

贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子活力及抗脂质过氧化的影响

赵 鹏, 郝丽珍*, 庞 杰, 张轶婷, 张凤兰, 杨忠仁

(内蒙古农业大学农学院, 内蒙古自治区野生特有蔬菜种质资源与种质创新重点实验室, 呼和浩特 010019)

摘 要: 以沙芥种子(含水量 4.5%)和斧形沙芥种子(含水量 4.3%)为材料, 采用硅胶干燥法将其含水量分别降至 3.1%、2.2%、1.3%, 在 50、35 和 20 °C 条件下密闭贮藏 1 年, 研究温度对种子活力及抗脂质过氧化的影响, 为种子老化及贮藏研究提供理论参考。结果表明, 沙芥和斧形沙芥种子在 50、35 和 20 °C 下贮藏 1 年, 其贮藏最佳含水量范围随贮藏温度的下降而变宽, 沙芥种子由 4.5%~3.1% 变为 4.5%~2.2%, 而斧形沙芥则从 4.3%~2.2% 变为 4.3%~1.3%; 种子活力的劣变先于发芽率的降低, 随着含水量的降低, 贮藏后种子的相对电导率有不同程度的增加, 且以初始含水量(对照)种子的萌发、活力和生物膜完整性保持最好, 斧形沙芥种子贮藏的最佳含水量范围和抗老化能力大于沙芥种子; 贮藏过程加剧了种子 O₂ 的产生和 MDA 含量的积累, 其中以 35 °C 贮藏后积累最少; CAT、GPX、APX 贮藏后活性保持良好且受贮藏温度的影响; 本试验表明, 贮藏的最佳条件为 35 °C, 沙芥种子含水量为 4.5%, 斧形沙芥种子为 4.3%。

关键词: 沙芥; 斧形沙芥; 贮藏温度; 超干种子; 脂质过氧化

中图分类号: S 649

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 06-1185-10

Effects of Storage Temperature and Ultradrying Treatment on Vigor and Anti-lipid-peroxidation of *Pugionium* Seed

ZHAO Peng, HAO Li-zhen*, PANG Jie, ZHANG Yi-ting, ZHANG Feng-lan, and YANG Zhong-ren
(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University; Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Wild Peculiar Vegetable Germplasm Resource and Germplasm Enhancement, Huhhot 010019, China)

Abstract: The effects of storage temperature on vigor and anti-lipid-peroxidation of ultradried seeds of *Pugionium* Gaertn. were studied by reducing the moisture content of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. and *Pugionium dolabratum* Maxim to 3.1%, 2.2%, 1.3% from the initial content respectively by silica gel, and aged at 50 °C, 35 °C and 20 °C for 1 year, which would provide theoretical basis for aging and storage of the seeds. The results indicated that there were optimum moisture content of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. seeds stored at 50 °C, 35 °C and 20 °C, and the contents of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. seeds increased from 4.5% - 3.1% and 4.3% - 2.2% to 4.5% - 2.2% and 4.3% - 1.3% with the declining of the temperature respectively. The deterioration of the seed

收稿日期: 2013-01-29; **修回日期:** 2013-03-29

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203004); 国家自然科学基金项目(31160393, 30860174, 30260067); 内蒙古自治区科技攻关项目(20050305, 20060202); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2011BS0305, 20080404MS0305)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: haolizhen@public.hh.nm.cn)

vigor occurred earlier than germination percentage reduction significantly. After aging treatment, relative electrical conductivity of the seeds increased when the content decreased, and seed germination, vigor and the integrity of cell membranes of the seeds with initial moisture content (CK) were the best in all ultradried seeds. The range of optimum moisture contents and the ability of resisting aging of *P. dolabratum* Maxim. seeds were greater than *P. cornutum* (L.) Gaertn. seeds. The generation of superoxide generation rate (O_2^-) and accumulation of malondialdehyde (MDA) were promoted in storage process, and the influence was the lowest at 35 °C. The activities of CAT, GPX, APX of the two specie seeds were still retained, which affected by stored temperature. Under the experimental conditions, the optimal conditions of storage were suggested that the optimum moisture content of *P. cornutum* (L.) Gaertn. and *P. dolabratum* Maxim. seeds are 4.5% and 4.3% respectively at 35 °C.

Keywords: *P. cornutum* (L.) Gaertn.; *P. dolabratum* Maxim.; store temperature; ultradried seed; lipid-peroxidation

贮藏温度和种子含水量是影响种子保持活力的关键因素, 超干贮藏技术正是基于这两因素间的互补关系所形成的便捷、实用、低成本的种子保存方法(汪晓峰等, 2001)。前人对芝麻(Ellis et al., 1986)、洋葱(Ellis & Hong, 1996; 朱诚等, 2001)、番茄(张海英等, 2002)等的研究证实适宜的超干处理对种子的萌发和活力并无损伤, 能够显著提高种子的贮藏性, 但不同的植物种子最佳贮藏温度和含水量存在差异(郑晓鹰等, 2001), 且种子超干贮藏的最佳含水量范围在不同温度下并不相同, 当种子脱水至贮藏最佳含水量以下时, 会加速种子的劣变(沈镛和漆小泉, 1996; 胡承莲等, 1999; 朱诚等, 2001; 韩玉竹等, 2011)。种子在贮藏过程中, 自由基的攻击引起膜脂过氧化作用的发生, 使活性氧积累增加、抗氧化酶活性降低、膜脂过氧化程度加深、丙二醛含量升高, 从而加速种子老化裂变(朱萍等, 2011), 而Lehner等(2008)研究老化处理的小麦种子, 发现种子在老化过程中没有发生膜脂过氧化作用, 并认为种子内部的氧化反应主要取决于种子的含水量。

沙芥属(*Pugionium* Gaertn.)是亚洲中部蒙古高原沙地的特有属, 包含沙芥[*Pugionium cornutum* (L.) Gaertn.]和斧形沙芥(*Pugionium dolabratum* Maxim.)两个种(赵一之, 1999), 是具有较高开发利用价值的绿色沙生蔬菜(郝丽珍等, 2005; 张凤兰等, 2006)。该属植物以种子繁殖为主, 但由于掠夺式采挖及过度放牧, 使野生种群分布越来越少, 濒于灭绝。因此如何长期保存沙芥属蔬菜种子成为其资源保存的关键。且沙芥属蔬菜种子因其生长环境的特殊性、种子成分差异等, 探究其种子超干贮藏过程的脂质过氧化作用对种子保存的意义巨大。本试验旨在探求贮藏过程中活力及抗脂质过氧化的变化, 找出超干种子在贮藏过程中最佳含水量范围与贮藏温度, 并从种子活力、生物膜、抗氧化酶系统等角度, 探讨种子超干后抗老化作用的机理, 探索适宜的贮藏条件, 为沙芥属蔬菜种子保存提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

沙芥[*Pugionium cornutum* (L.) Gaertn.]种子(含水量4.5%, 千粒质量 $31.1\text{ g} \pm 0.79\text{ g}$)和斧形沙芥(*Pugionium dolabratum* Maxim.)种子(含水量4.3%, 千粒质量 $7.9\text{ g} \pm 0.24\text{ g}$)均为2008年采自鄂尔多斯市, 采后贮藏于-20 °C冰箱。试验于2009年3月开始在内蒙古农业大学农学院, 内蒙古野生特有蔬菜种质资源与种质创新重点实验室进行。

1.2 超干处理与贮藏

采用室温硅胶干燥法。种子置于尼龙网袋, 埋于干燥器内硅胶中, 硅胶与种子质量比为 10:1, 25 °C 恒温下脱水干燥, 每天更换经 120 °C 充分干燥后冷却的硅胶。每隔一定时间称质量, 制备不同含水量的种子。沙芥种子含水量分别为 4.5% (对照)、3.1%、2.2%、1.3%; 斧形沙芥为 4.3% (对照)、3.1%、2.2%、1.3%。将不同含水量的种子用双层铝箔袋密封, 分别贮藏于 50、35 和 20 °C 的上海新苗 DNP-9162BS-III 电热恒温培养箱中, 1 年后测定相关指标。

1.3 种子活力与生理指标测定

1.3.1 回湿处理

发芽试验前, 采用逐级回湿平衡水分法对种子进行回湿处理。依次放入由饱和 CaCl_2 溶液、饱和 NH_4Cl 溶液以及水所形成的相对湿度环境为 35%、70%、100% 的干燥器中, 密封, 室温下各平衡 24 h, 使种子的含水量恢复到干燥前的水平 (林坚 等, 2004)。

1.3.2 发芽率及活力测定

经回湿处理的种子采用《1996 国际种子检验规程》标准测定种子发芽率、根干质量、发芽指数和活力指数。种子萌发温度为 20 °C 12 h/30 °C 12 h, 每处理 25 粒种子。种子以 5 × 5 的方阵形式摆放在垫两张滤纸的 90 mm 培养皿中 (ISTA, 1999), 4 次重复。以胚根长度大于 2 mm 时统计为萌发, 10 d 统计结束。

发芽率 (%) = (发芽种子数/测定种子总数) × 100。活力指数 $\text{VI} = \sum (\text{Gt}/\text{Dt}) \times \text{Sx}$ 。Gt: t d 的发芽数; Dt: 发芽天数; Sx: 发芽 x d 后胚根平均干质量。

取回湿吸胀 12 h 的种子 0.2 g, 采用 TTC 染色法测定脱氢酶活性, 以 1 g 种子 1 h 将 TTC 还原为 TTF 的量为单位, 确定种子活力 (李庆梅 等, 2009)。

1.3.3 生理指标测定

取完整干种子 0.2 g, 放置在 50 mL 的小烧杯中, 加入 30 mL 无离子水浸泡, 用封口膜密封。24 h 后用 DDS-IIA 型电导仪测定种子电导率, 放入沸水浴中煮沸 20 min, 冷却后, 测定此时种子浸出液的电导率 (张宪政 等, 1994)。

相对电导率 (%) = 浸出液电导率值/煮沸后电导率值 × 100。

取回湿吸胀 12 h 的种子 0.2 g, 测定以下指标。超氧化物歧化酶 (SOD, EC 1.15.1.1) 活性采用氮蓝四唑法, 过氧化氢酶 (CAT, EC 1.11.1.6) 活性采用紫外分光光度计法, 愈创木酚过氧化物酶 (GPX, EC 1.11.1.7) 活性采用愈创木酚法, 抗坏血酸过氧化物酶 (APX, EC 1.11.1.11) 活性采用紫外分光光度计法 (Cakmak & Marschner, 1992), 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法 (郝建军 等, 2007), 超氧阴离子自由基 (O_2^-) 产生速率采用比色法 (李忠光和龚明, 2005) 测定。

1.4 数据分析

利用 SAS 9.0 分析软件进行 One-way ANOVA 方差分析, 样本间的差异显著性用 Duncan's 检验。SPSS 18.0 软件进行 Pearson 简单相关系数的相关分析。用 Microsoft Excel 2003 软件制图。

2 结果与分析

2.1 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子萌发及活力的影响

由表 1 可知, 在各贮藏温度条件下, 沙芥和斧形沙芥种子随含水量的降低, 发芽率均呈不断下

降的趋势,均以对照的发芽率最高。沙芥种子贮藏前,含水量为 4.5% (对照)、3.1%和 2.2%的种子发芽率、活力指数、脱氢酶活性多数差异不显著,而含水量降到 1.3%时,发芽率和活力指数显著下降; 20 °C 贮藏后,也以含水量为 1.3%的种子发芽率和活力指数最低; 35 °C 和 50 °C 贮藏后,含水量为 4.5% (对照)和 3.1%的种子,发芽率和脱氢酶活性差异不显著,当含水量降到 3.1%以下,35 °C 贮藏后发芽率和活力指数显著下降,脱氢酶活性差异不显著,而 50 °C 贮藏则发芽率、活力指数和脱氢酶活性均显著下降。斧形沙芥贮藏前,含水量在 4.3% (对照)~1.3%的范围内,发芽率和脱氢酶活性差异不显著;在 20、35 和 50 °C 贮藏后,含水量在 4.3% (对照)~2.2%的范围内,发芽率和脱氢酶活性差异不显著,当含水量降到 1.3%时,20 °C 和 35 °C 贮藏后发芽率虽然下降,但仍保持在 90%左右,且脱氢酶活性差异不显著,而 50 °C 贮藏后发芽率、活力指数和脱氢酶活性均显著下降。综合发芽率和活力指数发现,随着贮藏温度的降低,沙芥种子最佳含水量范围变宽,沙芥由 4.5%~3.1%变为 20 °C 时的 4.5%~2.2%,斧形沙芥由 4.3%~2.2%变为 35 °C 和 20 °C 时的 4.3%~1.3%。斧形沙芥的贮藏最佳含水量范围比沙芥宽,具有更强的耐脱水性。各处理的种子活力指数和脱氢酶活性均较贮藏前不同程度下降,沙芥种子的下降幅度大于斧形沙芥,活力保持能力弱于斧形沙芥。种子活力的下降先于种子发芽率的降低。结果表明,各温度贮藏后仍以含水量最高的对照种子萌发与活力保持最好,且以 35 °C 贮藏活力保持最好。

表 1 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子发芽率和活力的影响

Table 1 Effects of storage temperature and ultradrying treatment on germination percentage and vigor of *Pugionium* seed

贮藏温度/°C Storage temperature	含水量/% Moisture content	沙芥 <i>Pugionium cornutum</i>			斧形沙芥 <i>Pugionium dolabratum</i>		
		发芽率/% Germination percentage	活力指数 Vigor index	脱氢酶活性/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Dehydrogenase activity	发芽率/% Germination percentage	活力指数 Vigor index	脱氢酶活性/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Dehydrogenase activity
贮藏前 Before stored	对照 Control	76.0 ± 4.9 a	0.066 ± 0.004 b	1149.3 ± 85.4 a	97.0 ± 1.9 a	0.046 ± 0.005 b	725.6 ± 53.4 a
	3.1	84.0 ± 5.2 a	0.094 ± 0.006 a	1117.4 ± 108.5 a	95.0 ± 1.0 a	0.058 ± 0.001 a	674.9 ± 25.8 a
	2.2	78.0 ± 5.3 a	0.062 ± 0.005 b	1006.8 ± 93.2 a	93.0 ± 3.0 a	0.036 ± 0.004 b	659.6 ± 46.0 a
50	1.3	48.0 ± 7.5 b	0.028 ± 0.004 c	693.3 ± 32.6 b	90.0 ± 2.6 a	0.018 ± 0.001 c	647.3 ± 70.7 a
	对照 Control	45.0 ± 6.8 a	0.019 ± 0.004 a	376.6 ± 21.4 a	93.0 ± 3.0 a	0.049 ± 0.002 a	443.1 ± 22.7 a
	3.1	35.0 ± 1.9 a	0.010 ± 0.001 b	210.9 ± 26.1 ab	91.0 ± 4.4 a	0.048 ± 0.001 a	383.7 ± 13.4 a
	2.2	5.0 ± 3.8 b	0.002 ± 0.001 c	69.4 ± 6.1 b	85.0 ± 1.0 a	0.044 ± 0.001 a	345.6 ± 10.0 a
35	1.3	0 b	0 c	87.3 ± 9.1 b	59.0 ± 3.0 b	0.043 ± 0.002 a	116.0 ± 12.4 b
	对照 Control	92.0 ± 2.8 a	0.064 ± 0.003 a	396.0 ± 14.4 a	100.0 ± 0.0 a	0.047 ± 0.007 a	439.3 ± 24.0 a
	3.1	89.0 ± 3.4 a	0.038 ± 0.004 b	423.6 ± 22.7 a	99.0 ± 1.0 ab	0.040 ± 0.004 ab	425.2 ± 27.4 a
	2.2	67.0 ± 7.9 b	0.029 ± 0.002 b	448.2 ± 15.2 a	99.0 ± 1.0 ab	0.028 ± 0.004 b	375.7 ± 18.6 a
20	1.3	32.0 ± 9.8 c	0.005 ± 0.002 c	391.8 ± 16.8 a	97.0 ± 1.0 b	0.009 ± 0.003 c	423.9 ± 21.5 a
	对照 Control	94.0 ± 2.0 a	0.046 ± 0.005 b	469.5 ± 35.5 a	100.0 ± 0.0 a	0.028 ± 0.001 a	246.1 ± 33.8 a
	3.1	97.0 ± 1.9 a	0.058 ± 0.001 a	379.3 ± 39.8 a	98.0 ± 1.2 a	0.029 ± 0.003 a	231.4 ± 5.4 a
	2.2	91.0 ± 2.5 a	0.036 ± 0.004 b	400.9 ± 28.3 a	100.0 ± 0.0 a	0.027 ± 0.001 a	311.8 ± 11.0 a
	1.3	67.0 ± 1.9 b	0.018 ± 0.001 c	349.4 ± 20.4 a	89.0 ± 3.4 b	0.031 ± 0.001 a	320.9 ± 40.8 a

注:沙芥对照含水量为 4.5%,斧形沙芥对照含水量为 4.3%。同一个温度处理内,不同小写字母者表示在 0.05 水平差异显著。

Note: The moisture content in control of *Pugionium cornutum* and *Pugionium dolabratum* were 4.5% and 4.3%. Within the same temperature treatment, the values by different lowercase letters are significantly different at 0.05 levels, respectively.

2.2 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子相对电导率的影响

由表 2 可知,经不同温度贮藏后沙芥和斧形沙芥种子随含水量降低,相对电导率均呈不断上升的变化趋势;各种含水量的种子贮藏后其相对电导率均高于贮藏前,且含水量越低增加幅度越大,斧形沙芥种子的增加幅度小于沙芥。这表明贮藏和超干处理均能对种子的生物膜造成破坏,这与种子的活力变化相一致。斧形沙芥比沙芥种子能更好地保持生物膜的完整性,保持更高的生活力和活力。

表 2 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子相对电导率的影响

Table 2 Effects of storage temperature and ultradrying treatment on relative electrical conductivity of *Pugionium* seed

贮藏温度/°C Storage temperature	含水量/% Moisture content	沙芥 <i>Pugionium cornutum</i>	斧形沙芥 <i>Pugionium dolabratum</i>
贮藏前 Before stored	对照 Control	35.97 ± 1.07 a	40.50 ± 0.70 a
	3.1	23.46 ± 3.51 a	38.46 ± 1.01 a
	2.2	24.41 ± 1.83 a	34.39 ± 1.02 a
	1.3	21.51 ± 0.89 a	38.91 ± 1.45 a
50	对照 Control	38.38 ± 1.57 b	47.63 ± 0.17 a
	3.1	40.57 ± 1.39 ab	45.92 ± 0.44 a
	2.2	44.09 ± 0.64 a	47.29 ± 0.09 a
	1.3	41.97 ± 0.62 ab	46.54 ± 0.13 a
35	对照 Control	39.67 ± 2.58 b	51.67 ± 0.66 a
	3.1	44.56 ± 1.14 ab	47.02 ± 4.92 a
	2.2	50.04 ± 2.03 a	54.86 ± 1.40 a
	1.3	53.61 ± 1.66 a	57.44 ± 1.86 a
20	对照 Control	39.54 ± 2.54 b	53.61 ± 1.24 a
	3.1	51.18 ± 2.04 a	56.38 ± 2.16 a
	2.2	50.90 ± 0.78 a	57.60 ± 2.35 a
	1.3	53.83 ± 1.97 a	61.74 ± 0.45 a

注: 沙芥对照含水量为 4.5%, 斧形沙芥对照含水量为 4.3%。同一个温度处理内, 不同小写字母者表示在 0.05 水平差异显著。

Note: The moisture content in control of *Pugionium cornutum* and *Pugionium dolabratum* were 4.5% and 4.3%. Within the same temperature treatment, the values by different lowercase letters are significantly different at 0.05 levels, respectively.

2.3 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子抗氧化酶活性的影响

由表 3 可知, 在不同贮藏温度条件下, 各含水量的沙芥和斧形沙芥种子 SOD、GPX、APX 活性总体低于贮藏前; CAT 活性高于贮藏前, 在 50 °C 贮藏后增加更为明显。沙芥种子在 50 和 20 °C 随含水量的降低 GPX 活性呈先上升后下降的变化, APX 活性则差异不显著; 35 °C 下随含水量的降低 GPX、APX 活性均显著低于对照。斧形沙芥种子 GPX 活性在 50 °C 随含水量的降低显著上升, 在 35 和 20 °C 则显著下降, 而 APX 活性与 GPX 活性变化相反。结果表明, 经过超干处理的沙芥属蔬菜种子可以保持抗氧化酶活性, 协同作用有效地清除贮藏过程中脂质过氧化产生的毒害, 提高种子耐藏性, 且酶的活性受贮藏温度的影响, 以 GPX、APX 的表现更为敏感。

表 3 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of storage temperature and ultradrying treatment on activities of SOD, CAT, GPX and APX of *Pugionium* seed

沙芥属 <i>Pugionium</i>	贮藏温度/°C Storage temperature	含水量/% Moisture content	SOD/ (U · mg ⁻¹ FW)	CAT/ (U · mg ⁻¹ FW)	GPX/ (U · mg ⁻¹ FW)	APX/ (nmol · min ⁻¹ · mg ⁻¹ FW)
沙芥 <i>Pugionium cornutum</i>	贮藏前 Before stored	对照 Control	1.27 ± 0.02 a	0.07 ± 0.01 a	0.12 ± 0.04 a	8.04 ± 1.55 a
		3.1	1.18 ± 0.01 a	0.05 ± 0.01 a	0.10 ± 0.03 a	8.04 ± 2.45 a
		2.2	1.09 ± 0.04 a	0.06 ± 0.01 a	0.13 ± 0.03 a	5.36 ± 0.51 a
		1.3	0.86 ± 0.02 a	0.06 ± 0.01 a	0.10 ± 0.01 a	9.38 ± 2.56 a
	50	对照 Control	1.03 ± 0.05 a	0.17 ± 0.05 a	0.05 ± 0.02 c	6.03 ± 1.69 a
		3.1	1.08 ± 0.04 a	0.25 ± 0.04 a	0.13 ± 0.01 b	7.37 ± 1.69 a
		2.2	0.96 ± 0.07 a	0.38 ± 0.03 a	0.18 ± 0.01 a	6.03 ± 1.28 a
		1.3	1.04 ± 0.07 a	0.36 ± 0.06 a	0.03 ± 0.01 c	8.04 ± 1.34 a
	35	对照 Control	0.97 ± 0.07 a	0.12 ± 0.02 a	0.48 ± 0.01 a	6.70 ± 0.77 a
		3.1	0.91 ± 0.09 a	0.09 ± 0.03 a	0.08 ± 0.01 b	4.02 ± 0.77 bc
		2.2	1.00 ± 0.05 a	0.07 ± 0.02 a	0.04 ± 0.003 c	2.01 ± 0.67 c
		1.3	1.01 ± 0.05 a	0.08 ± 0.01 a	0.01 ± 0.002 d	4.69 ± 0.67 ab
20	对照 Control	0.81 ± 0.12 a	0.08 ± 0.02 a	0.09 ± 0.01 c	4.69 ± 1.28 a	
	3.1	0.78 ± 0.13 a	0.07 ± 0.01 a	0.15 ± 0.01 b	2.68 ± 1.55 a	
	2.2	0.69 ± 0.15 a	0.10 ± 0.01 a	0.23 ± 0.002 a	4.69 ± 0.67 a	
	1.3	0.72 ± 0.12 a	0.08 ± 0.02 a	0.22 ± 0.01 a	3.35 ± 0.67 a	
斧形沙芥 <i>Pugionium dolabratum</i>	贮藏前 Before stored	对照 Control	1.01 ± 0.02 a	0.08 ± 0.01 a	0.07 ± 0.02 a	10.04 ± 2.29 a
		3.1	0.88 ± 0.02 a	0.04 ± 0.01 b	0.15 ± 0.03 a	9.38 ± 1.73 a
		2.2	0.71 ± 0.02 a	0.04 ± 0.01 b	0.10 ± 0.04 a	12.72 ± 2.76 a
		1.3	0.82 ± 0.02 a	0.04 ± 0.01 b	0.06 ± 0.02 a	7.37 ± 1.28 a

续表 3

沙芥属 <i>Pugionium</i>	贮藏温度/°C Storage temperature	含水量/% Moisture content	SOD/ (U · mg ⁻¹ FW)	CAT/ (U · mg ⁻¹ FW)	GPX/ (U · mg ⁻¹ FW)	APX/ (nmol · min ⁻¹ · mg ⁻¹ FW)
	50	对照 Control	1.14 ± 0.07 a	0.38 ± 0.01 a	0.02 ± 0.01 b	8.71 ± 1.28 a
		3.1	1.03 ± 0.03 a	0.31 ± 0.06 a	0.07 ± 0.03 b	6.03 ± 1.27 ab
		2.2	1.30 ± 0.06 a	0.35 ± 0.05 a	0.19 ± 0.03 a	3.57 ± 0.77 b
		1.3	0.85 ± 0.07 a	0.33 ± 0.02 a	0.23 ± 0.03 a	4.46 ± 0.77 b
	35	对照 Control	0.97 ± 0.07 a	0.02 ± 0.01 a	0.05 ± 0.005 a	3.35 ± 1.28 ab
		3.1	0.95 ± 0.05 a	0.03 ± 0.01 a	0.03 ± 0.01 b	2.01 ± 0.67 b
		2.2	0.99 ± 0.09 a	0.04 ± 0.01 a	0.01 ± 0.005 b	6.03 ± 1.28 ab
		1.3	0.99 ± 0.10 a	0.03 ± 0.01 a	0.02 ± 0.003 b	7.36 ± 1.69 a
	20	对照 Control	0.79 ± 0.09 a	0.15 ± 0.01 ab	0.05 ± 0.01 a	2.68 ± 1.09 a
		3.1	0.72 ± 0.12 a	0.19 ± 0.02 a	0.05 ± 0.01 ab	1.34 ± 0.77 a
		2.2	0.75 ± 0.11 a	0.08 ± 0.004 b	0.02 ± 0.004 c	2.01 ± 0.67 a
		1.3	0.85 ± 0.06 a	0.11 ± 0.02 b	0.03 ± 0.01bc	4.02 ± 1.73 a

注：沙芥对照含水量为 4.5%，斧形沙芥对照含水量为 4.3%。同一个温度处理内，不同小写字母者表示在 0.05 水平差异显著。

Note: The moisture content in control of *Pugionium cornutum* and *Pugionium dolabratum* were 4.5% and 4.3%. Within the same temperature treatment, the values by different lowercase letters are significantly different at 0.05 levels, respectively.

2.4 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子 O₂⁻产生速率和 MDA 含量的影响

由表 4 可知，经不同温度贮藏后，各含水量的沙芥和斧形沙芥种子 O₂⁻产生速率、MDA 含量均有不同程度增加，且以对照增加的幅度大。35 °C 贮藏后 O₂⁻产生速率、MDA 含量最小。在 3 个贮藏温度下，沙芥种子的 O₂⁻产生速率、MDA 含量均大于斧形沙芥。说明 50、35 和 20 °C 均加剧了沙芥属蔬菜种子 O₂⁻的产生和 MDA 含量的积累，沙芥种子的抗老化能力弱于斧形沙芥种子。

表 4 贮藏温度与超干处理对沙芥属蔬菜种子 O₂⁻产生速率和 MDA 含量的影响

Table 4 Effects of storage temperature and ultradrying treatment on O₂⁻ generation rate and MDA content of *Pugionium* seed

贮藏温度/°C Storage temperature	含水量/% Moisture content	沙芥 <i>Pugionium cornutum</i>		斧形沙芥 <i>Pugionium dolabratum</i>	
		O ₂ ⁻ 产生速率/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹ FW) O ₂ ⁻ generation rate	MDA 含量/ (nmol · g ⁻¹ FW) MDA content	O ₂ ⁻ 产生速率/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹ FW) O ₂ ⁻ generation rate	MDA 含量/ (nmol · g ⁻¹ FW) MDA content
贮藏前 Before stored	对照 Control	0.023 ± 0.001 b	41.77 ± 5.15 a	0.022 ± 0.002 c	16.77 ± 2.28 a
	3.1	0.065 ± 0.004 a	43.71 ± 2.23 a	0.035 ± 0.003 b	24.36 ± 3.29 a
	2.2	0.069 ± 0.003 a	46.77 ± 5.47 a	0.052 ± 0.002 a	21.29 ± 3.15 a
	1.3	0.070 ± 0.005 a	48.39 ± 5.52 a	0.051 ± 0.003 a	19.14 ± 0.49 a
50	对照 Control	0.125 ± 0.015 a	123.23 ± 5.07 a	0.078 ± 0.032 a	103.87 ± 2.02 ab
	3.1	0.102 ± 0.017 a	121.94 ± 3.64 a	0.061 ± 0.022 a	107.74 ± 5.66 a
	2.2	0.107 ± 0.030 a	99.36 ± 0.91 b	0.071 ± 0.013 a	92.26 ± 7.52 ab
	1.3	0.088 ± 0.011 a	81.08 ± 1.22 c	0.068 ± 0.021 a	85.81 ± 1.41 b
35	对照 Control	0.024 ± 0.003 b	48.71 ± 2.79 a	0.053 ± 0.001 a	23.07 ± 3.45 a
	3.1	0.128 ± 0.030 a	45.16 ± 2.53 a	0.057 ± 0.008 a	20.32 ± 4.27 a
	2.2	0.069 ± 0.017 ab	46.61 ± 4.03 a	0.046 ± 0.019 a	22.42 ± 1.48 a
	1.3	0.049 ± 0.010 b	35.97 ± 1.81 b	0.015 ± 0.006 b	18.87 ± 1.61 a
20	对照 Control	0.136 ± 0.017 a	47.26 ± 3.24 a	0.074 ± 0.031 a	28.55 ± 0.76 a
	3.1	0.159 ± 0.002 a	56.13 ± 3.61 a	0.057 ± 0.009 a	31.61 ± 2.20 a
	2.2	0.134 ± 0.015 a	59.03 ± 9.07 a	0.055 ± 0.014 a	28.71 ± 3.43 a
	1.3	0.121 ± 0.027 a	51.77 ± 7.00 a	0.064 ± 0.007 a	25.00 ± 2.61 a

注：沙芥对照含水量为 4.5%，斧形沙芥对照含水量为 4.3%。同一个温度处理内，不同小写字母者表示在 0.05 水平差异显著。

Note: The moisture content in control of *Pugionium cornutum* and *Pugionium dolabratum* were 4.5% and 4.3%. Within the same temperature treatment, the values by different lowercase letters are significantly different at 0.05 levels, respectively.

2.5 沙芥属蔬菜超干种子发芽率与各种指标之间的相关关系

由表 5 可知，沙芥种子在 50 °C 贮藏后发芽率与含水量、活力指数显著正相关，与 CAT 活性显著负相关；35 °C 贮藏后发芽率与含水量显著正相关，与相对电导率显著负相关。斧形沙芥种子在 50 °C 贮藏后发芽率与含水量、脱氢酶活性显著正相关，与 GPX 极显著负相关；35 °C 贮藏后发芽率

与含水量、活力指数显著正相关。20 ℃贮藏后发芽率与各指标的相关性不明显。可见贮藏温度高时沙芥属蔬菜种子的发芽率与含水量显著相关, 较低温度下相关性不显著。

表 5 不同贮藏温度下沙芥属蔬菜超干种子发芽率与各种指标之间的相关系数

Table 5 Correlations storage temperature on germination percentage and all the indicators of ultradried *Pugionium* seed

指标 Indicator	沙芥 <i>Pugionium cornutum</i>			斧形沙芥 <i>Pugionium dolabratum</i>		
	50 ℃	35 ℃	20 ℃	50 ℃	35 ℃	20 ℃
含水量 Moisture content	0.948*	0.989*	0.735	0.954*	0.962*	-0.541
活力指数 Vigor index	0.968*	0.916	0.928	0.822	0.956*	-0.938
脱氢酶 Dehydrogenase activity	0.942	0.241	0.616	0.993*	0.072	-0.538
相对电导率 Relative electrical conductivity	-0.894	-0.975*	-0.408	0.078	-0.796	0.693
SOD 活性 SOD activity	0.338	-0.471	0.647	0.197	-0.712	0.651
CAT 活性 CAT activity	-0.979*	0.817	-0.339	0.265	-0.466	0.173
GPX 活性 GPX activity	-0.227	0.884	-0.654	-0.997**	0.704	0.098
APX 活性 APX activity	-0.481	0.502	-0.164	0.888	-0.889	0.657
MDA 含量 MDA content	0.882	0.890	0.099	0.949	0.722	-0.541
O ₂ ⁻ 产生速率 O ₂ ⁻ generation rate	0.853	-0.165	0.941	0.161	0.939	0.148

注: *表示在 0.05 水平上显著相关, **表示在 0.01 水平上极显著相关。

Note: * correlation is significant at the 0.05 level, ** correlation is significant at the 0.01 level.

3 讨论

3.1 影响沙芥属蔬菜种子最佳含水量范围基础物质的探讨

种子的贮藏物质对种子的脱水耐性有较大的影响, 蛋白类种子对水分最为敏感, 淀粉类次之, 油类种子最不敏感, 脱水耐性最强(李鑫和王倩, 2005)。淀粉类种子贮藏的最佳含水量范围都较宽, 与温度的关系不明显, 而蛋白类种子、油脂种子的贮藏温度对种子贮藏的最佳含水量则有影响(Vertucci & Roos, 1993; 吴晓亮等, 2006; 孙爱清等, 2009)。沙芥和斧形沙芥种子属于脂肪性种子(张卫华, 2004; 宋兆伟, 2007), 本研究中发现随着贮藏温度的下降, 沙芥属蔬菜种子的贮藏最佳含水量范围增大, 这与油菜种子的研究结果(伍晓明等, 2001)一致。沙芥种子的脂肪含量高于斧形沙芥种子, 试验发现沙芥种子的最佳含水量范围小于斧形沙芥种子, 这与孙红梅(2006)研究大葱种子的含油量显著高于韭菜种子, 不同温度贮藏最佳含水量范围小于韭菜种子的结果相一致。而与程红焱等(1991)的研究结果含油量高的种子更易失水, 耐干程度高, 适宜于超干贮藏相反。沙芥种子与斧形沙芥种子超干贮藏的差异性可能既与斧形沙芥种子粒小更易于干燥和贮藏(李鑫和王倩, 2005), 又与可溶性糖的积累和特异性蛋白的表达有关(任晓米等, 2001), 其具体原因还有待于进一步探索。

3.2 沙芥属蔬菜超干种子贮藏过程中种子活力与脂质过氧化关系的探讨

贮藏温度是影响种子贮藏后活力变化的关键因素之一(张海英等, 2002), 其主要影响到酶的活性从而影响种子内部物质的转运、吸水和气体交换(傅家瑞, 1985)。本研究中发现 50 ℃贮藏使沙芥属蔬菜种子发芽率、种子活力明显下降从而加速其老化, 而 35 ℃和 20 ℃贮藏在最佳含水量范围内种子发芽率高于贮藏前, 而种子活力则有不同程度的下降, 其老化进程较为缓慢。不同的贮藏温度均加速了沙芥属蔬菜种子老化, 其主要原因是贮藏过程中的脂质过氧化作用产生自由基、活性氧及 MDA 等许多有害物质, 这些有害物质攻击生物膜和细胞内的大分子物质从而改变细胞成分,

积累活性氧,降低抗氧化酶活性,提高MDA含量,从而加速老化最终导致死亡(Goel & Sheoran, 2003; Kibinza et al., 2006; 朱萍等, 2011)。贮藏过程中沙芥属蔬菜种子电导率增大表明生物膜完整性受到不同程度的破坏,这与 O_2^- 产生速率、MDA含量的增加有关,而随着含水量的降低 O_2^- 产生速率和MDA含量呈下降变化,这与孙红梅等(2004)对芥蓝种子的研究结果一致。MDA含量降低又从另一角度证实超干对种子耐藏性增强的重要作用是抗脂质过氧化系统的完好保存,并有效保护膜质免受活性氧的袭击(林坚等, 2002)。抗氧化酶系统可以有效地防止脂质过氧化,它们协同作用共同清除老化过程产生的自由基及活性氧(林坚等, 2002)。超干种子经过回湿吸胀后可以保持酶的活性,增强种子抗脂质过氧化能力,为种子活力的延长提供有力保障。本试验中,GPX、APX活性对贮藏温度的表现更为敏感。贮藏温度升高时,酶的活性增强,呼吸作用也随之增强,不利于种子保存(杜克兵等, 2009)。这是影响沙芥属蔬菜种子在50℃贮藏,有害物质积累加剧、CAT活性增强、种子活力下降的关键因素。CAT活性在抗脂质过氧化作用中起到重要作用,这与豌豆种子的结果相似(吴晓亮等, 2006)。50℃贮藏后,含水量为1.3%时沙芥种子的发芽率为零,种子处于死亡状态,而其相对电导率相比较含水量为2.2%则有所下降,造成这一现象的原因可能是死亡种子内代谢物质结构的改变,从而使物质无法通过细胞膜,进而影响电解质的渗透。

3.3 沙芥属蔬菜种子最佳贮藏条件及耐藏性差异的探讨

本试验研究发现50℃贮藏的沙芥属蔬菜超干种子与对照相比并不能有效地延缓活力的下降,而35和20℃贮藏后种子活力得以保持,尤其35℃贮藏 O_2^- 产生速率和MDA的积累最少,种子的脂质过氧化作用最小,为适宜的贮藏温度。本试验中沙芥和斧形沙芥种子自然成熟状态时的含水量分别为4.5%和4.3%,无需人工脱水其含水量就已经小于5%,且发现人工降低含水量其生物膜完整性、发芽率与活力没有增加,故成熟状态时的含水量属于沙芥属蔬菜种子的贮藏最佳含水量。斧形沙芥种子 O_2^- 产生速率、MDA含量均低于沙芥种子,生物膜的完整性强于沙芥种子,种子萌发和活力的保持强于沙芥种子,从而表明斧形沙芥种子的耐藏性要强于沙芥种子,这与有害物质积累少、抗氧化酶活性的保持密不可分,成为抗老化能力及耐藏性强的原因,从而保证更高的种子生活力和活力。

References

- Cakmak I, Marschner H. 1992. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiology*, 98: 1222 - 1227.
- Cheng Hong-yan, Zheng Guang-hua, Tao Jia-ling. 1991. Physiological, biochemical and ultrastructural studies on ultradried seeds of some *Brassica* species. *Acta Phytophysiological Sinica*, 17 (3): 273 - 284. (in Chinese)
- 程红焱, 郑光华, 陶嘉龄. 1991. 超干处理对几种芸薹属植物种子生理生化和细胞超微结构的效应. *植物生理学报*, 17 (3): 273 - 284.
- Du Ke-bing, Xu Lin, Tu Bing-kun, Shen Bao-xian, Yang Su-dan, Wang Rui-jing, Wang Rui-wen. 2009. Effect of storage temperature, water content and drying method on the storage capacity of sect aigeiros poplar seeds. *Seed*, 28 (4): 1 - 7. (in Chinese)
- 杜克兵, 许林, 涂炳坤, 沈宝仙, 杨素丹, 王瑞静, 王瑞文. 2009. 贮藏温度、含水量及干燥方法对黑杨派杨树种子耐藏性的影响. *种子*, 28 (4): 1 - 7.
- Ellis R H, Hong T D. 1996. Survival of dry and ultra-dry seeds of carrot, groundnut, lettuce, oillucerape, and onion during five year's hermetic storage at two temperatures. *Seed Science and Technology*, 24: 347 - 358.
- Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. 1986. Longarithmic relationship between moisture content and longevity in sesae seeds. *Annals of Botany*, 57: 499 - 503.
- Fu Jia-rui. 1985. *Seed physiology*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 傅家瑞. 1985. 种子生理. 北京: 科学出版社.
- Goel A, Sheoran I S. 2003. Lipid peroxidation and peroxide-scavenging enzymes in cotton seeds under natural ageing. *Biologia Plantarum*, 46 (3):

429 - 434.

- Han Yu-zhu, Wu Lian, Zeng Bing, Wang Wei, Cheng Liang-qi. 2011. Effects of storage temperature and seed moisture content on seed vigor of tall fescue. *Seed*, 30 (6): 41 - 44. (in Chinese)
- 韩玉竹, 伍 莲, 曾 兵, 王 维, 程亮旗. 2011. 贮藏温度和种子含水量对高羊茅种子活力的影响. *种子*, 30 (6): 41 - 44.
- Hao Jian-jun, Kang Zong-li, Yu Yang. 2007. *Experimental technology of plant physiology*. Beijing: Chemical Industry Press. (in Chinese)
- 郝建军, 康宗利, 于 洋. 2007. *植物生理学实验技术*. 北京: 化学工业出版社.
- Hao Li-zhen, Hu Ning-bao, Zhang Jin-wen, Wang Ping, Zhang Wei-hua. 2005. The problems should be noticed in the development and utilization of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. *China Vegetables*, (3): 39. (in Chinese)
- 郝丽珍, 胡宁宝, 张进文, 王 萍, 张卫华. 2005. 沙芥开发利用中应注意的问题. *中国蔬菜*, (3): 39.
- Hu Cheng-lian, Hu Xiao-rong, Xin Ping-ping. 1999. Study on the storage of ultra dried rice seeds. *Seed*, (2): 18 - 21. (in Chinese)
- 胡承莲, 胡小荣, 辛萍萍. 1999. 超干燥水稻种子贮藏研究. *种子*, (2): 18 - 21.
- International Seed Testing Association. 1999. 1996 International rules for seed testing. National Crop Seed Quality Supervision and Inspection Center, Ministry of Agriculture and Center of Seed Science, Zhejiang University, Translation. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 国际种子检验协会 (ISTA). 1999. 1996 国际种子检验规程. 农业部全国农作物种子质量监督检测中心, 浙江大学种子科学中心, 译. 北京: 中国农业出版社.
- Kibinza S, Vinel D, Côme D, Bailly C, Corbineau F. 2006. Sunflower seed deterioration as related to moisture content during ageing, energy metabolism and active oxygen species scavenging. *Physiologia Plantarum*, 128: 496 - 506.
- Lehner A, Mamadou N, Poels P, Côme D, Bailly C, Corbineau F. 2008. Changes in soluble carbohydrates, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in the embryo during ageing in wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 47: 555 - 565.
- Li Qing-mei, Hou Long-yu, Duan Xin-fang, Liu Guang-quan, Ma Feng-yun. 2009. Effects of ultra-dry treatment on vigor and physiological characteristics of *Pinus tabulaeformis* seeds. *Forest Research*, 22 (1): 124 - 128. (in Chinese)
- 李庆梅, 侯龙鱼, 段新芳, 刘广全, 马风云. 2009. 油松种子超干贮藏生理生化特征的研究. *林业科学研究*, 22 (1): 124 - 128.
- Li Xin, Wang Qian. 2005. Advances in ultra-dry seed storage research. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 21 (7): 124 - 128. (in Chinese)
- 李 鑫, 王 倩. 2005. 种子超干贮藏研究进展. *中国农学通报*, 21 (7): 124 - 128.
- Li Zhong-guang, Gong Ming. 2005. Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant. *Acta Botanica Yunnanica*, 27 (2): 211 - 216. (in Chinese)
- 李忠光, 龚 明. 2005. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进. *云南植物研究*, 27 (2): 211 - 216.
- Lin Jian, Wang Xiao-feng, Jing Xin-ming, Zheng Guang-hua. 2002. Effect of anti-lipid-peroxidation of ultradried wheat seeds. *Seed*, (2): 4 - 6. (in Chinese)
- 林 坚, 汪晓峰, 景新明, 郑光华. 2002. 超干小麦种子抗脂质过氧化物的效果. *种子*, (2): 4 - 6.
- Lin Jian, Zheng Guang-hua, Zhang Qing-chang. 2004. Effect of equilibrium pre-moisten on the prevention to the imbibitional damage of ultradried peanut seeds//Zheng Guang-hua. *Seed physiology research*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 林 坚, 郑光华, 张庆昌. 2004. 回湿预处理防护超低含水量花生种子吸胀损伤的效果//郑光华. *种子生理研究*. 北京: 科学出版社.
- Ren Xiao-mi, Zhu Cheng, Zeng Guang-wen. 2001. Current research of basic substances related to desiccation tolerance in seeds. *Chinese Bulletin of Botany*, 18 (2): 183 - 189. (in Chinese)
- 任晓米, 朱 诚, 曾广文. 2001. 与种子耐脱水性有关的基础物质研究进展. *植物学通报*, 18 (2): 183 - 189.
- Shen Di, Qi Xiao-quan. 1996. Studies on storage of seeds with ultra-low moisture content in Chinese cabbage. *China Vegetables*, (4): 19 - 22. (in Chinese)
- 沈 镛, 漆小泉. 1996. 大白菜超低含水量种子保存研究. *中国蔬菜*, (4): 19 - 22.
- Song Zhao-wei. 2007. Germination physiology of *Pugionium dolabratum* Maxim. seeds and the dynamic growth of *Puionium* Gaertn. seedlings [M. D. Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. (in Chinese)
- 宋兆伟. 2007. 斧形沙芥种子萌发生理及沙芥属幼苗生长动态 [硕士论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- Sun Ai-qing, Gao Rong-qi, Yin Yan-ping, Li Sheng-fu. 2009. The optimum moisture content range of ultra-dry storage for different type of seeds. *Seed*, 28 (8): 31 - 35. (in Chinese)
- 孙爱清, 高荣岐, 尹燕萍, 李圣福. 2009. 不同类型种子超干贮藏的最佳含水量范围. *种子*, 28 (8): 31 - 35.
- Sun Hong-mei. 2006. Studies on optimal moisture contents and physiological-biochemical characteristics on seed germplasm conservation [Ph. D.

- Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- 孙红梅. 2006. 种子种质保存最适含水量及生理生化特性研究[博士论文]. 北京: 中国科学院.
- Sun Hong-mei, Jing Xin-ming, Xin Xia, Lin Jian, Zheng Guang-hua. 2004. Effects of ultradry storage on the stability of antioxidation system of the seed of *Brassica caulorapa* Pasq. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (6): 751 - 757. (in Chinese)
- 孙红梅, 景新明, 辛霞, 林坚, 郑光华. 2004. 超干贮藏对苜蓿种子抗氧化系统稳定性的影响. *园艺学报*, 31 (6): 751 - 757.
- Vertucci C W, Roos E E. 1993. Theoretical basis of protocols for seed storage II. The influence of temperature on optimal moisture levels. *Seed Science Research*, (3): 201 - 213.
- Wang Xiao-feng, Jing Xin-ming, Zheng Guang-hua. 2001. Effect of seed moisture content on seed storage longevity. *Acta Botanica Sinica*, 43 (6): 551 - 557. (in Chinese)
- 汪晓峰, 景新明, 郑光华. 2001. 含水量对种子贮藏寿命的影响. *植物学报*, 43 (6): 551 - 557.
- Wu Xiao-liang, Chen Xiao-ling, Xin Ping-ping, Zhang Zhi-e, Tao Lan, Lu Xin-xiong. 2006. Effect of ultradrying on antioxidant enzymes and heat-stable protein of pea seeds. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (3): 523 - 528. (in Chinese)
- 吴晓亮, 陈晓玲, 辛萍萍, 张志娥, 陶澜, 卢新雄. 2006. 超干燥处理对豌豆种子抗氧化系统酶及热稳定蛋白的影响. *园艺学报*, 33 (3): 523 - 528.
- Wu Xiao-ming, Zheng Pu-ying, Huang Yong-ju, Wang Han-zhong, Xu Kun, Chen Bi-yun. 2001. Optimum moisture content of rape seed for ultradry storage at different temperature. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 23 (3): 5 - 8, 12. (in Chinese)
- 伍晓明, 郑普英, 黄永菊, 王汉中, 许鲲, 陈碧云. 2001. 油菜种子超干燥保存的最佳含水量研究. *中国油料作物学报*, 23 (3): 5 - 8, 12.
- Zhang Feng-lan, Hao Li-zhen, Wang Ping, Yang Zhong-ren, Zhang Jin-wen, Li Xiao-jing, Hu Ning-bao, Yan Jie, Zhao Qing-yan. 2006. Investigation and utilization of wild vegetables germplasm resources in *Pugionium* Gaertn. *China Vegetables*, (10): 31 - 34. (in Chinese)
- 张凤兰, 郝丽珍, 王萍, 杨忠仁, 张进文, 李晓静, 胡宁宝, 闫洁, 赵清岩. 2006. 蒙古高原沙芥属野菜的种类资源考察及利用现状. *中国蔬菜*, (10): 31 - 34.
- Zhang Hai-ying, Meng Shu-chun, Kong Xiang-hui. 2002. Effect of ultra-dry storage on viability and vigor of tomato seeds. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (1): 35 - 38. (in Chinese)
- 张海英, 孟淑春, 孔祥辉. 2002. 超干贮存对番茄种子活力的影响. *园艺学报*, 29 (1): 35 - 38.
- Zhang Wei-hua. 2004. A study on germination physiology of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn seed [M. D. Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. (in Chinese)
- 张卫华. 2004. 沙芥种子发芽生理的研究[硕士论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- Zhang Xian-zheng, Chen Feng-yu, Wang Rong-fu. 1994. Experimental technology of plant physiology. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press. (in Chinese)
- 张宪政, 陈凤玉, 王荣福. 1994. 植物生理学实验技术. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.
- Zhao Yi-zhi. 1999. A taxological revision and floristic analysis of the *Pugionium* Gaertn. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Inner Mongolia: Nat Sci Edi*, 30 (2): 197 - 199. (in Chinese)
- 赵一之. 1999. 沙芥属的分类校正及其区系分析. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 30 (2): 197 - 199.
- Zheng Xiao-ying, Li Xiu-qing, Chen Hang. 2001. Effect of different ultra-drying methods on vegetable seeds for long-term storage. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (2): 123 - 127. (in Chinese)
- 郑晓鹰, 李秀清, 陈杭. 2001. 不同超干方法与几种蔬菜种子储藏效应的研究. *园艺学报*, 28 (2): 123 - 127.
- Zhu Cheng, Zeng Guang-wen, Jing Xin-ming, Lin Jian, Zheng Guang-hua, Wu Ping. 2001. The effect of moisture content and storage temperature on onion seed longevity. *Acta Phytobiologica Sinica*, 27 (3): 261 - 266. (in Chinese)
- 朱诚, 曾广文, 景新明, 林坚, 郑光华, 吴平. 2001. 洋葱种子含水量与贮藏温度对其寿命的影响. *植物生理学报*, 27 (3): 261 - 266.
- Zhu Ping, Kong Ling-qi, Li Gao, Zhang Xiao-yuan, Yu Xiao-na, Mao Pei-sheng. 2011. Effect of moisture content on physiological characteristics of *Elymus sibiricus* seed under different storage temperature conditions. *Acta Prataculturae Sinica*, 20 (6): 101 - 108. (in Chinese)
- 朱萍, 孔令琪, 李高, 张晓媛, 于晓娜, 毛培胜. 2011. 贮藏温度对不同含水量老芒麦种子生理特性的影响. *草业学报*, 20 (6): 101 - 108.