

贮藏期影响不同品种马铃薯龙葵碱风险的主要环境因素

郑 旭, 刘佳萌*, 孙玉凤, 王珊珊, 赵 磊, 李敏敏, 卢 嘉, 黄亚涛, 范 蓓*
(农业农村部农产品质量安全收贮运管控重点实验室, 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

摘 要: **目的** 探究影响不同品种马铃薯在不同贮藏条件下龙葵碱含量的主要环境因素, 探讨马铃薯贮藏过程中龙葵碱含量的变化规律。**方法** 样品经乙酸-乙醇(1:10, *V/V*)混合溶剂提取后, 用甲醇复溶并稀释后, 采用高效液相色谱-三重四级杆串联质谱(high performance liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry, HPLC-QQQ-MS)测定马铃薯块茎中龙葵碱含量, 通过正交试验研究 8 个品种的马铃薯块茎在不同贮藏温度(5、15、25 °C)、相对湿度(55%、70%、85%)、贮藏时间(8、16、24 d)下龙葵碱含量的变化情况。**结果** 结果表明影响大西洋、新大坪、荷兰 15 号、夏波蒂与陇薯 3 号龙葵碱的贮藏主要环境因素为相对湿度; 威芋 5 号与冀张 12 号的主要环境因素为温度; 青薯 9 号品种的贮藏主要环境因素为时间。**结论** 建议针对不同品种马铃薯重点控制不同环境因素, 保障龙葵碱含量安全, 其中青薯 9 号不宜长期贮藏。

关键词: 贮藏因素; 马铃薯; 龙葵碱; α -茄碱; α -卡茄碱

Main environmental factors of solanum during storage for different potato varieties

ZHENG Xu, LIU Jia-Meng*, SUN Yu-Feng, WANG Shan-Shan, ZHAO Lei, LI Min-Min,
LU Jia, HUANG Ya-Tao, FAN Bei*

(Key Laboratory of Agro-products Quality and Safety Control in Storage and Transport Process, Ministry of Agriculture, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China)

ABSTRACT: Objective To explore the changes of solanine content in different potato varieties, and investigate the main environmental factors affecting the solanine during storage. **Methods** The samples were extracted with acetic acid: ethanol (1:10, *V/V*) mixed solvent, reconstituted with methanol and diluted, and then determined by high performance liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry (HPLC-QQQ-MS) to determine the content of solanine in potato tubers. The content of potato solanine was studied by orthogonal experiment at different

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1600901)、国家自然科学基金青年项目(31800005)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(13)、农业部财政专项项目(GJFP2018011)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFC1600901), National Natural Science Foundation of China (31800005), the Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution (13) and Ministry of Agriculture Finance Special (GJFP2018011)

***通讯作者:** 刘佳萌, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: ljiam88@163.com

范蓓, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: caasfanbei@163.com

***Corresponding author:** LIU Jia-Meng, Ph.D, Assistant Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China. E-mail: caasfanbei@163.com

FAN Bei, Ph.D, Associate Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China. E-mail: caasfanbei@163.com

storage temperatures (5, 15, 25 °C), relative humidity (55%, 70%, 85%), and storage time (8, 16, 24 d). **Results** The results showed that the main environmental factor of the storage of Daxiyang, Xindaping, Helan No.15, Xiabodi and Qishu No.3 was relative humidity; the main environmental factor of Weiyu No.5 and Jizhang No.12 was temperature; and the main environmental factor for the storage of Qingshu No.9 was time. **Conclusion** To guarantee the safety content of solanine, it is suggested that different varieties should be concerned more about their own main environmental factors during storage. In addition, Qingshu No. 9 is not suitable for long-term storage.

KEY WORDS: storage factors; potato, solanine; α - solanine; α -chaconine

1 引言

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是世界上仅次于小麦、水稻、玉米的第四大粮食作物^[1], 我国是世界上最大的马铃薯生产国, 种植面积和产量均居世界第 1 位^[2]。同时, 马铃薯兼具谷类和蔬菜的特性, 具有较高的营养价值^[3]。研究表明, 马铃薯块茎中含有一类有毒糖苷生物碱——龙葵碱^[4], 主要包括 α -茄碱和 α -卡茄碱, 约占马铃薯中龙葵碱总量的 95%^[5], 常作为研究龙葵碱含量变化趋势的指标。人、畜摄入一定量的龙葵碱会出现急性中毒症状, 严重时甚至危及生命^[6]。

马铃薯块茎的龙葵碱含量直接受外界贮藏环境的影响^[7,8]。当贮藏条件不当时, 其龙葵碱含量迅速上升, 产生安全隐患, 严重影响马铃薯产业的发展^[5]。在我国, 因贮藏不当导致龙葵碱含量上升而引起的马铃薯损失高达 15%–30%^[9], 龙葵碱含量上升一直以来都是制约马铃薯贮藏和加工技术研究的重要问题。

相关研究证明, 贮藏因素是影响块茎龙葵碱含量变化的重要因素之一^[10], 吴耘红等^[11]研究了马铃薯中龙葵碱含量与储藏时间及温度呈正相关。张薇等^[12]研究了光照、温度和贮藏时间对马铃薯龙葵碱含量的影响, 升高温度与增加光照强度均能刺激马铃薯块茎中 α -茄碱的合成, 其中光照影响更为显著。在实际生产中, 各不同品种马铃薯基本上使用同一贮藏条件贮藏, 在此条件下, 不同品种马铃薯龙葵碱含量上升量大有不同^[13]。实践表明, 统一的贮藏条件并不适用于不同品种马铃薯, 因此需对不同品种制定针对性的贮藏条件。

本试验通过正交实验设计, 研究贮藏温度、相对湿度及贮藏时间 3 种因素对 8 种马铃薯块茎中龙葵碱含量变化的影响, 为确定关键贮藏因素对不同品种马铃薯龙葵碱含量的影响提供了更加准确的依据, 也为指导不同品种马铃薯块茎精准贮藏条件的研究提供一定参考, 对生产中马铃薯贮藏具有指导意义。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

马铃薯: “新大坪”、“青薯 9 号”和“陇薯 3 号”3 个品种

采自马铃薯主产区甘肃省定西市; “荷兰 15 号”和“夏波蒂”2 个品种采自马铃薯主产区山东省潍坊市; “威芋 5 号”、“大西洋”和“冀张 12 号”3 个品种采自马铃薯主产区内蒙古乌兰察布市。原料于 2018 年 10 月收获后贮藏于 4 °C 冷库中备用。

α -茄碱标准品、 α -卡茄碱标品(纯度 99%, 美国 J&K 公司); 乙腈、甲醇(色谱纯, 美国 Fisher 公司); 乙酸、乙醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

2.2 仪器与设备

Agilent 1290 超高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); Agilent 6495 三重串联四级杆质谱, 配有电喷雾离子源及 Masshunter B.07.00 工作站及数据处理系统(美国 Agilent 公司); AL204 电子天平(美国梅特勒-托利多公司); TTL-DCII 氮吹仪(北京同泰科技发展有限公司); VX-III 多管涡旋振荡仪(美国安胜科技有限公司); LYNX6000 高速冷冻离心机(美国 Thermo Fisher 公司); Milli-Q 超纯水仪(美国 Millipore 公司); BIC-300 人工气候箱(上海博讯实业有限公司); KQ-600DV 超声仪(昆山舒美公司)。

2.3 试验方法

2.3.1 贮藏条件对龙葵碱含量影响的正交条件设计
将 8 种马铃薯清洗干净后, 挑选没有损伤与腐坏, 未发芽变绿, 且大小形状相近的作为样品, 放入人工气候箱中。设置不同温度(5、15、25 °C), 不同相对湿度(55%、70%、85%), 不同贮藏时间(8、16、24 d)。设计 3 因素 3 水平正交试验(表 1), 每个处理重复 6 次。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交试验设计表

Table 1 $L_9(3^4)$ orthogonal test design table

处理	贮藏温度 A/°C	相对湿度 B/%	贮藏时间 C/d
1	5	55	8
2	5	70	16
3	5	85	24
4	15	55	16
5	15	70	24
6	15	85	8
7	25	55	24
8	25	70	8
9	25	85	16

2.3.2 龙葵碱提取

将处理过的马铃薯样品清洗干净, 打碎匀浆。称取 5 g 样品, 加入 30 mL 提取液(乙酸:乙醇=1:10, $V:V$), 振荡提取 30 min, 离心处理(5000 r/min, 10 min), 取 0.5 mL 上清液进行氮吹。随后, 用 2 mL 甲醇复溶后再进行 10 倍稀释, 过 0.22 μm 有机滤膜备用。

2.3.3 龙葵碱含量测定

按照文献^[14]的方法进行测定, 利用超高效液相色谱—三重四级杆串联质谱(UPLC-QQQ)测定马铃薯块茎中 α -茄碱和 α -卡茄碱的含量。

液相色谱条件: Agilent poroshell120 EC- C_{18} 色谱柱 (2.1 mm $\times$ 50 mm, 2.7 μm); 流动相为 0.1%甲酸水溶液-乙腈 (70:30, $V:V$), 等度洗脱, 流速 0.3 mL/min, 进样量 1 μL 。

质谱条件: ESI 正离子多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)模式。毛细管电压(capillary): 3000 V; 干燥气温度(gas temp): 200 $^{\circ}\text{C}$; 干燥气流速(gas flow): 14 L/min; 雾化器压力(nebulizer): 20 psi; 雾化气和碰撞气分别为高纯氩气和高纯氮气。

3 结果与分析

3.1 标准曲线绘制

建立标准曲线(图 1, 图 2), α -茄碱和 α -卡茄碱标准溶液均在 62.5~2000 $\mu\text{g/L}$ 的范围内呈良好的线性关系, 相关系数(r^2)大于 0.999, 回归方程分别为 $Y = 5.336978 X + 289.399713$; $Y = 46.658382 X + 1503.441415$ 。

通过对经方法 2.3.2 处理的提取液进行逐级稀释, 得到 5 个马铃薯品种的定量限, 取最高值, 确定马铃薯中 α -茄碱和 α -卡茄碱的定量限均为 0.01 $\mu\text{g/kg}$ ($S/N=10$)。

3.2 马铃薯品种造成的龙葵碱含量差异

马铃薯块茎在 9 组处理下的 α -茄碱含量见表 2, α -卡茄碱含量见表 3, 龙葵碱含量见表 4。

由表 2 可知, 在各处理组相同贮藏条件下, 不同品种的马铃薯块茎 α -茄碱含量存在较大差异。威芋 5 号的初始含量最低, 在各处理组下的产生速率也较慢。青薯 9 号在 9 个处理下的含量相对较高, 虽然 α -茄碱初始含量低于大西洋品种, 但在处理 6 和处理 9 中, 青薯 9 号的 α -茄碱含

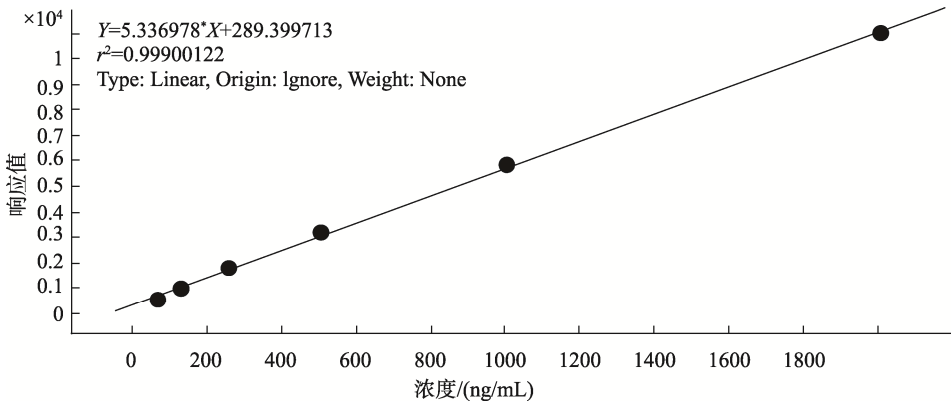


图 1 α -茄碱标准曲线图
Fig.1 Standard curve of α -solanine

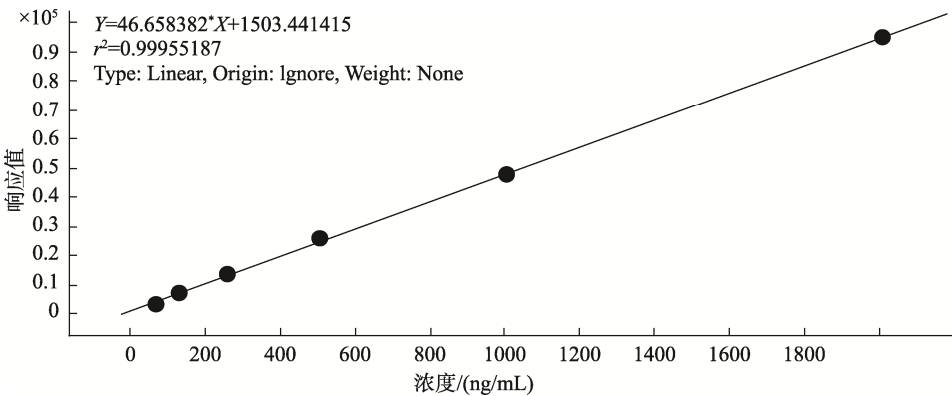


图 2 α -卡茄碱标准曲线图
Fig.2 Standard curve of α -chaconine

表 2 不同贮藏因素下 8 种马铃薯的 α -茄碱含量 (mg/kg)
Table 2 α -solanine content of 8 kinds of potatoes under different storage factors (mg/kg)

处理	威芋 5 号	新大坪	青薯 9 号	大西洋	夏波蒂	陇薯 3 号	冀张 12 号	荷兰 15 号
空白	4.63	4.61	12.21	40.76	21.89	14.69	9.46	24.85
1	4.11	4.58	32.35	26.53	13.71	14.11	8.25	11.11
2	7.87	11.03	61.28	63.58	26.61	33.16	11.28	32.16
3	3.79	26.37	37.06	44.4	34.07	22.61	16.41	26.91
4	14.38	16.31	54.17	52.91	25.53	22.34	20.6	26.27
5	22.35	31.43	63.79	80.17	45.31	25.84	35.7	34.25
6	4.52	15.04	54.16	48.87	25.61	21.81	7.41	28.29
7	14.67	60.64	35.65	42.63	38.32	15.48	15.96	36.67
8	9.57	27.13	37.22	40.39	30.21	31.53	20.93	29.46
9	22.56	25.37	57.2	41.57	23.85	22.31	35.56	34.69

量高于大西洋, 且在各处理组下都有接近大西洋的趋势。结果表明, 青薯 9 号更易生成 α -茄碱。相对于其他品种, 青薯 9 号中 α -茄碱受贮藏温度因素的影响较大。其次是夏波蒂和荷兰 15 号, 两者在贮藏过程中 α -茄碱含量升高较快。

由表 3 可知, 在各处理组相同贮藏条件下, 不同品种的马铃薯块茎 α -卡茄碱含量存在较大差异。威芋 5 的初始含量最低, 在不同贮藏条件下的产生速率也较慢。青薯 9 号在 9 个处理下的含量相对较高, 其次是陇薯 3 号。虽然青薯 9 号和陇薯 3 号的 α -卡茄碱初始含量低于大西洋, 但在处理 3 中, 两者 α -卡茄碱含量高于大西洋品种。结果说明青薯 9 号和陇薯 3 号的 α -卡茄碱更易受相对湿度和贮藏时间影响。

由表 4 可知, 在各处理组相同贮藏条件下, 不同品种

的马铃薯块茎中其龙葵碱含量总量存在较大差异。威芋 5 号龙葵碱初始含量最低, 在不同贮藏条件下的产生速率也较慢, 其次是新大坪、冀张 12 号。大西洋与青薯 9 号在 9 个处理下的含量均相对较高, 受环境因素影响更大。

3.3 不同贮藏条件和品种对龙葵碱含量的影响

各品种组内对 3 种因素分别做极差分析, 结果表明, 不同品种之间 α -茄碱含量存在较大差异(图 3)。由图 3 可知, 贮藏温度对青薯 9 号、威芋 5 号 2 个品种中 α -茄碱含量的影响作用最大; 贮藏相对湿度对新大坪、陇薯 3 号 2 个品种中 α -茄碱含量的影响作用最大; 贮藏时间对青薯 9 号中 α -茄碱含量的影响作用与温度相一致, 其极差相差不多。因此, 在本实验使用的马铃薯品种中, 大多数品种的 α -茄碱含量受相对湿度影响最大。

表 3 不同贮藏因素下 8 种马铃薯的 α -卡茄碱含量 (mg/kg)
Table 3 α -chaconine content of 8 kinds if potatoes under different storage factors (mg/kg)

处理	威芋 5 号	新大坪	青薯 9 号	大西洋	夏波蒂	陇薯 3 号	冀张 12 号	荷兰 15 号
空白	1.87	10.43	21.74	67.87	4.85	36.77	20.07	49.06
1	1.95	19.76	48.4	70.44	16.06	33.46	25.85	49.96
2	12.76	26.98	92.11	125.58	48.04	69.4	26.11	76.18
3	2.9	58.1	88.06	95.45	44.24	54.11	29.44	64.4
4	7.65	24.7	73.24	94.44	33.37	43.72	31.2	59.35
5	16.15	47.31	86.96	107.91	60.09	52.64	48.26	71.96
6	4.61	21.18	73.82	98.07	39.77	46.41	18.44	59.49
7	13.13	45.08	62.19	104.29	51.23	37.42	32.71	60.28
8	9.63	24.94	51.24	70.5	39.38	59.11	24.2	52.55
9	10.82	31.6	87.34	72.27	39.1	45.85	44.14	63.98

表 4 不同贮藏因素下 8 种马铃薯的龙葵碱含量 (mg/kg)
Table 4 Solanine content of 8 kinds of potatoes under different storage factors (mg/kg)

处理	威芋 5 号	新大坪	青薯 9 号	大西洋	夏波蒂	陇薯 3 号	冀张 12 号	荷兰 15 号
空白	6.5	15.04	33.95	108.63	26.74	51.46	29.53	73.91
1	6.06	24.34	80.75	96.97	29.77	47.57	34.1	61.07
2	20.63	38.01	153.39	189.16	74.65	102.56	37.39	108.34
3	6.69	84.47	125.12	139.85	78.31	76.72	45.85	91.31
4	22.03	41.01	127.41	147.35	58.9	66.06	51.8	85.62
5	38.5	78.74	150.75	188.08	105.4	78.48	83.96	106.21
6	9.13	36.22	127.98	146.94	65.38	68.22	25.85	87.78
7	27.8	105.72	97.84	146.92	89.55	52.9	48.67	96.95
8	19.2	52.07	88.46	110.89	69.59	90.64	45.13	82.01
9	33.38	56.97	144.54	113.84	62.95	68.16	79.7	98.67

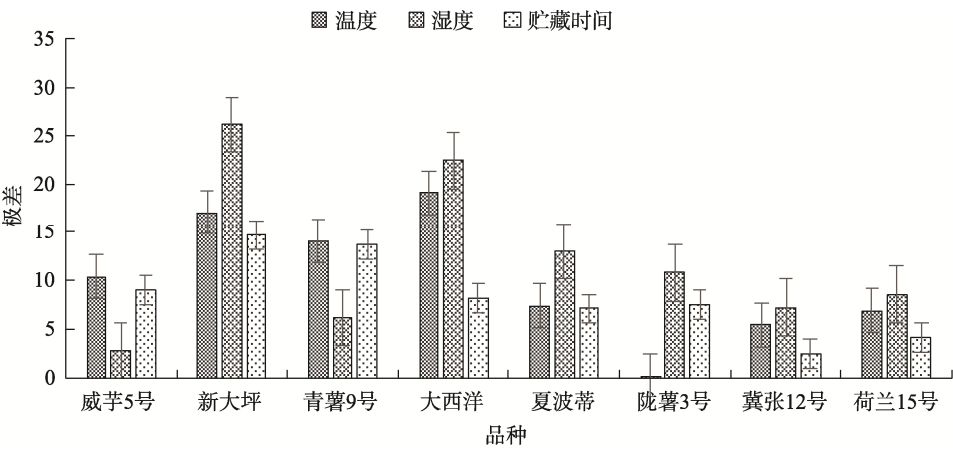


图 3 正交表中 8 个品种马铃薯在不同因素下 α-茄碱的极差(n=3)
Fig.3 Extreme difference of α-solanine in 8 varieties of potato under different factors in orthogonal table (n=3)

各品种组内对 3 种因素分别做极差分析, 结果表明不同品种之间 α-卡茄碱含量存在较大差异(图 4)。由图 4 知, 贮藏温度和贮藏时间对 α-卡茄碱含量没有较大影响; 贮藏相对湿度对 α-卡茄碱含量具有较大差异的品种为: 大西洋、新大坪、夏波蒂; 贮藏时间因素仅对青薯 9 号 α-卡茄碱含量有较大影响。因此, 在本实验使用的马铃薯品种中, α-卡茄碱含量的增加受贮藏温度与相对湿度影响更大, 贮藏温度越高、相对湿度越大, 其含量增长越多。

各品种组内对 3 种因素分别做极差分析, 结果表明, 不同品种之间龙葵碱总量存在较大差异(图 5)。由图 5 知, 贮藏温度对龙葵碱含量具有较大差异的品种为: 冀张 12 号; 贮藏相对湿度对龙葵碱含量具有较大差异的品种为: 大西洋、新大坪、夏波蒂、陇薯 3 号、荷兰 15 号; 贮藏时间仅对青薯 9 号有较大影响。

3 种贮藏因素对不同品种马铃薯中的 α-茄碱和 α-卡茄

碱产生不同的影响, 因此对各品种组内贮藏因素分别做方差分析, 以确定不同品种马铃薯贮藏过程中控制龙葵碱含量的主要环境因素。

3.4 不同品种马铃薯贮藏条件正交实验结果

不同贮藏温度、相对湿度和贮藏时间对 8 个品种马铃薯龙葵碱含量的影响如表 5~表 12 所示, 经 R1、R2、R3 比较, 贮藏温度、相对湿度和贮藏时间对 α-茄碱、α-卡茄碱含量影响的程度存在较大差异。

根据表 5、表 6 正交试验数据可知, 影响大西洋、夏波蒂 2 个品种 α-茄碱、α-卡茄碱及龙葵碱总量的因素主次顺序一致, 均为: 相对湿度 > 贮藏温度 > 贮藏时间, 最佳水平为 A1B3C3。由最佳水平可知, 随着贮藏时间的增长, 大西洋、夏波蒂 2 个品种马铃薯中龙葵碱含量受相对湿度的影响最大。因此, 在贮藏过程中, 影响大西洋、夏波蒂龙葵碱含量的主要环境因素为相对湿度。

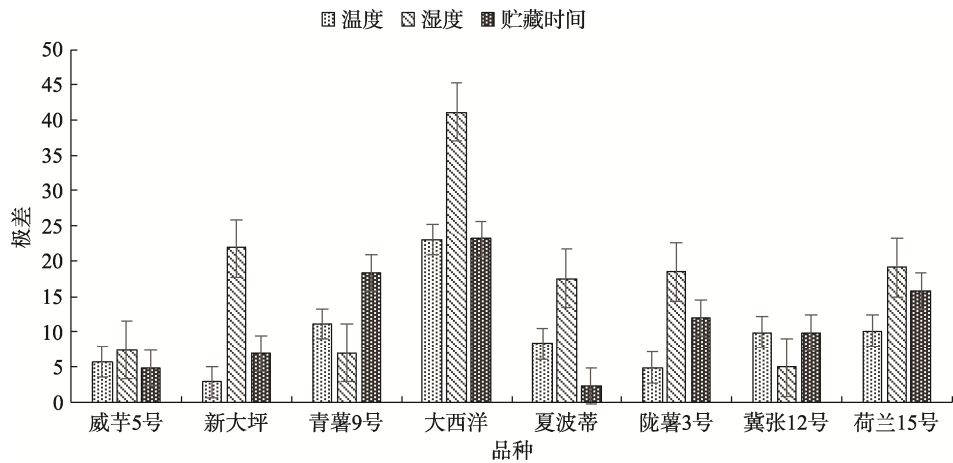


图 4 正交表中 8 个品种马铃薯在不同因素下的 α -卡茄碱的极差($n=3$)

Fig.4 Extreme difference of α -chaconine in 8 varieties of potato under different factors in orthogonal table ($n=3$)

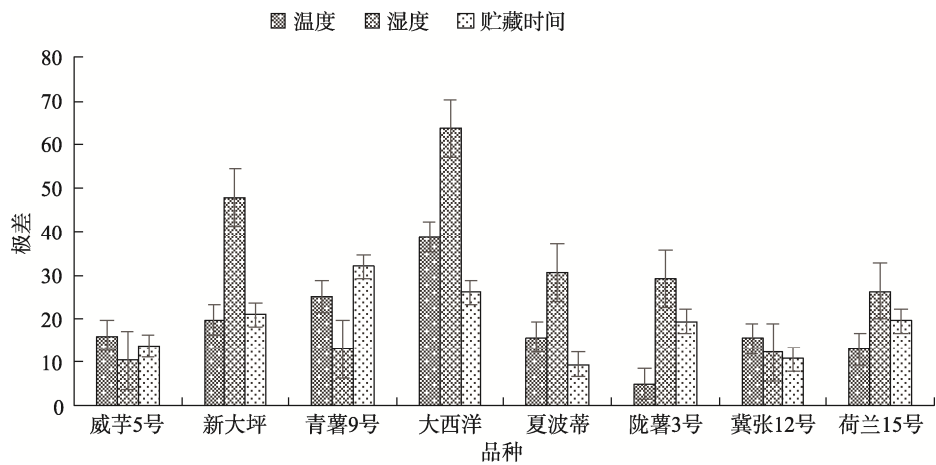


图 5 正交表中 8 个品种马铃薯在不同因素下的龙葵碱的极差($n=3$)

Fig.5 Extreme difference of solanine in 8 varieties of potato under different factors in the orthogonal table ($n=3$)

表 5 大西洋马铃薯贮藏条件的正交实验结果

Table 5 Orthogonal experimental results of storage conditions of Daxiayang potatoes

因素	温度/℃	相对湿度/%	贮藏时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	44.4	95.45	139.85	1.69
2	5	70	16	63.58	125.58	189.16	0.62
3	5	85	24	26.53	10.44	36.97	1.92
4	15	55	16	52.91	94.44	147.35	3.54
5	15	70	24	80.17	107.91	188.08	4.31
6	15	85	8	48.87	98.07	146.94	1.21
7	25	55	24	42.63	104.29	146.92	3.59
8	25	70	8	40.39	70.5	110.89	2.27
9	25	85	16	41.57	72.27	113.84	2.08
K1	44.84	46.65	44.55				
K2	60.65	61.38	52.69				
K3	41.53	38.99	49.78				
R1	19.12	22.39	8.13				

续表 5

因素	温度/℃	相对湿度/%	贮藏时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
K1'	77.16	98.06	88.01				
K2'	100.14	101.33	97.43				
K3'	82.35	60.26	74.21				
R2	22.98	41.07	23.22				
k1	121.99	144.71	132.56				
k2	160.79	162.71	150.12				
k3	123.88	99.25	123.99				
R3	38.80	63.46	26.13				
k1'	1.41	2.94	1.72				
k2'	3.02	2.40	2.08				
k3'	2.65	1.74	3.27				
R4	1.61	1.20	1.55				

注: K1、K2、K3 对应 α -茄碱含量在不同温度、相对湿度与和贮藏时间下的指标, R1 为对应的极差值; K1'、K2'、K3'对应 α -卡茄碱含量在不同温度、相对湿度与和贮藏时间下的指标, R2 为对应的极差值; k1、k2、k3 对应龙葵碱总含量在不同温度、相对湿度与和贮藏时间下的指标, R3 为对应的极差值; k1'、k2'、k3'对应失重率含量在不同温度、相对湿度与和贮藏时间下的指标, R4 为对应的极差值。

表 6 夏波蒂马铃薯贮藏条件的正交实验结果
Table 6 Orthogonal experimental results of the storage conditions of Xiabodi

因素	温度/℃	相对湿度/%	贮藏时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	34.07	44.24	78.31	2.13
2	5	70	16	26.61	48.04	74.65	0.52
3	5	85	24	13.71	16.06	29.77	2.01
4	15	55	16	25.53	33.37	58.90	3.43
5	15	70	24	45.31	60.09	105.40	3.70
6	15	85	8	25.61	39.77	65.38	1.10
7	25	55	24	38.32	51.23	89.55	7.65
8	25	70	8	30.21	39.38	69.59	2.50
9	25	85	16	23.85	39.1	62.95	1.84
K1	24.80	32.64	29.96				
K2	32.15	34.04	25.33				
K3	30.79	21.06	32.45				
R1	7.35	12.99	7.12				
K1'	36.11	42.95	41.13				
K2'	44.41	49.17	40.17				
K3'	43.24	31.64	42.46				
R2	8.30	17.53	2.29				
k1	60.91	75.59	71.09				
k2	76.56	83.21	65.50				
k3	74.03	52.70	74.91				
R3	15.65	30.51	9.41				
k1'	1.55	4.40	1.91				
k2'	2.74	2.24	1.93				
k3'	3.99	1.65	4.45				
R4	2.44	2.75	2.54				

根据表 7、表 8 和表 9 正交试验数据可知,影响新大坪、荷兰 15 号、陇薯 3 号 3 个品种马铃薯 α -茄碱、 α -卡茄碱及龙葵碱总量的因素主次顺序一致,均为:相对湿度 > 贮藏时间 > 贮藏温度,最佳水平为 A2B3C2。由最佳水平可知,新大坪、荷兰 15 号、陇薯 3 号马铃薯中龙葵碱含量受贮藏相对湿度的影响最大,随着贮藏时间的增长,3 个品种马铃薯龙葵碱含量成上升趋势。由此可知,在贮藏过程中,影响新大坪、荷兰 15 号、陇薯 3 号龙葵碱含量的主要环境因素为相对湿度。

根据表 10 正交试验数据可知,影响威芋 5 号马铃薯 α -茄碱含量的因素主次顺序为:贮藏温度 > 贮藏时间 > 相对湿度,最佳水平为 A1B3C1;影响 α -卡茄碱含量的因素主次顺序为:相对湿度 > 贮藏温度 > 贮藏时间,最佳水平为 A1B3C3;影响龙葵碱含量的因素主次顺序为:贮藏温度 > 贮藏时间 > 相对湿度,最佳水平为 A1B3C1。由最佳水平可知,威芋 5 号马铃薯中龙葵碱含量受贮藏温度的影响最大,因此,在贮藏过程中,影响威芋 5 号龙葵碱含量的主要环境因素为温度。

表 7 新大坪马铃薯贮藏条件的正交实验结果
Table 7 Orthogonal experimental results of storage conditions of Xindaping

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	46.37	58.1	104.47	1.34
2	5	70	16	11.03	26.98	38.01	1.77
3	5	85	24	4.58	9.76	14.34	2.12
4	15	55	16	16.31	24.7	41.01	5.56
5	15	70	24	31.43	47.31	78.74	8.84
6	15	85	8	15.04	21.18	36.22	3.17
7	25	55	24	60.64	45.08	105.72	6.90
8	25	70	8	27.13	24.94	52.07	5.96
9	25	85	16	25.37	31.6	56.97	3.77
K1	20.66	41.11	29.51				
K2	20.93	23.20	17.57				
K3	37.71	15.00	32.22				
R1	17.05	26.11	14.65				
K1'	31.61	42.63	34.74				
K2'	31.06	33.08	27.76				
K3'	33.87	20.85	34.05				
R2	2.81	21.78	6.98				
k1	52.27	83.73	64.25				
k2	51.99	56.27	45.33				
k3	71.59	35.84	66.27				
R3	19.60	47.89	20.94				
k1'	1.74	4.60	3.49				
k2'	5.86	5.52	3.70				
k3'	5.54	3.02	5.95				
R4	4.12	2.50	2.46				

表 8 荷兰 15 号马铃薯贮藏条件的正交实验结果
Table 8 Orthogonal experimental results of storage conditions of Helan No. 15

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	36.91	64.4	101.31	2.12
2	5	70	16	32.16	76.18	108.34	0.82
3	5	85	24	11.11	19.96	31.07	1.53
4	15	55	16	26.27	59.35	85.62	3.55
5	15	70	24	34.25	71.96	106.21	2.81
6	15	85	8	28.29	59.49	87.78	1.49
7	25	55	24	36.67	60.28	96.95	7.59
8	25	70	8	29.46	52.55	82.01	3.18
9	25	85	16	34.69	63.98	98.67	2.18
K1	26.73	33.28	31.55				
K2	29.60	31.96	31.04				
K3	33.61	24.70	27.34				
R1	6.88	8.59	4.21				
K1'	53.51	61.34	58.81				
K2'	63.60	66.90	66.50				
K3'	58.94	47.81	50.73				
R2	10.09	19.09	15.77				
k1	80.24	94.63	90.37				
k2	93.20	98.85	97.54				
k3	92.54	72.51	78.08				
R3	12.96	26.35	19.47				
k1'	1.49	4.42	2.26				
k2'	2.62	2.27	2.18				
k3'	4.32	1.73	3.98				
R4	2.83	2.69	1.80				

表 9 陇薯 3 号马铃薯贮藏条件的正交实验结果
Table 9 Orthogonal experimental results of storage conditions of Longshu NO.3

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	22.61	54.11	76.72	1.73
2	5	70	16	33.16	69.4	102.56	0.62
3	5	85	24	14.11	33.46	47.57	0.96
4	15	55	16	22.34	43.72	66.06	1.48
5	15	70	24	25.84	52.64	78.48	3.70
6	15	85	8	21.81	46.41	68.22	1.37
7	25	55	24	15.48	37.42	52.90	3.85
8	25	70	8	31.53	59.11	90.64	2.03
9	25	85	16	22.31	45.85	68.16	0.89
K1	23.29	20.14	25.32				
K2	23.33	30.18	25.94				

续表 9

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
K3	23.11	19.41	18.48				
R1	0.22	10.77	7.46				
K1'	52.32	45.08	53.21				
K2'	47.59	60.38	52.99				
K3'	47.46	41.91	41.17				
R2	4.86	18.48	12.04				
k1	75.62	65.23	78.53				
k2	70.92	90.56	78.93				
k3	70.57	61.32	59.65				
R3	5.05	29.24	19.28				
k1'	1.10	2.35	1.71				
k2'	2.18	2.12	1.00				
k3'	2.26	1.07	2.82				
R4	1.16	1.28	1.82				

表 10 威芋 5 号马铃薯贮藏条件的正交实验结果

Table 10 Orthogonal experimental results of storage conditions of Weiyu NO.5

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	3.79	2.9	6.69	1.92
2	5	70	16	7.87	12.76	20.63	0.95
3	5	85	24	4.11	0.95	5.06	2.94
4	15	55	16	14.38	7.65	22.03	4.16
5	15	70	24	22.35	16.15	38.50	6.08
6	15	85	8	4.52	4.61	9.13	1.42
7	25	55	24	14.67	13.13	27.80	8.24
8	25	70	8	9.57	9.63	19.20	2.92
9	25	85	16	22.56	10.82	33.38	3.00
K1	5.26	10.95	5.96				
K2	13.75	13.26	14.94				
K3	15.60	10.40	13.71				
R1	10.34	2.87	8.98				
K1'	5.54	7.89	5.71				
K2'	9.47	12.85	10.41				
K3'	11.19	5.46	10.08				
R2	5.66	7.39	4.70				
k1	10.79	18.84	11.67				
k2	23.22	26.11	25.35				
k3	26.79	15.86	23.79				
R3	16.00	10.25	13.67				
k1'	1.94	4.77	2.09				
k2'	3.89	3.32	2.70				
k3'	4.72	2.45	5.75				
R4	2.78	2.32	3.66				

根据表 11 正交试验数据可知, 影响冀张 12 号马铃薯 α -茄碱含量的因素主次顺序为: 贮藏温度 > 相对湿度 > 贮藏时间, 最佳水平为 A1B3C1; 影响 α -卡茄碱含量的因素主次顺序为: 相对湿度 > 贮藏温度 > 贮藏时间, 最佳水平为 A1B3C3; 影响龙葵碱含量的因素主次顺序为: 贮藏温度 > 相对湿度 > 贮藏时间, 最佳水平为 A1B3C1。因此, 在贮藏过程中, 影响冀张 12 号龙葵碱含量的主要环境因素为温度。

根据表 12 正交试验数据可知, 影响青薯 9 号马铃薯

α -茄碱含量的因素主次顺序为: 贮藏温度 > 贮藏时间 > 相对湿度, 最佳水平为 A1B3C1; 影响 α -卡茄碱含量的因素主次顺序为: 贮藏时间 > 贮藏温度 > 相对湿度, 最佳水平为 A3B3C3; 影响龙葵碱含量的因素主次顺序为: 贮藏时间 > 贮藏温度 > 相对湿度, 最佳水平为 A3B3C3。由最佳水平可知, 随着贮藏时间的增长, 青薯 9 号龙葵碱含量持续增长, 影响食用安全性。因此, 在贮藏过程中, 影响青薯 9 号龙葵碱含量的主要环境因素为时间, 不宜长期贮藏。

表 11 冀张 12 号马铃薯贮藏条件的正交实验结果
Table 11 Orthogonal experimental results of storage conditions of Jizhang NO. 12

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	36.41	29.44	65.85	2.30
2	5	70	16	11.28	26.11	37.39	1.67
3	5	85	24	8.25	15.85	24.10	2.99
4	15	55	16	20.6	31.2	51.80	4.77
5	15	70	24	35.7	48.26	83.96	6.76
6	15	85	8	7.41	18.44	25.85	2.31
7	25	55	24	15.96	32.71	48.67	3.90
8	25	70	8	20.93	24.2	45.13	4.25
9	25	85	16	35.56	44.14	79.70	3.00
K1	18.65	24.32	21.58				
K2	21.24	22.64	22.48				
K3	24.15	17.07	19.97				
R1	5.50	7.25	2.51				
K1'	23.80	31.12	24.03				
K2'	32.63	32.86	33.82				
K3'	33.68	26.14	32.27				
R2	9.88	4.97	9.79				
k1	42.45	55.44	45.61				
k2	53.87	55.49	56.30				
k3	57.83	43.22	52.24				
R3	15.39	12.28	10.69				
k1'	2.32	3.66	2.95				
k2'	4.61	4.23	3.15				
k3'	3.72	2.77	4.55				
R4	2.29	1.46	1.60				

表 12 青薯 9 号马铃薯贮藏条件的正交实验结果
Table 12 Orthogonal experimental results of storage conditions of Qingshu NO.9

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
1	5	55	8	67.06	88.06	155.12	2.34
2	5	70	16	61.28	92.11	153.39	0.28
3	5	85	24	32.35	48.4	80.75	1.12
4	15	55	16	54.17	73.24	127.41	1.73
5	15	70	24	63.79	86.96	150.75	2.59

续表 12

因素	温度/℃	相对湿度/%	时间/d	指标			
				α -茄碱/(mg/kg)	α -卡茄碱/(mg/kg)	龙葵碱含量/(mg/kg)	失重率/g
6	15	85	8	54.16	73.82	127.98	1.30
7	25	55	24	35.65	62.19	97.84	2.72
8	25	70	8	37.22	51.24	88.46	2.14
9	25	85	16	57.2	87.34	144.54	1.12
K1	53.56	52.29	52.81				
K2	57.37	54.10	57.55				
K3	43.36	47.90	43.93				
R1	14.02	6.19	13.62				
K1'	76.19	74.50	71.04				
K2'	78.01	76.77	84.23				
K3'	66.92	69.85	65.85				
R2	11.08	6.92	18.38				
k1	129.75	126.79	123.85				
k2	135.38	130.87	141.78				
k3	110.28	117.76	109.78				
R3	25.10	13.11	32.00				
k1'	1.25	2.26	1.93				
k2'	1.87	2.36	1.04				
k3'	1.99	1.18	2.14				
R4	0.74	1.18	1.10				

4 讨 论

马铃薯块茎中龙葵碱含量与其贮藏温度、相对湿度及贮藏时间密切相关。本研究运用液质联用技术和正交设计方法探讨了随着储藏时间延长,贮藏温度、相对湿度等因素对不同品种马铃薯龙葵碱含量的影响,以探究贮藏期影响不同品种马铃薯龙葵碱含量的主要环境因素。

本试验中处理组 3 的低温高湿条件能够较好地控制马铃薯龙葵碱含量的升高,这与环境因素对马铃薯龙葵碱含量影响的相关研究结果相一致^[15]。前人研究结果表明,高温会打破马铃薯休眠期,增强代谢活动,从而快速产生 α -茄碱和 α -卡茄碱^[16];高相对湿度影响其代谢作用,从而对龙葵碱的合成产生影响^[17]。说明贮藏温度与相对湿度是影响龙葵碱含量变化的重要因素,同时也是马铃薯贮藏的主要环境因素。

马铃薯的品种(基因型)会对植株生长代谢产生影响。赵丹青等^[18]对同一生长条件下 3 个不同品种马铃薯 α -茄碱含量的差异进行了研究,结果表明 α -茄碱含量存在明显的种间差异性。本试验结果也证实,在相同的贮藏条件下,各品种马铃薯龙葵碱增长量不同,显示出了品种间龙葵碱产生速率的差异性。威芋 5 号龙葵碱初始含量最低,在各处理下的增长量也相对较低,龙葵碱产生速率较慢。大西

洋品种龙葵碱初始含量高,在各处理下的增长量相对较高。大西洋、夏波蒂、新大坪、荷兰 15 号、笼薯 3 号 5 个品种中,不同因素对 α -茄碱和 α -卡茄碱的含量增长影响一致。威芋 5 号、冀张 12 号和青薯 9 号 3 个品种中,不同因素对 α -卡茄碱的含量增长的影响高于对 α -茄碱的影响。前期研究表明,食用后 α -卡茄碱毒性高于 α -茄碱毒性^[19],因此,在贮藏过程中威芋 5 号、冀张 12 号和青薯 9 号 3 个品种需重点控制影响 α -卡茄碱含量的贮藏条件。

本试验对不同品种马铃薯块茎的龙葵碱含量差异进行了分析,表明了同一贮藏因素对不同品种马铃薯的影响作用不同。方差分析表明,贮藏时间对青薯 9 号龙葵碱含量影响最大,不适宜长期贮藏;相对湿度对新大坪龙葵碱含量影响最大;温度对本实验 8 个品种马铃薯龙葵碱含量影响差异不大。

5 结 论

不同贮藏因素对不同品种马铃薯龙葵碱含量的诱导程度不同,为保证马铃薯食用安全,应针对控制贮藏条件对不同品种马铃薯进行精准贮藏。通过研究不同贮藏因素对 8 个品种马铃薯龙葵碱含量的影响,初步探索出影响贮藏期不同品种马铃薯龙葵碱的主要环境因素,大西洋、新大坪、荷兰 15 号、夏波蒂与陇薯 3 号的贮藏主要环境因素

为相对湿度;威芋5号与冀张12号的主要环境因素为温度;青薯9号的贮藏主要环境因素为时间,不建议长期贮藏。这为进一步实现实际生产中马铃薯贮藏期质量安全精准控制奠定基础。

参考文献

- [1] 盛万民. 中国马铃薯品质现状及改良对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(3): 166–170.
Sheng WM. Progress of research on potato molecular breeding for qualities [J]. Chin Agric Sci Bull, 2006, 22(3): 166–170.
- [2] 李文华, 吕典秋, 闵凡祥. 中国、荷兰和比利时马铃薯生产概况对比分析[J]. 中国马铃薯, 2018, 1(32): 54–59.
Li WH, Lv DQ, Min FX. Comparative analysis of potato among China, Holland and Belgium [J]. Chin Potato J, 2018, 1(32): 54–59.
- [3] Pınar Ö, Hatice BM. Patates işleme endüstrisi yan ürünleri ve hayvan beslemede değerlendirilmesi [J]. Türk Tarım-Gıda Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 2017, 5(1): 93–97.
- [4] Coxon DT, Price KR, Jones PG. A simplified method for the determination of total glycoalkaloids in potato tuber [J]. J Sci Food Agr, 2006, 30(11): 1043–1049.
- [5] 杨亮, 高荣, 陈朗, 等. 储藏条件对马铃薯块茎肉质部分 α -茄碱含量的影响[J]. 作物研究, 2012, 26(5): 478–481.
Yang L, Gao R, Chen L. *et al.* Effect of different storage conditions on α -solanine content in fleshy part of potato tuber [J]. Crop Res, 2012, 26(5): 478–481.
- [6] 王旺田, 张金文, 白江平, 等. 马铃薯糖苷生物碱研究进展[J]. 分子植物育种, 2017, 14(2): 744–749.
Wang WT, Zhang JW, Bai JP, *et al.* The research advances in glycoalkaloids of potato [J]. Mole Plant Breed, 2017, 14(2): 744–749.
- [7] Romanucci V, Di-Fabio G, Di-Marino C, *et al.* Evaluation of new strategies to reduce the total content of α -solanine and α -chaconine in potatoes [J]. Phytochem Lett, 2018, 23: 116–119.
- [8] Şengül M, Keleş F, Keleş MS. The effect of storage conditions (temperature, light, time) and variety on the glycoalkaloid content of potato tubers and sprouts [J]. Food Control, 2004, 15(4): 281–286.
- [9] 李利平. 马铃薯安全贮藏技术[J]. 甘肃农业, 2015, 1: 33.
Li LP. Potato safe storage technology [J]. Gansu Agric, 2015, 1: 33.
- [10] 田甲春, 田世龙, 葛霞, 等. 马铃薯贮藏技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2017, 4: 108–112.
Tian JC, Tian SL, Ge X, *et al.* Research advances on storage technology of potato [J]. Stor Process, 2017, 4: 108–112.
- [11] 吴耘红, 江成英, 王拓一. 储藏条件对马铃薯渣中龙葵素含量影响的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2008, 7: 144–146.
Wu GH, Jiang CY, Wang TY. Study on the effects of storage condition on the solanine content of potato pulp [J]. Acad Period Farm Prod Process, 2008, 7: 144–146.
- [12] 张薇, 邱成, 高荣. 不同贮藏条件下马铃薯块茎皮中龙葵素含量的变化[J]. 中国马铃薯, 2013, (3): 144–147.
Zhang W, Qiu C, Gao R. Content of solanine in tuber peel of potato

(*Solanum tuberosum* L.) under different storage conditions [J]. Chin Potato J, 2013, (3): 144–147.

- [13] Rytel E, Tajner-Czopek A, Aniołowska M, *et al.* The influence of French fries processing on the glycoalkaloid content in coloured-fleshed potatoes [J]. Eur Food Res Technol, 2014, 238(6): 895–904.
- [14] 戴超, 郑鹭飞, 刘佳萌, 等. 液质联用法分析贮藏因素对马铃薯中 α -茄碱含量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2200–2205.
Dai C, Zheng LF, Liu JM, *et al.* Effect of Storage factors on the α -solanine content of potato tubers using liquid chromatography-mass spectrometry [J]. J Nucl Agric Sci, 2017, 31(11): 2200–2205.
- [15] Petersson EV, Arif U, Schulzova V, *et al.* Glycoalkaloid and calystegine levels in table potato cultivars subjected to wounding, light, and heat treatments [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(24): 5893–5902.
- [16] Zitnak A. The occurrence and distribution of free alkaloid solanidine in netted gem potatoes [J]. Canad J Biochem Physiol, 1961, 39(8): 1257–1265.
- [17] 白金美. 马铃薯保鲜预藏技术要点[J]. 致富天地, 2013, (11): 60.
Bai JM. Technical points for preserving potatoes [J]. Rich World, 2013, (11): 60.
- [18] 赵丹青, 张锋锋, 吴燕, 等. 宁夏不同地区不同品种马铃薯中龙葵碱在不同生长期的积累含量测定[J]. 中国野生植物资源, 2017, 36(6): 29–31.
Zhao DQ, Zhang FF, Wu Y, *et al.* Quantitative determination of solanine in potato in different growing periods in different areas of Ningxia [J]. Chin Wild Plant Res, 2017, 36(6): 29–31.
- [19] Laus MC, Klip G, Giuseppin MLF. Improved Extraction and sample cleanup of tri-glycoalkaloids α -solanine and α -chaconine in non-denatured potato protein isolates [J]. Food Anal Method, 2016, 10(4): 1–9.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



郑旭, 硕士, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: caaszhengxu@163.com



刘佳萌, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。

E-mail: ljiam88@163.com



范蓓, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。

E-mail: caasfanbei@163.com