

西瓜超干种子的长期耐藏性分析

何序晨¹, 胡伟民^{1,*}, 段宪明^{2,*}, 陆宏园¹, 关亚静¹, 胡晋¹

(¹浙江大学农业与生物技术学院种子科学中心, 杭州 310058; ²Sakata Seed America, Salinas CA 93907)

摘要: 采用硅胶干燥的方法对‘皖杂一号’和‘丰收2号’西瓜品种的种子进行超干贮藏试验, 几种不同干燥水平处理的种子在室温条件下历经了23年的密闭贮藏, 种子含水量分别降至2.32%和2.23%时, 发芽率分别为96%和91%。种子发芽率的高低与其含水量呈显著负相关; 过氧化物酶(POD)活性、干种子种胚蔗糖含量与发芽率的变化呈正相关, 而超氧化物歧化酶(SOD)活性与发芽率的变化呈负相关。比较‘皖杂一号’超干贮藏9、15、20和23年后种子发芽率变化发现, 当种子含水量 $\geq 5.22\%$, 随着贮藏时间的延长, 发芽率下降较快; 种子含水量在1.65%~4.12%, 发芽率下降缓慢, 经20~23年密闭贮藏后仍保持较高的发芽率。本试验结果表明, 二倍体西瓜种子在超干条件下贮藏可以长期保持良好的生活力。

关键词: 西瓜; 种子; 超干贮藏; 发芽率; 抗氧化酶; 蔗糖; 耐藏性

中图分类号: S 651

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2017) 02-0307-08

Analysis of Long Term Storability of Diploid Watermelon Ultra-dry Seeds

HE Xuchen¹, HU Weimin^{1,*}, DUAN Xianming^{2,*}, LU Hongyuan¹, GUAN Yajing¹, and HU Jin¹

(¹Seed Science Center, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; ²Sakata Seed America, Salinas CA 93907, USA)

Abstract: Watermelon (*Citrullus vulgaris* Schrad.) seeds of two diploid varieties, Wanza 1 and Fengshou 2, were pre-dried at different levels of silica gel and then stored for 23 years under room temperature and hermetic conditions. The best storage treatments had 96% and 91% germination percentage for Wanza 1 and Fengshou 2 varieties when the seed water content was adjusted at 2.32% and 2.23% respectively. The germination-ability of the seed was negatively correlated with the seed water content during storage period. Positive correlations were found between both POD activity and sucrose content with the germination percentage, but SOD activity showed a negative correlation with the germination percentage. In addition, the viability of Wanza 1 of each treatment were compared after 9, 15, 20 and 23 years of storage. For the seed with water content of 5.22% or higher, the germination percentage declined quickly. However, seed water content with range of 1.65% and 4.12%, the germination percentage were well retained after 20 - 23 years of storage. These results suggest that diploid watermelon seeds can retain high viability under ultra-dry condition in the long term storage.

Keywords: watermelon; seed; ultra-dry storage; germination percentage; antioxidant enzyme; sucrose; storability

收稿日期: 2016-12-20; **修回日期:** 2017-02-12

基金项目: 浙江省农业新品种选育重大科技专项项目(2016C02050-9-3); 国家公益性行业农业专项项目(201203052)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: huwm168@zju.edu.cn, xduan@sakata.com)

种子超干贮藏, 亦称为种子超低含水量贮藏, 是指种子含水量降至 5% 以下, 密封后在室温条件下或稍微降温的条件下贮藏种子的一种方法(陈叔平和胡承莲, 1992; 胡晋, 2014)。Ellis 等(1988)将芝麻种子含水量从 5% 降低至 2%, 发现可使其贮藏寿命延长 40 倍, 并证明 2% 含水量的芝麻种子贮藏在 20 °C 条件下与 5% 含水量种子贮藏 -20 °C 条件效果一样。林坚等(1996)发现杜仲种子含水量降至 3.5% 以下, 其耐藏力增强, 超干种子比对照种子(含水量 7.5%, 室温贮藏)电导率降低 45%, 并且丙二醛(MDA)的积累减少。同样地, 经过超干处理的花生种子(含水量 2.11%) 在常温下也能显著延长耐藏期, 并且在超干贮藏过程中种子仍保持较高的自由基清除系统的酶活性(朱诚等, 2000)。由此可见, 种子超干贮藏可节省制冷设备建造费用和运行能耗, 有很大的经济意义和潜在的实用价值, 是一种应用前景广阔种子贮藏方法。

近年来, 不少学者对超干种子进行了一系列细胞学、生理学及遗传学方面的研究。曾丽等(2006)发现一串红超干种子在室温条件下贮藏 13 个月, 发芽率、发芽势及发芽指数明显高于未超干的种子。汪晓峰等(1999)应用荧光探针研究超干种子处理对细胞膜流动性的影响, 发现白菜、家榆种子经超干处理后保持了质膜的生理功能, 从而提高了耐藏性。胡小荣等(2003)通过对小麦种子的 AFLP 和 SSR 分析表明干燥和超干燥保存不会引起种子幼苗在分子水平上的遗传变异。这些都说明种子在适度超低含水量状态下不仅能保持种子生活力, 而且能保持组织与细胞形态及遗传物质的稳定性。然而, 目前大多数研究选用的是 2 ~ 5 年内短期贮藏的种子, 再通过人工加速老化的方法(一般采用将种子在 40 ~ 45 °C 高温和 95% 相对湿度下放置 72 h) 进行处理。阮松林等(1998)认为, 自然老化尽管作用缓慢, 但种子受损度因无法自行修补而导致深度损伤; 而人工老化采用的是高温高湿条件, 种子在受到伤害的同时又可自行修复。在某种程度上, 人工老化是不能替代自然老化的。

二倍体西瓜种子与其他瓜类种子相似, 属于耐藏性比较好的作物种子。Fursa 和 Zhukova(1983)、Androsova 和 Azhmukhamedova(1986)先后报道二倍体西瓜种子在密闭的条件下贮藏 18 ~ 20 年仍可以保持较高的生活力, 但遗憾的是作者对试验种子的含水量水平没有具体报道。Nerson(2002)的研究发现成熟的西瓜种子在 10 °C 和 45% 相对湿度条件下贮藏 10 年, 生活力没有下降。Ozcohan 和 Demir(2002)将含水量为 8%、10%、12% 和 14% 的西瓜种子分别在 10 °C 和 20 °C 条件下贮藏 18 个月, 结果表明含水量较低种子(8%、10%) 仍能保持较高的生活力, 而含水量较高的(12%、14%) 生活力降低。胡伟民等(2002)将不同含水量的西瓜种子在室温条件下密闭贮藏 7 年, 发现种子含水量在 3.7% 时生活力和活力最高。

本试验中以在室温条件下超干密闭贮藏 23 年的二倍体西瓜种子为材料, 通过种子生理生化指标分析, 探讨超干种子自然老化对种子生活力的影响, 并对‘皖杂一号’西瓜种子在不同年份生活力的变化进行了跟踪研究, 以确定超干种子室温贮藏能否用于种质资源和高价值种子的长期保存, 从而为种质资源的低成本和低碳经济贮藏提供重要的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料及其种子干燥和贮藏

供试二倍体西瓜种子为‘皖杂一号’(贮藏初始发芽率为 98%) 和‘丰收 2 号’(贮藏初始发芽率为 94%)。

采用室温硅胶干燥法。种子经过清选和自然干燥含水量达到国家标准(GB4404-84, 1985)规定(含水量不高于 8.0%) 后, 将种子置于底部装有干燥硅胶的干燥瓶中, 瓶口用凡士林密封。硅胶

作为干燥剂, 与种子以不同的质量比配制成不同处理(表 1), 其中‘皖杂一号’有 7 个处理, ‘丰收 2 号’有 8 个处理, 每个处理均有 6 个独立干燥瓶。

各处理种子均从 1993 年 1 月开始在室温条件下遮光保存于浙江省杭州市浙江大学农学院实验室。不同年份测定时, 每个处理每次取样 1 个独立干燥瓶。

1.2 测定方法

种子含水量的测定: 采用国际种子检验协会(1985)的低恒温烘干法, (105 ± 2) °C 恒温烘干 12 h。种子含水量 (%) = [(样品烘前质量 - 样品烘后质量) / 样品烘前质量] × 100。2 次重复。

种子发芽试验: 各处理种子从干燥瓶内取出后, 为了避免直接发芽可能造成的吸胀损伤, 先于室内开放条件下平衡含水量 15 d 后, 再根据国际种子检验协会(1985)的方法进行发芽试验: 各处理种子采用纸卷法(把 50 粒种子分成两排均匀放置在湿润的发芽纸上, 再用一张同样大小的湿润发芽纸覆盖在种子上, 底部褶起 2 cm, 然后卷成纸卷, 两端用橡皮筋扎住, 竖放在发芽盒内), 于变温条件(30 °C、光照 8 h, 20 °C、黑暗 16 h)下培养, 开始发芽后 14 d 统计发芽率。

过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定: 称取发芽 2 d 的种子 0.5 g, 于冰浴中用磷酸缓冲液研磨成匀浆, $10\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min。取上清液与磷酸缓冲液、愈创木酚、过氧化氢(H_2O_2)混匀, 用动力学方法在 470 nm 下测定 POD 活性(Cao et al., 2010)。取上清液与氮蓝四唑(NBT)在 4 000 lx 光强和 25 °C 下反应, 然后在 560 nm 下测定 SOD 活性(Qiu et al., 2005)。

蔗糖含量测定采用蒽酮比色法(吕学高, 2008)。将西瓜种子去除种皮后, 取 0.5 g 种胚于液氮中研磨成匀浆, 沸水浴中提取 30 min, $10\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min 后, 吸取蔗糖提取液, 加入水和 30% KOH, 再次沸水浴并冷却后加入蒽酮乙酸乙酯试剂和 98% 浓硫酸, 沸水浴保温 5 min, 在 630 nm 波长下测定吸光度。

2 结果与分析

2.1 超干贮藏期间室内外气温变化情况

如图 1 所示, 超干贮藏 23 年间浙江省杭州市年平均温度比较稳定, 基本维持在 15.9 ~ 18.0 °C 之间; 但同一年份内四季分明, 气温变幅较大。年极端最高温度除 2013 年较高, 达到 42.8 °C 外, 其余年份基本在 38 ~ 40 °C; 极端最低温度变动较大, 其中 2014 年和 2015 年最低温度较高, 仅为 -3.0 °C, 其余年份大多在 -5.0 °C 以下。同时, 存放试验种子的房间为普通实验室, 没有特殊保温设施, 加上人员进出频繁, 室内温度随外部温度变化而改变, 根据温度计简单测定, 同一年份内室内温度在 5 ~ 35 °C。

表 1 ‘皖杂一号’和‘丰收 2 号’西瓜种子的不同处理

Table 1 Different treatments of ‘Wanza 1’ and ‘Fengshou 2’ seeds

处理 Treatment	种子质量 : 硅胶质量 Seed weight : silica weight	
	皖杂一号 Wanza 1	丰收 2 号 Fengshou 2
1	1:6	1:6
2	1:4	1:4
3	1:2	1:2
4	1:1	1:1
5	5:3	5:3
6	5:1	5:1
7	1:0	10:1
8		1:0

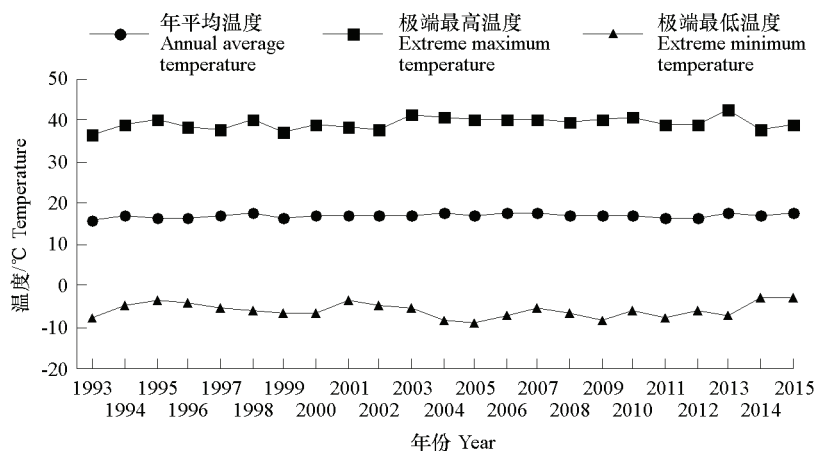


图1 1993—2015年间杭州市气温变化情况

Fig. 1 Changes of temperature in Hangzhou during 1993 - 2015

2.2 贮藏 23 年后西瓜种子的含水量和发芽率

‘皖杂一号’和‘丰收2号’西瓜种子室内密封贮藏23年，于2015年12月测定种子含水量，‘皖杂一号’的2~7号处理（1号处理因分期跟踪研究，样品已于2012年取用完毕）的种子含水量在2.32%~7.12%，‘丰收2号’1~8号处理的种子含水量在2.03%~7.60%（表2）。

2016年1月分别测定‘皖杂一号’和‘丰收2号’种子的发芽率。两个品种的种子发芽率随含水量变化均差异明显（表2），随着含水量的下降，发芽率上升，种子发芽率与含水量之间存在着显著的负相关（ $r = -0.931$ 和 $r = -0.948$ ）。其中‘皖杂一号’种子含水量在2.32%时，发芽率最高，为96%，与贮藏初始发芽率相比仅下降了2%；当含水量在2.32%~4.03%，种子均能保持较高的发芽率；但当种子含水量达到或超过5.31%时，发芽率开始明显下降。

‘丰收2号’种子含水量在2.23%时，发芽率最高，达到91%，与贮藏初始发芽率相比仅下降了3%；当含水量低至2.03%或 $\geq 4.53\%$ 时，发芽率均明显下降，特别当含水量 $\geq 5.81\%$ 时，种子已完全丧失发芽能力。

2.3 长期超干贮藏对种子生理生化特性的影响

2.3.1 对过氧化物酶（POD）和超氧化物歧化酶（SOD）活性的影响

生物体存在一系列的自由基清除剂，自由基清除剂可以清除细胞内过量的活性氧，维持活性氧代谢平衡，保护细胞膜不受自由基的伤害。植物细胞对自由基的清除主要通过过氧化物酶（POD）、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）、抗坏血酸过氧化物酶（APX）等抗氧化酶系统。其中，POD和SOD是种子生活力和活力的重要指标，与种子生活力和活力密切相关。

超干贮藏23年后，‘皖杂一号’和‘丰收2号’的POD活性与种子发芽率的变化呈显著正相关（ $r = 0.827$ 和 $r = 0.892$ ），发芽率越高，POD活性越高；反之，则活性降低。其中，‘皖杂一号’和‘丰收2号’都以处理2的POD活性最高。

‘皖杂一号’和‘丰收2号’种子的SOD活性与种子发芽率呈负相关（ $r = -0.870$ 和 $r = -0.569$ ），随着发芽率的上升，SOD活性降低，反之则升高（表2）。

2.3.2 对种子蔗糖含量的影响

‘皖杂一号’和‘丰收2号’干种子种胚的蔗糖含量与发芽率的变化基本一致（表2），发芽率

越高, 干种子蔗糖含量越高, 两者之间存在着明显的正相关 ($r = 0.969$ 和 $r = 0.835$)。其中, ‘皖杂一号’ 和 ‘丰收 2 号’ 都以处理 2 的蔗糖含量最高。

表 2 长期超干贮藏对 ‘皖杂一号’ 和 ‘丰收 2 号’ 西瓜种子生理生化特性的影响
Table 2 Effects of ultra-dry storage on physiological and biological characteristics of ‘Wanza 1’ and ‘Fengshou 2’ seeds

处理 Treatment	皖杂一号 Wanza 1					丰收 2 号 Fengshou 2				
	含水量/% Water content	发芽率/% Germination percentage	POD 活性/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹ FW) POD activity	SOD 活性/ (U · g ⁻¹ FW) SOD activity	蔗糖含量/% Sucrose content	含水量/% Water content	发芽率/% Germination percentage	POD 活性/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹ FW) POD activity	SOD 活性/ (U · g ⁻¹ FW) SOD activity	蔗糖含量/% Sucrose content
1	—	—	—	—	—	2.03	68 b	0.91 b	153.39 bc	1.85 a
2	2.32	96 a	3.47 a	138.15 c	2.45 a	2.23	91 a	1.95 a	140.34 d	2.00 a
3	3.09	92 ab	3.43 a	146.85 c	2.31 ab	4.53	53 c	0 c	151.01 bcd	1.64 b
4	4.03	89 b	0.85 b	158.99 b	2.14 b	5.37	16 d	0 c	141.78 cd	1.49 b
5	5.31	33 c	0 c	162.46 ab	1.43 c	5.81	0 e	0 c	149.62 bcd	1.31 c
6	5.43	8 d	0 c	165.52 ab	1.03 d	6.40	0 e	0 c	176.87 a	0.48 d
7	7.12	0 e	0 c	173.24 a	0.33 e	6.72	0 e	0 c	157.14 b	0.38 d
8	—	—	—	—	—	7.60	0 e	0 c	175.10 a	0.39 d

注: 小写字母表示同一指标同一品种不同处理间的差异显著 ($\alpha = 0.05$)。

Note: The lowercase letters indicate significant difference analysis in the same index of the same variety with different treatments ($\alpha = 0.05$).

2.4 长期超干贮藏过程中不同年份之间生活力的变化趋势

2.4.1 长期超干贮藏过程中不同年份间种子含水量和发芽率的变化

以 ‘皖杂一号’ 种子为对象, 对各处理种子在不同年份含水量和发芽率的变化进行跟踪。如表 3 所示, 室温密闭贮藏 9 年 (2002)、15 年 (2008)、20 年 (2013) 和 23 年 (2016), 各处理种子的含水量基本一致。

2.4.2 长期超干贮藏过程中不同年份间种子生活力的变化情况

随着贮藏年份的延长, 种子含水量越高, 发芽率下降越快 (表 3)。含水量在 1.65% ~ 4.12% 区间, 随着年份的增加, 种子发芽率基本不变或略有下降; 当含水量为 5.22% 时, 密封贮藏 20 年 (2013) 后仍有较高的发芽率 (68%), 但继续贮藏至 23 年 (2016) 发芽率骤然下降, 仅为 33%; 而当含水量为 5.58% 时, 贮藏 23 年 (2016) 后发芽率仅为 8%, 当含水量超过 7% 时, 贮藏 9 年后就完全丧失了发芽力。

表 3 ‘皖杂一号’ 西瓜种子超干贮藏各年份含水量和发芽率的变化
Table 3 Changes of water content and germination percentage in different years of ‘Wanza 1’ seeds during the storage

处理 Treatment	含水量/% Water content					发芽率/% Germination percentage			
	2002	2008	2013	2016	平均 Average	2002	2008	2013	2016
1	1.69	1.65	1.60	—	1.65	96	95	96	—
2	2.13	2.24	2.33	2.32	2.26	96	96	96	96
3	2.61	2.66	2.62	3.09	2.75	95	93	91	92
4	4.17	4.12	4.14	4.03	4.12	93	89	88	89
5	5.12	5.25	5.25	5.31	5.22	85	74	68	33
6	5.66	5.63	5.61	5.43	5.58	74	45	24	8
7	7.61	7.63	7.47	7.12	7.46	0	0	0	0

3 讨论

本试验结果表明, 二倍体西瓜 ‘皖杂一号’ 和 ‘丰收 2 号’ 种子室内遮光密闭贮藏 23 年后,

在含水量较低的范围内,仍能保持较高的发芽率。在贮藏过程中,种子发芽率的高低与种子含水量有密切关系,含水量越高,就越容易丧失生活力。Eills等(1985, 1988, 1990)的研究表明,许多作物种子超干贮藏的最佳含水量为2%~6%,其对应的相对平衡湿度为9.9%~11.5%,随着种子含水量的进一步降低,生活力反而下降,这可能与干燥损伤、生物膜系统的破坏以及脂质过氧化加剧等密切相关。本试验中发现,在超干贮藏期间,‘皖杂一号’的最佳含水量为1.60%~4.17%,‘丰收2号’为2.23%。

种子含水量和贮藏温度是影响种子寿命长短的主要因素。本次试验种子存放地点位于浙江省杭州市区,气温变幅大,其中每年6—9月为高温高湿天气,对种子贮藏十分不利。但本次试验中发现,当西瓜种子含水量降低到一定的范围内时,高温及温度剧烈变化对种子贮藏的不利影响能够得以消除或部分克服,因而种子含水量可能是影响寿命长短的主导因素。

种子超干贮藏伴随着种子劣变,而种子劣变又伴随着种子内部生理生化反应的变化。大量研究表明,质膜受损是种子劣变期间发生的主要生理变化之一(Basavarajappa et al., 1991),并且会进一步引发膜系统中的脂质过氧化,产生丙二醛和挥发性醛等毒害物质(陆开形等, 2007)。华北驼绒藜种子随着贮藏时间的延长,丙二醛的含量逐渐增加,但超干种子的丙二醛含量显著低于对照(乌仁其木格和易津, 2003)。超干种子较强的抗老化能力与其相对较高的抗氧化酶系统密切相关,赵鹏等(2009)发现老化导致超干大豆种子的种胚和子叶中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的下降幅度小于未超干种子。本试验表明,经过超干贮藏的西瓜种子POD活性比未进行超干处理的种子高。并且POD活性与发芽率呈显著正相关,发芽率高的种子其POD活性也高。但本次试验同时发现,超干贮藏23年后,‘皖杂一号’和‘丰收2号’种子的SOD活性与种子发芽率却呈负相关,发芽率上升,SOD活性反而降低,这与胡伟民等(2002)在西瓜和朱诚等(2002)在花生上所做的试验结果不一致。SOD作为活性氧清除反应过程中第一个发挥作用的抗氧化酶,能将超氧自由基快速歧化为 H_2O_2 和分子氧(McCord & Fridovich, 1969),因此这可能与种子自然老化过程中生活力越低的种子其体内超氧自由基积累越多,当种子开始萌动时,SOD应激反应强烈等有关;但从本试验结果来看,与SOD代谢相关的下一个环节POD活性的变化却与发芽率的高低呈显著正相关,SOD代谢产生的 H_2O_2 等对机体有害的活性氧成分在低活力种子内仍然无法得以清除,而这方面的具体原因及其分子机理尚有待于进一步研究。

种子萌发时,贮藏物质在酶的作用下被水解为简单的有机物和其他营养物质,并运送到幼胚中,为胚生长及幼苗形成提供必需的营养物质和能量(Aoki et al., 2006)。而在种子吸水初始时,大分子的贮藏物质来不及降解,前人从萌发的大麦种子中发现,在其吸水6~9h内,蔗糖被大量动用(沈杰, 1995),同样,新鲜绿豆在萌发前期(3~9h)与糖类代谢相关的化合物——蔗糖、单糖、棉籽糖家族寡糖含量发生了显著改变(吴香玉, 2014)。因此认为在胚根突破种皮之前,主要是利用蔗糖等作为碳源和能量。本试验结果表明,西瓜干种子胚部蔗糖含量与种子发芽率成正相关,种子胚部蔗糖含量越高,胚根就越容易突破种皮完成发芽过程。

本试验采用自然老化的方法,分别在贮藏9年、15年、20年和23年进行种子含水量和发芽率等数据测定,在一定程度上可以反映西瓜种子在超干贮藏过程中生活力的变化趋势,适宜西瓜种子长期超干贮藏的最佳含水量可能为2.0%~4.0%。但是其最大贮藏年限以及对遗传物质的影响如何,还有待进一步探究。

References

- Androsova G N, Azhmukhamedova M A. 1986. Effect of prolonged storage of watermelon seeds on seed quality, development and yield. Sbornik Nauchnykh Trudov po Prikladnoi Botanike, Genetikei Seleksii, 102: 119 - 122.
- Aoki N, Scofield G N, Wang Xin-ding, Offler C E, Patrick J, Furbank R T. 2006. Pathway of sugar transport in germinating wheat seeds. Plant Physiology, 141 (4): 1255 - 1263.
- Basavarajappa B S, Shetty H S, Prakash H S. 1991. Membrane deterioration and other biochemical changes, associated with accelerated aging of maize seeds. Seed Science & Technology, 19 (2): 297 - 286.
- Cao Dong-dong, Hu Jin, Zhu Shui-jin, Hu Wei-min, Knapp A. 2010. Relationship between changes in endogenous polyamines and seed quality during development of *sh₂* sweet corn (*Zea mays* L.) seed. Scientia Horticulturae, 123 (3): 301 - 307.
- Chen Shu-ping, Hu Cheng-lian. 1992. Research on storage of ultra-dry seeds. Seed, 57 (1): 32 - 33. (in Chinese)
陈叔平, 胡承莲. 1992. 种子超干燥贮存研究. 种子, 57 (1): 32 - 33.
- Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. 1988. A low-moisture-content limit to logarithmic relations between seed moisture content and longevity. Annals of Botany, 61 (4): 405 - 408.
- Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. 1990. Moisture content and the longevity of seeds of *Phaseolus vulgaris*. Annals of Botany, 66 (3): 341 - 348.
- Ellis R H, Roberts E H. 1985. Logarithmic relationship between moisture content and longevity in sesame seeds. Annals of Botany, 57 (4): 499 - 503.
- Fursa T B, Zhukova N V. 1983. Viability of watermelon seeds under conditions of natural and accelerated aging. Trudy po Prikladnoi Botanike, Genetikei Seleksii, 81: 52 - 57.
- Hu Jin. 2014. Seed science. Beijing: China Agriculture Press: 430. (in Chinese)
胡晋. 2014. 种子学. 北京: 中国农业出版社: 430.
- Hu Wei-min, Duan Xian-ming, Ruan Song-lin. 2002. Effects of ultra-dry treatment and long-term storage on viability and vigor of corn and watermelon seeds. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science), 28 (1): 37 - 41. (in Chinese)
胡伟民, 段宪明, 阮松林. 2002. 超干水分长期贮藏对玉米、西瓜种子生活力和活力的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 28 (1): 37 - 41.
- Hu Xiao-rong, Lu Xin-xiong, Zhang Yun-lan, Zhang Zhi-e, Chen Xiao-ling, Xin Ping-ping. 2003. Studies on the genetic integrity of ultra-dry seed of wheat with AFLP markers. Journal of Plant Genetic Resources, 4 (2): 162 - 165. (in Chinese)
胡小荣, 卢新雄, 张云兰, 张志娥, 陈晓玲, 辛萍萍. 2003. AFLP 技术运用于小麦种子超干燥保存遗传完整性的初探. 植物遗传资源学报, 4 (2): 162 - 165.
- International Seed Testing Association. 1985. International rules for seed testing. Yan Qi-chuan, Bi Xin-hua. Trans. Beijing: Agriculture Press: 23 - 43. (in Chinese)
国际种子检验协会. 1985. 国际种子检验规程. 颜启传, 毕辛华译. 北京: 农业出版社: 23 - 43.
- Lin Jian, Zheng Guang-hua, Cheng Hong-yan. 1996. Studies on ultra-dry storage of *Eucommia* seeds. Chinese Bulletin of Botany, 13 (Supplement): 58 - 62. (in Chinese)
林坚, 郑光华, 程红焱. 1996. 超干贮藏杜仲种子的研究. 植物学通报, 13 (增刊): 58 - 62.
- Lu Kai-xing, Ren Xiao-mi, Zhu Cheng. 2007. Changes of storage tolerance and antioxidant metabolism in ultra-dried mung bean seeds. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 22 (2): 27 - 31. (in Chinese)
陆开兴, 任晓米, 朱诚. 2007. 超干绿豆种子耐贮藏性与抗氧化代谢的变化. 中国粮油学报, 22 (2): 27 - 31.
- Lü Xue-gao. 2008. Studies on the differences of yield and quality and their physiological mechanism for different plant-type varieties at different altitudes locations in maize (*Zea mays* L.) [M. D. Dissertation]. Chongqing: Southwest University. (in Chinese)
吕学高. 2008. 不同株型玉米在不同海拔地区籽粒产量、品质差异及其生理机理研究[硕士论文]. 重庆: 西南大学.
- McCord J M, Fridovich I. 1969. Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocyte hemocuprein (hemocuprein). Journal of Biological Chemistry, 244 (22): 6049 - 6055.
- Nerson H. 2002. Effects of seed maturity, extraction practices and storage duration on germinability in watermelon. Scientia Horticulturae, 93 (3 -

- 4): 245 - 256.
- Ozcoban M, Demir I. 2002. Longevity of pepper (*Capsicum annum*) and watermelon (*Citrullus lanatus*) seeds in relation to seed moisture and storage temperature. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 72 (10): 589 - 593.
- Qiu Jun, Wang Ren-min, Yan Ji-zhi, Hu Jin. 2005. Seed film coating with uniconazole improves rape seedling growth in relation to physiological changes under waterlogging stress. *Plant Growth Regulation*, 47 (1): 75 - 81.
- Ruan Song-lin, Hu Wei-min, Wang Hong-xiu, Yan Jian-fang, Shi Fen-hua. 1998. Effects of prestorage soaking and drying seed treatment on the ability of resistance to seed deterioration in hybrid rice. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 24 (6): 631 - 632. (in Chinese)
阮松林, 胡伟民, 王洪秀, 严见方, 施芬花. 1998. 贮前浸种回干对杂交水稻种子抗劣变能力的影响. *浙江农业大学学报*, 24 (6): 631 - 632.
- Shen Jie. 1995. Physiological changes of crop seed germination. *Agriculture and Technology*, (5): 25 - 27. (in Chinese)
沈杰. 1995. 作物种子萌发的生理变化. *农业与技术*, (5): 25 - 27.
- Wang Xiao-feng, Zheng Guang-hua, Yang Shi-jie, Jing Xin-ming. 1999. Studies on fluidity of the plasma membrane of ultra-dry storage seeds. *Chinese Science Bulletin*, 44 (7): 733 - 739. (in Chinese)
汪晓峰, 郑光华, 杨世杰, 景新明. 1999. 超干贮藏种子质膜流动性. *科学通报*, 44 (7): 733 - 739.
- Wuren Qi-muge, Yi Jin. 2003. Effects of ultra-dried and low-temperature storage conditions to the life and isozymes of *Ceratoides arborescens* seed. *Acta Agrestia Sinica*, 11 (2): 125 - 133. (in Chinese)
乌仁其木格, 易津. 2003. 超干燥和低温贮藏对华北驼绒藜种子劣变及同工酶的影响. *草地学报*, 11 (2): 125 - 133.
- Wu Xiang-yu. 2014. Dynamic metabonomics research for mungbean germination [Ph. D. Dissertation]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
吴香玉. 2014. 绿豆萌发的动态代谢组学研究[博士论文]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所.
- Zeng Li, Zhao Liang-jun, Sun Qiang, Xu Xiao-wei. 2006. Effects of ultradrying treatment and storage temperature on vigor and physiological changes of *Salvia splendens* seeds. *Scientia Agricultura Sinica*, 39 (10): 2076 - 2082. (in Chinese)
曾丽, 赵梁军, 孙强, 徐小微. 2006. 超干处理与贮藏温度对一串红种子生活力与生理变化的影响. *中国农业科学*, 39 (10): 2076 - 2082.
- Zhao Li, Lu Kai-xing, Zhu Cheng. 2009. Effects of ultra-dry treatment on anti-aging ability and antioxidative metabolism of soybean seed. *Soybean Science*, 28 (3): 450 - 455. (in Chinese)
赵鹏, 陆开形, 朱诚. 2009. 超干处理对大豆种子抗老化能力及抗氧化代谢的影响. *大豆科学*, 28 (3): 450 - 455.
- Zhu Cheng, Zeng Guang-wen, Zheng Guang-hua. 2000. The storage tolerance and lipid peroxidation in ultra-dried peanut seeds. *Acta Agronomica Sinica*, 26 (2): 235 - 238. (in Chinese)
朱诚, 曾广文, 郑光华. 2000. 超干花生种子耐藏性与脂质过氧化作用. *作物学报*, 26 (2): 235 - 238.