采用改进的Steffen等的方法 (Steffen等1989; Chen等1999a) 测定材料在冷驯化前后的耐冻性和

收稿 2017-03-08 修定 2017-05-15

资助 国家现代农业马铃薯产业技术体系专项资金 (CARS-10)。

\* 通讯作者 (E-mail: jinliping@caas.cn)。

冷驯化能力(acclimation capacity)。每个品种取24片叶片,每个玻璃试管底部放入1片叶子,封口放入低温循环水浴中,在逐渐降低的特定温度下冷冻并解冻后,测定其电导率,将每个温度点对应的3次电导率的平均值通过Logistic方程拟合,电解质透出率达50%对应的温度就为该材料的LT<sub>50</sub>,即抗寒能力。分别测定冷驯化前后的LT<sub>50</sub>,按以下公式计算冷驯化能力:驯化能力=冷驯化后LT<sub>50</sub>-冷驯化前LT<sub>50</sub>。

#### 4 田间自然霜冻鉴定评价

于2011年11月20日晚对材料进行自然霜冻处理,将网棚塑料撤掉后,使用温湿记录仪测定整个夜间温湿变化情况,当天最低温度为-2.72°C,对应湿度84.8%。次日解冻后进行自然霜冻鉴定评价。植株损伤程度评分标准参考Chen等(1999a)、Vega和Bamberg (1995)的方法,根据整个植株的损伤情况进行分级评价:0为没有损伤;1为顶部叶片轻微伤害;2为少数顶部叶片冻死;3为大多数顶部叶片冻死;4为所有顶部叶片和叶柄冻死;5为所有叶片冻死;6为所有叶片和茎干冻死。

计算各品种受害程度的平均分数(AS), $AS = (X_0 + X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6) / \text{总株数}$ ,式中X<sub>0</sub>~X<sub>6</sub>分别代表各损伤等级。

#### 5 数据处理

试验数据采用DPS v7.05和Excel 2007进行分析处理。

### 实验结果

#### 1 电导率Logistic回归模型的建立及LT<sub>50</sub>的确定

以‘中薯1号’和03079-431离体叶片经不同温度处理后对应的电导率(表1)拟合Logistic方程曲线为代表,材料经不同温度处理后电导率随着处理温度的下降而增大,抗寒性越弱、电导率增长越快、方程出现拐点越早,抗寒性越强、电导率增长越慢、方程出现拐点越晚,分析得出‘中薯1号’和03079-431的LT<sub>50</sub>分别为-1.4和-5.1°C,与方程的拟合度均达到极显著水平( $P < 0.01$ ) (图1)。

根据不同温度处理后的电导率计算出115个栽培品种和对照野生种03079-431的Logistic方程、相关系数与LT<sub>50</sub>。结果表明,对照野生种03079-431的抗寒性最强,LT<sub>50</sub>达到-5.1°C,与李飞

表1 不同温度处理后‘中薯1号’和03079-431的离体叶片电导率平均值

Table 1 The average electrolyte leakage from detached leaves of ‘Zhongshu 1’ and 03079-431 at different temperatures

处理温度/°C	‘中薯1号’	03079-431
0	11.21 <sup>fF</sup>	13.93 <sup>eF</sup>
-1	37.78 <sup>eE</sup>	25.38 <sup>dE</sup>
-2	69.24 <sup>dD</sup>	33.80 <sup>dD</sup>
-3	81.62 <sup>cC</sup>	38.23 <sup>cC</sup>
-4	82.80 <sup>bBC</sup>	40.54 <sup>cC</sup>
-5	83.11 <sup>bAB</sup>	47.36 <sup>bB</sup>
-6	84.57 <sup>abA</sup>	82.38 <sup>aA</sup>
-7	86.95 <sup>aA</sup>	90.12 <sup>aA</sup>

n=3。小写英文字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著,大写字母表示 $P < 0.01$ 水平差异极显著。

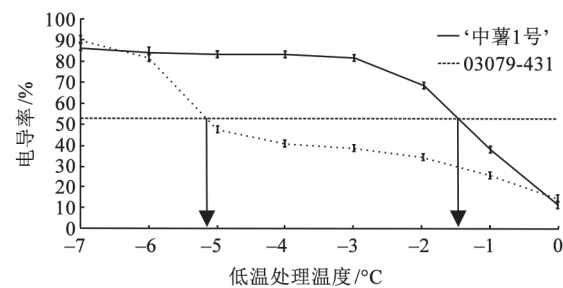


图1 不同低温处理后‘中薯1号’和03079-431离体叶片电导率拟合Logistic方程曲线

Fig.1 Logistic equation based on electrolyte leakage from detached leaves of ‘Zhongshu 1’ and 03079-431 after different low temperature treatments

和金黎平(2007)的分析结果吻合。115个栽培品种的LT<sub>50</sub>介于-1.0~-4.1°C,其中‘高原6号’的LT<sub>50</sub>只有-1.0°C,在所有栽培种中最高,抗寒能力最差;‘晋薯2号’、‘克新2号’、‘郑薯5号’和‘郑薯6号’的LT<sub>50</sub>均低于-3.5°C,抗寒性较强。供试的所有栽培品种的LT<sub>50</sub>都高于对照03079-431,说明其抗寒性均弱于对照材料(表2)。各个材料的电导率与Logistic方程的拟合度均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

#### 2 115个品种的离体叶片电导法LT<sub>50</sub>聚类分析

依据LT<sub>50</sub>对115个马铃薯品种进行了聚类分析,结果表明,在平均距离为0.8左右可将其分为3类:第一类低温敏感型,LT<sub>50</sub>在-1.0~-2.1°C,包括‘中薯1号’、‘中薯11号’、‘东农303’和‘克新15号’等34个品种,占供试材料的29.6%;第二类中抗寒型,LT<sub>50</sub>为-2.2~-3.1°C,包括‘中薯2号’、‘中薯3

表2 115个栽培品种未经驯化电导率的Logistic回归方程及LT<sub>50</sub>Table 2 Logistic equation of the relative electric conductivity and LT<sub>50</sub> of 115 varieties with non-acclimation

编号	品种名称	回归方程	拟合度(R <sup>2</sup> )	LT <sub>50</sub> (±0.1)/°C
1	‘中薯1号’	$Y=85.1368/[1+\exp(1.8908-1.6713x)]$	0.9988**	-1.4
2	‘中薯2号’	$Y=94.7399/[1+\exp(2.2611-0.89827x)]$	0.9757**	-3.0
3	‘中薯3号’	$Y=95.7387/[1+\exp(2.1382-1.1003x)]$	0.9847**	-2.3
4	‘中薯4号’	$Y=95.4481/[1+\exp(1.8872-0.84274x)]$	0.9693**	-2.6
5	‘中薯5号’	$Y=82.9813/[1+\exp(3.5238-1.5594x)]$	0.9603**	-2.5
6	‘中薯6号’	$Y=90.3643/[1+\exp(1.6140-1.3986x)]$	0.9448**	-2.6
7	‘中薯7号’	$Y=85.2855/[1+\exp(1.7389-1.8522x)]$	0.9898**	-2.2
8	‘中薯8号’	$Y=93.8043/[1+\exp(2.2529-0.74835x)]$	0.9348**	-3.2
9	‘中薯9号’	$Y=89.0409/[1+\exp(1.8277-1.0259x)]$	0.9745**	-2.2
10	‘中薯10号’	$Y=82.8615/[1+\exp(2.2145-1.0806x)]$	0.9862**	-2.0
11	‘中薯11号’	$Y=80.1307/[1+\exp(1.3294-1.3355x)]$	0.9814**	-1.9
12	‘中薯12号’	$Y=87.4295/[1+\exp(0.426528-1.18x)]$	0.9618**	-1.3
13	‘中薯13号’	$Y=88.8126/[1+\exp(2.8259-1.1020x)]$	0.9724**	-2.8
14	‘中薯14号’	$Y=86.3645/[1+\exp(1.6758-1.0182x)]$	0.9662**	-2.2
15	‘中薯15号’	$Y=85.8000/[1+\exp(3.2922-1.2756x)]$	0.9912**	-2.7
16	‘中薯16号’	$Y=84.1773/[1+\exp(3.4549-1.2154x)]$	0.9921**	-2.9
17	‘中薯17号’	$Y=93.0355/[1+\exp(2.1933-0.7396x)]$	0.9993**	-3.0
18	‘中薯18号’	$Y=96.1791/[1+\exp(2.6700-1.2211x)]$	0.9713**	-2.5
19	‘中薯19号’	$Y=92.0086/[1+\exp(3.2314-0.99358x)]$	0.9400**	-3.3
20	‘中薯20号’	$Y=91.6841/[1+\exp(1.6469-0.79624x)]$	0.9791**	-2.3
21	‘中大1号’	$Y=77.4906/[1+\exp(5.9282-2.6161x)]$	0.9838**	-2.4
22	‘临薯3号’	$Y=111.6017/[1+\exp(1.9457-0.5817x)]$	0.9046**	-3.4
23	‘辽铃1号’	$Y=95.4870/[1+\exp(2.5008-1.2000x)]$	0.9708**	-2.4
24	‘陇薯6号’	$Y=101.4487/[1+\exp(2.2829-0.7708x)]$	0.9062**	-3.4
25	‘凉薯8号’	$Y=83.9224/[1+\exp(2.1234-0.814548x)]$	0.9874**	-2.9
26	‘凉薯97号’	$Y=83.2203/[1+\exp(2.6334-1.1436x)]$	0.9938**	-2.5
27	‘川芋5号’	$Y=93.0744/[1+\exp(1.9591-0.84381x)]$	0.9549**	-2.5
28	‘川芋8号’	$Y=87.1325/[1+\exp(5.1948-2.2602x)]$	0.9663**	-2.5
29	‘川芋6号’	$Y=87.9564/[1+\exp(2.6388-1.1758x)]$	0.9982**	-2.4
30	‘双丰4号’	$Y=83.1411/[1+\exp(1.2606-1.4015x)]$	0.9922**	-1.4
31	‘双丰5号’	$Y=83.3326/[1+\exp(3.9490-1.6573x)]$	0.9741**	-2.6
32	‘双丰6号’	$Y=80.8150/[1+\exp(2.4299-1.0811x)]$	0.9927**	-2.5
33	‘陇薯5号’	$Y=88.1922/[1+\exp(7.1877-3.1022x)]$	0.9487**	-2.5
34	‘内薯7号’	$Y=79.8886/[1+\exp(3.2292-1.4022x)]$	0.9667**	-2.5
35	‘南中552’	$Y=88.7824/[1+\exp(3.3103-1.3756x)]$	0.9885**	-2.6
36	‘郑薯6号’	$Y=94.9440/[1+\exp(3.1678-0.83559x)]$	0.9767**	-3.6
37	‘蒙薯13号’	$Y=92.9722/[1+\exp(1.9958-1.0147x)]$	0.9607**	-2.4
38	‘克新1号’	$Y=82.7699/[1+\exp(2.0498-0.94994x)]$	0.9951**	-2.5
39	‘宁薯6号’	$Y=90.1080/[1+\exp(3.4515-1.5371x)]$	0.9655**	-2.4
40	‘晋薯10号’	$Y=90.8987/[1+\exp(2.1611-0.86717x)]$	0.9928**	-2.8
41	‘青薯3号’	$Y=85.5995/[1+\exp(2.8972-1.4534x)]$	0.9593**	-2.3
42	‘青薯4号’	$Y=97.5904/[1+\exp(3.2659-1.1272x)]$	0.9766**	-3.0
43	‘青薯8号’	$Y=97.2029/[1+\exp(2.0845-0.7781x)]$	0.9837**	-2.9
44	‘陇薯1号’	$Y=86.9747/[1+\exp(1.9060-0.76825x)]$	0.9754**	-2.9
45	‘渝马铃薯1’	$Y=92.0303/[1+\exp(1.1338-1.0541x)]$	0.9910**	-1.7
46	‘中甸红’	$Y=94.2013/[1+\exp(3.4325-1.5701x)]$	0.9477**	-2.5
47	‘蒙薯12号’	$Y=84.2657/[1+\exp(2.9159-2.2451x)]$	0.9893**	-1.5
48	‘青薯7号’	$Y=92.9533/[1+\exp(1.9427-0.72959x)]$	0.9919**	-2.8
49	‘晋薯3号’	$Y=91.5815/[1+\exp(1.9084-0.80006x)]$	0.9795**	-2.6
50	‘晋薯4号’	$Y=76.0100/[1+\exp(3.1840-1.3082x)]$	0.9760**	-2.7

表2 (续1)

编号	品种名称	回归方程	拟合度( $R^2$ )	LT <sub>50</sub> ( $\pm 0.1$ )/ $^{\circ}\text{C}$
51	‘克新15号’	$Y=79.1771/[1+\exp(3.1587-1.7245x)]$	0.9907**	-2.0
52	‘春薯1号’	$Y=83.1430/[1+\exp(1.6034-1.3348x)]$	0.9983**	-1.4
53	‘紫薯’	$Y=83.6715/[1+\exp(1.7572-1.0353x)]$	0.9836**	-2.2
54	‘冀张薯8号’	$Y=86.5829/[1+\exp(3.2412-1.3674x)]$	0.9648**	-2.6
55	‘Shepody’	$Y=92.070/[1+\exp(0.549268-0.8618x)]$	0.9489**	-1.6
56	‘Desiree’	$Y=93.7228/[1+\exp(2.2815-1.0631x)]$	0.9391**	-2.5
57	‘Spunta’	$Y=92.4825/[1+\exp(1.1812-0.99339x)]$	0.9887**	-1.9
58	‘合作88’	$Y=86.9678/[1+\exp(2.6792-1.7618x)]$	0.9972**	-1.6
59	‘五台白’	$Y=101.6830/[1+\exp(2.3417-0.7633x)]$	0.9620**	-3.3
60	‘北方红’	$Y=94.0035/[1+\exp(2.8724-1.1251x)]$	0.9775**	-2.8
61	‘黑山药’	$Y=74.2601/[1+\exp(3.7719-1.8946x)]$	0.9897**	-2.1
62	‘福山红眼’	$Y=85.8058/[1+\exp(2.6168-1.4728x)]$	0.9919**	-2.1
63	‘高原4号’	$Y=94.7445/[1+\exp(0.6507-0.66752x)]$	0.9677**	-1.9
64	‘川芋56’	$Y=80.9315/[1+\exp(5.2082-1.9930x)]$	0.9670**	-2.8
65	‘川芋早’	$Y=86.0954/[1+\exp(5.5612-4.0237x)]$	0.9838**	-1.6
66	‘万芋9号’	$Y=90.5295/[1+\exp(2.9455-0.930098x)]$	0.9060**	-3.4
67	‘晋薯7号’	$Y=93.2123/[1+\exp(1.8996-0.885154x)]$	0.9735**	-2.4
68	‘宁薯1号’	$Y=87.5221/[1+\exp(1.8556-1.0185x)]$	0.9585**	-2.8
69	‘克新3号’	$Y=92.2464/[1+\exp(1.5186-0.745649x)]$	0.9740**	-2.0
70	‘陇薯3号’	$Y=101.2583/[1+\exp(4.3157-1.2545x)]$	0.9180**	-3.5
71	‘转心乌’	$Y=92.1985/[1+\exp(1.8290-1.5021x)]$	0.9234**	-1.6
72	‘春薯5号’	$Y=91.8049/[1+\exp(2.5970-1.2248x)]$	0.9232**	-2.5
73	‘青薯2号’	$Y=88.4161/[1+\exp(4.7685-2.0806x)]$	0.9594**	-2.4
74	‘鄂薯1号’	$Y=100.2138/[1+\exp(2.5321-0.84884x)]$	0.9477**	-3.2
75	‘丽薯1号’	$Y=92.2487/[1+\exp(0.133914-0.3042x)]$	0.9891**	-2.6
76	‘郑薯5号’	$Y=117.2287/[1+\exp(2.4377-0.64145x)]$	0.9547**	-3.6
77	‘俄薯8号’	$Y=102.8023/[1+\exp(2.3638-0.8329x)]$	0.9888**	-3.1
78	‘克新17号’	$Y=94.9615/[1+\exp(2.4972-1.0269x)]$	0.9952**	-2.5
79	‘高原6号’	$Y=80.6472/[1+\exp(2.0298-2.9753x)]$	0.9792**	-1.0
80	‘呼薯5号’	$Y=77.6482/[1+\exp(3.5623-1.3936x)]$	0.9804**	-2.7
81	‘凉薯30号’	$Y=86.4109/[1+\exp(1.8110-1.0644x)]$	0.9649**	-2.2
82	‘凉薯3号’	$Y=82.7297/[1+\exp(3.0263-2.4005x)]$	0.9923**	-1.4
83	‘坝薯9号’	$Y=80.4293/[1+\exp(1.6910-0.934943x)]$	0.9607**	-1.8
84	‘安薯58’	$Y=89.2403/[1+\exp(1.9723-1.2467x)]$	0.9772**	-1.9
85	‘东农303’	$Y=90.9871/[1+\exp(1.1600-0.888971x)]$	0.9763**	-2.0
86	‘川芋10号’	$Y=91.9560/[1+\exp(2.2634-1.0199x)]$	0.9767**	-2.1
87	‘合作001’	$Y=93.1601/[1+\exp(0.9074-0.941377x)]$	0.9903**	-1.7
88	‘克新19号’	$Y=93.1088/[1+\exp(1.2931-0.962057x)]$	0.9952**	-1.9
89	‘云薯102’	$Y=89.7893/[1+\exp(2.1184-1.3489x)]$	0.9903**	-1.8
90	‘早大白’	$Y=90.7872/[1+\exp(2.2303-0.91924x)]$	0.9911**	-2.6
91	‘克新4号’	$Y=88.3325/[1+\exp(3.1094-1.1103x)]$	0.9683**	-2.8
92	‘奇台白玉’	$Y=86.5284/[1+\exp(0.9485-1.3973x)]$	0.9822**	-1.1
93	‘沙杂15号’	$Y=93.3959/[1+\exp(2.6380-1.0565x)]$	0.9847**	-2.7
94	‘郑薯2号’	$Y=81.5196/[1+\exp(3.4949-1.0105x)]$	0.9613**	-3.5
95	‘晋薯2号’	$Y=234.2798/[1+\exp(2.7033-0.37246x)]$	0.9452**	-4.1
96	‘黄麻子’	$Y=84.2660/[1+\exp(3.1946-0.997919x)]$	0.9444**	-3.4
97	‘双丰’	$Y=93.0767/[1+\exp(1.4638-0.644201x)]$	0.9760**	-2.8
98	‘沙杂1号’	$Y=93.3112/[1+\exp(3.1638-1.1477x)]$	0.9970**	-2.7
99	‘克新2号’	$Y=101.1488/[1+\exp(2.7571-0.66781x)]$	0.9875**	-3.7
100	‘乌盟684’	$Y=93.8057/[1+\exp(2.7864-0.815093x)]$	0.9904**	-3.2
101	‘克新6号’	$Y=93.4984/[1+\exp(12.7044-3.8491x)]$	0.8955**	-3.4



表2 (续2)

编号	品种名称	回归方程	拟合度( $R^2$ )	LT <sub>50</sub> ( $\pm 0.1$ )/°C
102	‘克新12号’	$Y=84.5297/[1+\exp(2.0325-1.0810x)]$	0.9793**	-2.3
103	‘尤金’	$Y=88.2363/[1+\exp(2.0525-1.1735x)]$	0.9778**	-1.9
104	‘青薯168’	$Y=85.3378/[1+\exp(2.2756-1.6928x)]$	0.9905**	-1.5
105	‘超白’	$Y=88.4608/[1+\exp(1.6733-1.1686x)]$	0.9888**	-1.7
106	‘成功’	$Y=90.2957/[1+\exp(2.3991-0.960865x)]$	0.9681**	-2.7
107	‘深眼窝’	$Y=84.2078/[1+\exp(3.1867-0.995493x)]$	0.9442**	-3.1
108	‘圆叶青’	$Y=94.1401/[1+\exp(3.0119-1.0542x)]$	0.9807**	-3.0
109	‘石人果’	$Y=93.5992/[1+\exp(2.8704-1.3221x)]$	0.9619**	-2.4
110	‘河坝洋芋’	$Y=101.1633/[1+\exp(2.7099-0.7815x)]$	0.9837**	-3.5
111	‘天麻洋芋’	$Y=84.2801/[1+\exp(2.6030-1.6789x)]$	0.9940**	-1.7
112	‘Favorita’	$Y=95.8773/[1+\exp(2.5567-1.1712x)]$	0.9766**	-2.4
113	‘信宜红皮’	$Y=84.5314/[1+\exp(0.7397-1.0999x)]$	0.9916**	-1.5
114	‘下寨65’	$Y=88.0157/[1+\exp(2.1141-1.2447x)]$	0.9934**	-1.8
115	‘虎头’	$Y=83.5079/[1+\exp(4.3242-1.9478x)]$	0.9729**	-2.6
116	03079-431	$Y=76.8594/[1+\exp(8.3981-0.2467x)]$	0.9238**	-5.1

\*\*表示拟合度达极显著水平( $P<0.01$ )。

号’、‘中大1号’和‘克新4号’等64个品种, 占供试材料的55.7%; 第三类抗寒型, LT<sub>50</sub>低于-3.1°C, 包括‘五台白’、‘克新2号’、‘鄂薯1号’、‘中薯19号’和‘晋薯2号’等17个品种, 占供试材料的14.7% (表3)。聚类结果表明, 我国较抗寒的马铃薯栽培品种资源并不丰富, 所测定材料中有85.3%的LT<sub>50</sub>不低于-3.1°C, 且品种间差异较小。

### 3 田间自然霜冻植株损伤程度评价

植株受到夜间自然霜冻后, 在次日白天植株解冻后进行损伤评价。自然霜冻条件下不同品种的植

株表现出不同的损伤程度。田间自然霜冻后不抗寒材料的叶片呈墨绿色、水渍状, 茎干瘫软, 整株倒伏在地上, 气温回升后叶片逐渐卷曲干枯; 抗寒性材料茎秆挺立, 植株损伤较轻, 气温回升后能够正常生长。将材料霜冻损伤评分从低到高进行排序, 对照材料在此温度下基本没有损伤, 损伤评分最低(0.1); 其他材料的损伤分数都大于2, 其中‘晋薯2号’、‘郑薯2号’、‘临薯3号’和‘中薯19号’损伤评分为2.5, 在栽培材料中损伤较轻; ‘中薯1号’、‘渝马铃薯1号’等材料损伤评分为6, 植株基本死亡(图2)。

表3 115个品种的LT<sub>50</sub>聚类分析结果及抗寒能力Table 3 Result of cluster analysis of LT<sub>50</sub> and frost tolerance for 115 experimental varieties

LT <sub>50</sub> ( $\pm 0.1$ )/°C	抗寒性	品种名称
<-3.1	抗寒型	03079-431 (对照)、‘晋薯2号’、‘克新2号’、‘郑薯6号’、‘郑薯5号’、‘陇薯3号’、‘郑薯2号’、‘河坝洋芋’、‘临薯3号’、‘陇薯6号’、‘万芋9号’、‘黄麻子’、‘克新6号’、‘中薯19号’、‘五台白’、‘中薯8号’、‘鄂薯1号’、‘乌盟684’
-2.2~-3.1	中抗寒型	‘中薯2号’、‘中薯17号’、‘青薯4号’、‘圆叶青’、‘俄薯8号’、‘深眼窝’、‘中薯16号’、‘凉薯8号’、‘青薯8号’、‘陇薯1号’、‘中薯13号’、‘晋薯10号’、‘青薯7号’、‘北方红’、‘川芋56’、‘宁薯1号’、‘克新4号’、‘双丰’、‘中薯15号’、‘晋薯4号’、‘呼薯5号’、‘沙杂15号’、‘沙杂1号’、‘成功’、‘中薯4号’、‘中薯6号’、‘双丰5号’、‘南中552’、‘晋薯3号’、‘冀张薯8号’、‘丽薯1号’、‘早大白’、‘虎头’、‘中薯5号’、‘中薯18号’、‘凉薯97号’、‘川芋5号’、‘川芋8号’、‘双丰6号’、‘陇薯5号’、‘内薯7号’、‘克新1号’、‘中甸红’、‘Desiree’、‘春薯5号’、‘克新17号’、‘中大1号’、‘辽铃1号’、‘川芋6号’、‘蒙薯13号’、‘宁薯6号’、‘晋薯7号’、‘青薯2号’、‘石人果’、‘Favorita’、‘中薯3号’、‘中薯20号’、‘青薯3号’、‘克新12号’、‘中薯7号’、‘中薯9号’、‘中薯14号’、‘紫薯’、‘凉薯30号’
-2.1~-1.0	低温敏感型	‘中薯10号’、‘克新15号’、‘克新3号’、‘东农303’、‘黑山药’、‘福山红眼’、‘川芋10号’、‘中薯11号’、‘Spunta’、‘高原4号’、‘安薯58’、‘克新19号’、‘尤金’、‘坝薯9号’、‘云薯102’、‘下寨65’、‘渝马铃薯1’、‘合作001’、‘超白’、‘天麻洋芋’、‘Shepody’、‘合作88’、‘川芋早’、‘转心鸟’、‘蒙薯12号’、‘青薯168’、‘信宜红皮’、‘中薯1号’、‘双丰4号’、‘春薯1号’、‘凉薯3号’、‘中薯12号’、‘奇台白玉’、‘高原6号’

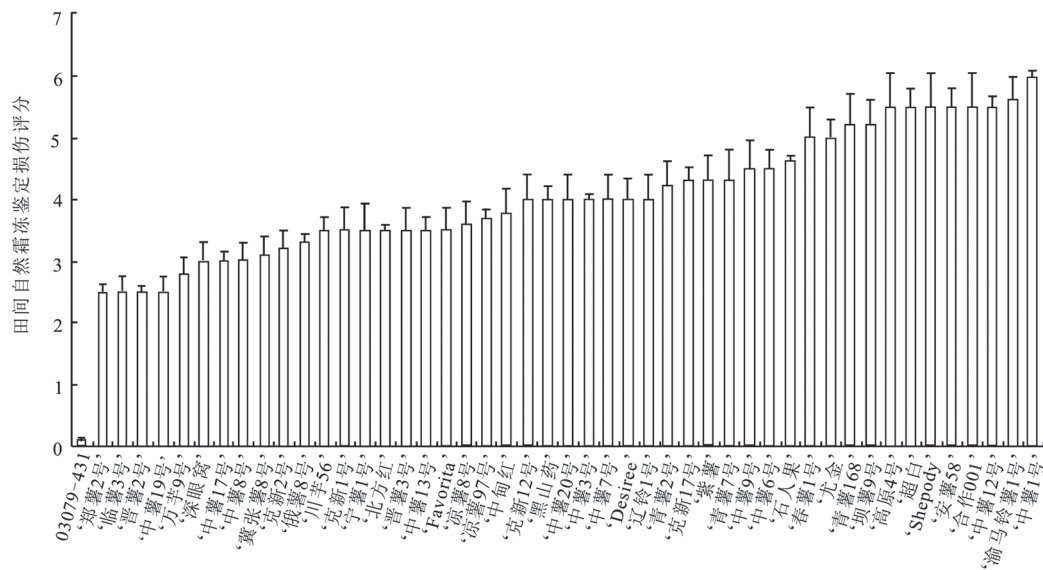
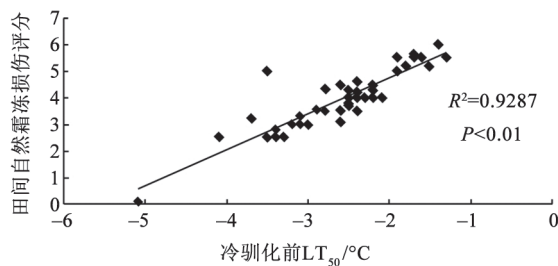


图2 48个供试材料的田间自然霜冻损伤评分

Fig.2 The histogram of field freezing rating score of 48 tested materials

#### 4 离体叶片电导法鉴定结果与田间自然霜冻评价结果的相关分析

对离体叶片电导法鉴定的 $LT_{50}$ 与田间自然霜冻损伤评分进行相关性分析, 结果表明, 两者呈极显著相关( $P < 0.01$ ), 相关系数为0.9287 (图3)。这表明离体叶片电导法鉴定结果真实可信, 是有效的鉴定方法。

图3 供试品种室内鉴定的 $LT_{50}$ 与自然霜冻鉴定结果的相关性分析Fig.3 Correlation analysis between natural field freezing rating scores and  $LT_{50}$  of tested varieties

#### 5 栽培品种低温驯化能力分析

对供试材料冷驯化前后的 $LT_{50}$ 值进行对比, 结果表明, 与对照材料(野生种03079-431)相比, 各栽培品种驯化前后的 $LT_{50}$ 值变化较小(表4)。在人工气候室低温驯化6 d时发现, 部分品种叶片出现卷

曲、变黄及萎蔫, 且随驯化天数的增加, 症状越来越明显, 这些都表明栽培品种不具有驯化能力或驯化能力很弱。

## 讨论

### 1 马铃薯抗寒性

马铃薯抗寒性包括冷驯化前的抗寒性及冷驯化能力, 冷驯化前后的抗寒能力差异就是植物的冷驯化能力。国外研究者已对一些马铃薯野生种及栽培种进行了抗寒性分析, 发现马铃薯野生种中有较丰富的抗寒性材料, 且某些材料具有很强的冷驯化能力, 如*S. acaule*和*S. commersonii*等(Chen和Li 1980a; Mastenbroek 1956; 李飞等2014)。与野生种对比, 栽培种一般抗寒性较弱, 如*S. ajanhuiri* (2x)和*S. curtilobum* (5x)在 $-3^{\circ}\text{C}$ 左右时就发生霜冻损害, 但也有一些栽培种马铃薯具有一定的抗寒性, 如*S. juzepzuckii* (3x)的抗寒温度能够达到 $-5^{\circ}\text{C}$ 。并且, 相对于四倍体栽培种, 二倍体和三倍体马铃薯栽培种具有显著抗寒性(Hetherington等1983)。研究者认为栽培种与野生种的主要区别是在 $LT_{50}$ 下, 植株对于体内凝结的冰水的忍耐程度(Li 1977)。植物经过冷驯化后, 感受低温信号, 促使许多基因表达发生变化(Evers等2012; 杨慧菊和郭华春2017), 从而提高植物的抗寒能力。低温驯化能

表4 38个栽培品种的驯化能力

Table 4 Acclimation capacity of 38 experimental varieties

品种名称	驯化前LT <sub>50</sub> (±0.1)	驯化后LT <sub>50</sub> (±0.1)	驯化能力	品种名称	驯化前LT <sub>50</sub> (±0.1)	驯化后LT <sub>50</sub> (±0.1)	驯化能力
‘中薯1号’	-1.4	-2.3	0.9	‘双丰’	-2.8	-3.0	0.2
‘中薯3号’	-2.3	-2.9	0.6	‘克新12号’	-2.3	-2.5	0.2
‘中薯4号’	-2.6	-3.3	0.7	‘超白’	-1.7	-2.3	0.6
‘中薯6号’	-2.6	-3.4	0.8	‘合作001’	-1.7	-2.1	0.4
‘中薯8号’	-3.2	-3.4	0	‘临薯3号’	-3.4	-3.4	0
‘中薯9号’	-2.2	-2.7	0.5	‘安薯58’	-1.9	-3.0	1.1
‘中薯10号’	-2.0	-2.6	0.6	‘川芋早’	-1.6	-2.1	0.5
‘中薯11号’	-1.9	-2.7	0.8	‘晋薯2号’	-4.1	-4.3	0.2
‘中薯12号’	-1.3	-2.0	0.7	‘双丰6号’	-2.5	-3.5	1.0
‘中薯13号’	-2.8	-3.1	0.3	‘渝薯1号’	-1.7	-2.8	1.1
‘中薯14号’	-2.2	-2.5	0.3	‘春薯1号’	-1.4	-2.6	1.2
‘中薯20号’	-2.3	-2.3	0	‘克新2号’	-3.7	-3.7	0
‘中薯17号’	-3.3	-3.3	0	‘克新1号’	-2.5	-2.8	0.3
‘克新19号’	-1.9	-2.0	0.1	‘Favorita’	-2.4	-3.1	0.7
‘乌盟684’	-3.2	-4.0	0.8	‘尤金’	-1.9	-2.1	0.2
‘高原6号’	-1.0	-1.5	0.5	‘奇台白玉’	-1.1	-1.6	0.5
‘黄麻子’	-3.4	-3.8	-0.4	03079-431	-5.1	-7.9	2.8
‘Desiree’	-2.5	-2.7	0.2	‘郑薯6号’	-3.6	-3.9	0.2
‘晋薯3号’	-2.6	-2.7	0.1	‘虎头’	-2.6	-2.7	0.1

够提高马铃薯抗寒性(杨超英等2014), 但驯化的分子机制尚不清楚。

我国马铃薯种植地域广泛, 气候类型多样, 生产中常遭遇极端低温天气的影响。本研究评价了我国主要马铃薯栽培品种的抗寒性, 旨在为马铃薯生产和品种布局提供依据。本研究表明供试的115个栽培品种驯化前的LT<sub>50</sub>均介于-1.0~-4.1°C, 其中, ‘晋薯2号’、‘克新2号’、‘郑薯5号’和‘郑薯6号’等少数品种表现出较强的抗寒性, 但仍低于野生种材料(03079-431)。而绝大多数品种的LT<sub>50</sub>高于-3.1°C, 耐低温霜冻较弱, 且品种间抗寒性差异很小。我国马铃薯育种以常规育种为主, 即品种间或种间杂交, 野生资源利用少, 审定品种遗传组成差异小, 遗传背景狭窄(金黎平等2007), 这可能是造成品种间抗寒性差异较小的原因之一。对部分供试材料进行了低温驯化, 结果表明我国栽培品种无驯化能力或驯化能力很弱, 这与前人研究结果吻合(Chen和Li 1980b; Li和Palta 1978)。

## 2 马铃薯抗寒性鉴定方法

对于马铃薯的抗寒研究, 国外已进行了多年, 但国内研究报道相对较少。田间自然霜冻鉴定是根据田间霜冻后马铃薯植株的损伤情况进行评价,

Vega和Bamberg (1995)采用自然低温霜冻对美国101个不同种的2 600多个马铃薯材料进行了田间自然霜冻评价, 将马铃薯的损伤情况分为了7个等级。在国内, 李飞和金黎平(2007)以Vega和Bamberg (1995)建立的评价标准, 采用自然霜冻鉴定了野生种*S. acaule*后代材料和‘中薯3号’的抗寒性, 并克隆了马铃薯的抗寒相关基因*SAD* (Li等2015)。刘浩和张宗山(2008)也采用田间自然霜冻鉴定法, 对宁夏南部山区14个主栽马铃薯品种进行耐霜冻性评价。但是自然霜冻鉴定方法易受环境影响, 可控性弱、对环境温度依赖性高。离体叶片电导率法是基于低温胁迫下细胞膜系统受损伤程度, 胞内电解质外渗率的大小拟合Logistic方程来评价马铃薯的抗寒性。Sukumaran和Weiser (1972a)提出了电解质透出率达50%时为LT<sub>50</sub>, 且电导率与处理温度呈现“S”形变化, 与Logistic方程相吻合。因此, 以电导率法结合Logistic方程分析材料的LT<sub>50</sub>能较直观而准确地反映植物的抗寒性和所能忍耐的低温极限, 研究者通过室内不同低温下植物组织的电导率值结合Logistic方程分析马铃薯品种临界致死温度, 从而评价试验材料的抗寒性(Steffen等1989; Sukumaran和Weiser 1972b), 该方法已成为

研究马铃薯抗寒能力的最主要方法(Chen等1999a, b; Vega等2003; Arvin和Donnelly 2008; 辛翠花等2012; 黄先群等2014)。本研究中室内电导率鉴定结果与田间鉴定结果呈极显著相关, 表明室内低温鉴定结果真实可信, 能够评价马铃薯材料在田间低温霜冻环境下的存活情况。

### 参考文献

- Arvin MJ, Donnelly DJ (2008). Screening potato cultivars and wild species to abiotic stresses using an electrolyte leakage bioassay. *J Agric Sci Technol*, 10: 33–42
- Chen HH, Li PH (1980a). Characteristics of cold acclimation and de-acclimation in tuber-bearing *Solanum* species. *Plant Physiol*, 65: 1146–1148
- Chen HH, Li PH (1980b). Biochemical changes in tuber-bearing *Solanum* species in relation to frost hardiness during cold acclimation. *Plant Physiol*, 66: 414–421
- Chen YKH, Palta JP, Bamberg JB (1999a). Expression of nonacclimated freezing tolerance and cold acclimation capacity in somatic hybrids between hardy wild *Solanum* species and cultivated potatoes. *Euphytica*, 107: 1–8
- Chen YKH, Palta JP, Bamberg JB (1999b). Freezing tolerance and tuber production in selfed and backcross progenies derived from somatic hybrids between *Solanum tuberosum* L. and *S. commersonii* Dun. *Theor Appl Genet*, 99: 100–107
- Evers D, Legay S, Lamoureux D, Hausman JF, Hoffmann L, Renaut J (2012). Towards a synthetic view of potato cold and salt stress response by transcriptomic and proteomic analyses. *Plant Mol Biol*, 78 (4-5): 503–514
- Hetherington SE, Smillie RM, Malagamba P, Huaman Z (1983). Heat tolerance and cold tolerance of cultivated potatoes measured by the chlorophyll-fluorescence method. *Planta*, 159: 119–124
- Huang XQ, Cao T, Xin ZH, Li X, Li L, Huang T (2014). Selection and identification of cold resistance lines on potato. *Southwest China J Agric Sci*, 27 (3): 991–995 (in Chinese with English abstract) [黄先群, 曹通, 辛智海, 李旭, 李丽, 黄团(2014). 马铃薯抗寒材料的筛选及鉴定. *西南农业学报*, 27 (3): 991–995]
- Jin LP, Liu J, De Jong H, Fang ZY (2007). Construction of a molecular linkage map in *Solanum tuberosum* L. *Acta Horticult Sin*, 34 (2): 397–402 (in Chinese with English abstract) [金黎平, 刘杰, H De Jong, 方智远(2007). 二倍体马铃薯分子连锁图谱的构建. *园艺学报*, 34 (2): 397–402]
- Li F, Bian CS, Xu JF, Pang WF, Liu J, Duan SG, Lei ZG, Jiwan P, Jin LP (2015). Cloning and functional characterization of *SAD* genes in potato. *PLoS ONE*, 10 (3): e0122036
- Li F, Jin LP (2007). Assessment of wild potatoes for their frost tolerance. *China Pot*, 21: 139–141 (in Chinese with English abstract) [李飞, 金黎平(2007). 野生马铃薯材料耐霜冻性评价. *中国马铃薯*, 21: 139–141]
- Li F, Xu JF, Liu J, Duan SG, Bian CS, Palta JP, Jin LP (2014). Molecular cloning and expression analysis of *FAD2* gene from three wild potato species with different levels of freezing tolerance. *Acta Agron Sin*, 40 (1): 45–53 (in Chinese with English abstract) [李飞, 徐建飞, 刘杰, 段绍光, 卞春松, Jiwan P Palta, 金黎平(2014). 三个耐冻性不同的马铃薯野生种中 $FAD2$ 基因的克隆及表达分析. *作物学报*, 40 (1): 45–53]
- Li PH (1977). Frost killing temperatures of 60 tuber-bearing *Solanum* species. *Am Pot J*, 54: 452–456
- Li PH, Palta JP (1978). Frost hardening and freezing stress in tuber-bearing *Solanum* species. In: Li PH, Sakai A (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. New York: Academic Press, 49–71
- Liu H, Zhang ZS (2008). Research on the frost-resistant of potato variety grown in southern mountain of Ningxia Hui Autonomous District. *J Anhui Agric Sci*, 36: 14485–14486, 14551 (in Chinese with English abstract) [刘浩, 张宗山(2008). 宁夏南部山区马铃薯主栽品种耐霜冻性研究. *安徽农业科学*, 36: 14485–14486, 14551]
- Mastenbroek C (1956). Some experiences in breeding frost-tolerant potatoes. *Euphytica*, 5: 289–297
- Qu DY, Xie KY, Jin LP, Pang WF (2007). China potato industry and modern agriculture. *Agric Technol Equip*, 139: 4–7 (in Chinese with English abstract) [屈冬玉, 谢开云, 金黎平, 庞万福(2007). 中国马铃薯产业与现代农业. *农业技术与装备*, 139: 4–7]
- Rajashekar C, Gusta LV, Burke MJ (1979). Membrane structural transition: probable relation to frost damage in hardy herbaceous species. In: Lysons JM, Graham D, Raison JK (eds). *Low Temperature Stress in Crop Plants. The Role of Membrane*. New York: Academic Press, 255–274
- Steffen KL, Arora R, Pelta JP (1989). Relative sensitivity of photosynthesis and respiration to freeze-thaw stress in herbaceous species. *Plant Physiol*, 89: 1372–1379
- Sukumaran NP, Weiser CJ (1972a). An excised leaflet test for evaluating potato frost tolerance. *HortScience*, 7: 467–468
- Sukumaran NP, Weiser CJ (1972b). Freezing injury in potato leaves. *Plant Physiol*, 50: 564–567
- Tu W, Zhao XJ, Kou S, Kang L, Chen L, Song BT (2015). Establishment and application of direct cold-resistance evaluation system for potato seedlings. *China Pot*, 29 (1): 1–7 (in Chinese with English abstract) [涂卫, 赵喜娟, 寇爽, 康黎, 陈琳, 宋波涛(2015). 马铃薯苗期抗寒能力直接评价体系的建立与应用. *中国马铃薯*, 29 (1): 1–7]
- Vega SE, Bamberg JB (1995). Screening the US potato collection for frost hardiness. *Am Pot J*, 72: 13–21
- Vega SE, Del Rio AH, Jung G, Bamberg JB, Palta JP (2003). Marker-assisted genetic analysis of non-acclimated freezing tolerance and cold acclimation capacity in a backcross *Solanum* population. *Am J Pot Res*, 80: 359–369
- Xin CH, Cai L, Xiao HH, Li N, Guo JB (2012). Influence of low temperature stress on the related physiological indexes in potato seedlings. *Guangdong Agric Sci*, 39 (22): 19–21 (in Chinese with English abstract) [辛翠花, 蔡禄, 肖欢欢, 李娜, 郭江波(2012). 低温胁迫对马铃薯幼苗相关生化指标的影响. *广东农业科学*, 39 (22): 19–21]
- Yang CY, Wang F, Wang J (2014). Effect of cold acclimation on semi-lethal temperature of potato. *Jiangsu J Agric Sci*, 42 (4):



- 80–81, 87 (in Chinese with English abstract) [杨超英, 王芳, 王舰(2014). 低温驯化对马铃薯半致死温度的影响. 江苏农业科学, 42 (4): 80–81, 87]
- Yang HJ, Guo HC (2017). Digital gene expression profiling analysis of potato under low temperature stress. *Acta Agron Sin*, 43 (3): 454–463 (in Chinese with English abstract) [杨慧菊, 郭华春(2017). 低温胁迫下马铃薯的数字基因表达谱分析. 作物学报, 43 (3): 454–463]

## Identification and evaluation of the freezing tolerance of major potato varieties in China

WEI Liang<sup>1,2</sup>, XU Jian-Fei<sup>1</sup>, BIAN Chun-Song<sup>1</sup>, DUAN Shao-Guang<sup>1</sup>, HU Jun<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, PANG Wan-Fu<sup>1</sup>, YU Zhuo<sup>2</sup>, JIN Li-Ping<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Tuber and Root Crops, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;* <sup>2</sup>*Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China*

**Abstract:** Freezing tolerance of 115 potato varieties were evaluated using Logistic equation based on electrolyte leakage of detached leaves from plantlets. The results showed that the semi-lethal temperature ( $LT_{50}$ ) of varieties ranged from  $-1.0$  to  $-4.1^{\circ}\text{C}$ , and four varieties of ‘Jinshu 2’, ‘Kexin 2’, ‘Zhengshu 5’ and ‘Zhengshu 6’ were below  $-3.5^{\circ}\text{C}$ , indicating that these varieties were with freezing tolerance. The cluster analysis based on values of their  $LT_{50}$  revealed that 115 varieties were divided into 3 groups of freezing sensitivity, medium freezing tolerance, and freezing tolerance, accounting for 29.6%, 55.7% and 14.7%, respectively. The experimental results were further verified by the results of frosting identification in field. The  $LT_{50}$  values of the experimental varieties were highly significantly correlated to the result of the field freezing ( $P<0.01$ ), and the correlation coefficient reached 0.9287. Comparative analysis showed that varieties had hardly cold acclimation capacity.

**Key words:** potato; freezing tolerance; semi-lethal temperature ( $LT_{50}$ )

Received 2017-03-08 Accepted 2017-05-15

This work was supported by China Agriculture Research System-Potato (Grant No. CARS-10).

\*Corresponding author (E-mail: jinliping@caas.cn).