

# 小麦种子在不同保存条件下的生活力丧失特性研究

辛霞, 陈晓玲, 张金梅, 卢新雄

(中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

**摘要:**近年来种子在低温种质库和室温保存条件下的生活力丧失特性研究日益受到关注,但是与其重要性相比,目前很少有文献报道此方面进展。本研究监测了在中期库、室温和人工加速老化条件下小麦种子的生活力变化,以了解种子在这些保存条件下的生活力变化特性。结果表明,3种条件下所有种子的存活曲线均呈反S形,这种特点不受保存条件的影响。随着保存温度的降低,种子生活力丧失速度降低,反S形曲线的平台期和种子寿命延长。采用t检验来判断平台期和种子生活力快速下降期之间的转折点(Pt),发现小麦种子在不同条件下保存时,其Pt均十分接近,在82.2%~83.6%之间。同时还讨论了将Pt以及其他生理指标作为种子保存过程中生活力快速下降的预警指标的可能性。

**关键词:**种质保存;种子生活力;反S形曲线;预警指标;小麦

## Viability Loss of Wheat Seeds under Different Storage Conditions

XIN Xia, CHEN Xiao-ling, ZHANG Jin-mei, LU Xin-xiong

(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Seed viability loss at low temperature genebank and ambient storage received increasing concerns, but comparing with its importance, few publications dressed this question. In this paper, viability monitoring data of wheat (*Triticum aestivum* Linn.) seed from a midterm genebank, ambient storage, as well as an accelerated ageing experiment were quantified to get further understanding of seed ageing under these conditions. The results showed that seed longevity of all accessions followed normal distribution, and seed survival curves showed inverse-S curve, which received no obvious effects from storage conditions. The rate of seed viability loss decreased, and the plateau phase and seed longevity increased as the storage temperature reduced. t-test was adapted to determine the turning point (Pt) between the plateau phase and viability sharp decline phase of the seed survival curve. The results showed that the Pt under different storage conditions were quite close, which varied between 82.2% and 83.6%. The possible role of Pt and some physiological indexes as indicators for seed viability loss during germplasm storage were discussed.

**Key words:** seed storage; seed viability; inverse-S curve; early warning indicators; *Triticum aestivum*

自1958年第1座国家级低温种质库在美国建立以来,全球已经建成1750座种质库,保存种质数量已经达到740万份<sup>[1]</sup>。低温种质库保存可有效延长种子寿命,但却不能完全阻止种子生活力下降<sup>[2-3]</sup>。据报道,在美国国家植物种质保存中心,大约4.2万份种子在保存了38年(平均值)后,平均发芽率从初始的91%降低到55%<sup>[4]</sup>。在德国的Gatersleben种质库,部分种子在保存不到15年时间里,发芽率就已经

降至15%以下<sup>[5]</sup>。同样,在波兰国家植物遗传资源中心保存10年的4000份小麦种子中,有160份种子的发芽率下降到80%以下<sup>[6]</sup>。在我国国家种质库保存的种子的初始发芽率均高于90%,调查了1.4万余份种子保存20年后的发芽率,发现其中有约1.1%的种子的发芽率降低到70%以下<sup>[7]</sup>,发芽率显著降低的种子的比例相比保存10年<sup>[8]</sup>的监测结果增加了0.6%。由此可见,低温种质库中种子的安全保存面

收稿日期:2013-01-25 修回日期:2013-02-27 网络出版日期:2013-06-07

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20130607.1739.014.html>

基金项目:“十二五”科技支撑计划(2013BAD01B01);农业部农作物种质资源保护利用专项资助项目(NB08-2130135)

第一作者研究方向为种质资源保存。E-mail: xinxia@caas.cn

通信作者:卢新雄,硕士,研究员,研究方向为种质资源保存。E-mail: luxinxiong@caas.cn

临严峻挑战。深入了解种子生活力丧失特性有助于实现种质资源的长期安全保存。

以往基于高温和(或)高湿加速老化研究结果表明,典型的种子老化曲线呈反 S 形,即在开始阶段有一个平台期,而后种子生活力快速下降,最后种子缓慢死亡<sup>[3,9-16]</sup>。为确保种质库低温条件下的安全保存,需要了解种子在低温条件下的存活曲线是否也呈反 S 形。若呈反 S 形,则需要知道种子生活力快速下降的起始点,以及可以标识种子进入生活力骤降阶段的生理指标。然而,目前尚缺乏相关报道。因此本研究分析了中期库、室温保存以及高温加速老化条件下小麦种子的生活力监测数据,了解种子在这些条件下的生活力丧失特性,为确立种质衰老预警指标提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料和保存方法

1.1.1 低温保存 低温保存的数据来自中期库存种质生活力监测数据库。中期库保存温度为 0 ~ 10 ℃。数据为种质库保存 2 ~ 20 年的 378 份小麦种子的生活力监测数据。这些品种在 1981 年至 1999 年间收集并保存,并于 2001 年进行生活力监测,即最长保存时间已达 20 年。参照 C. Walters 等<sup>[4]</sup>对美国植物遗传资源保存中心数据的分析方法,将同一年收集保存种质的监测数据进行平均,以获得小麦种子在低温保存的存活曲线。

1.1.2 室温保存 2 份小麦品种中麦 9 号和 891-3-4 种子,用铝箔袋密封包装后在江西南昌和海南三亚室温保存,两地年均温分别为 17.6 ℃和 25.0 ℃。试验始于 1997 年,每年监测一次生活力。

1.1.3 加速老化 39 份小麦种子,用铝箔袋密封包装后在 40 ± 1 ℃恒温箱中存储。试验始于 2002 年,每 2 个月监测一次种子生活力直至种子死亡(或者试验种子用完)。

以上所有种子的初始发芽率均高于 90%。

1.2 种子生活力监测

参照 ISTA<sup>[17]</sup>颁布的标准进行发芽试验,记录种子首次发芽时间和逐日发芽数,计算种子发芽率(G)、发芽势(G<sub>p</sub>, germination power)和发芽指数(G<sub>i</sub>, germination index),计算公式如下:

G<sub>p</sub> = 第 4 天发芽种子数/总数 × 100%,

$$G_t = \sum \frac{G_t}{D_t},$$

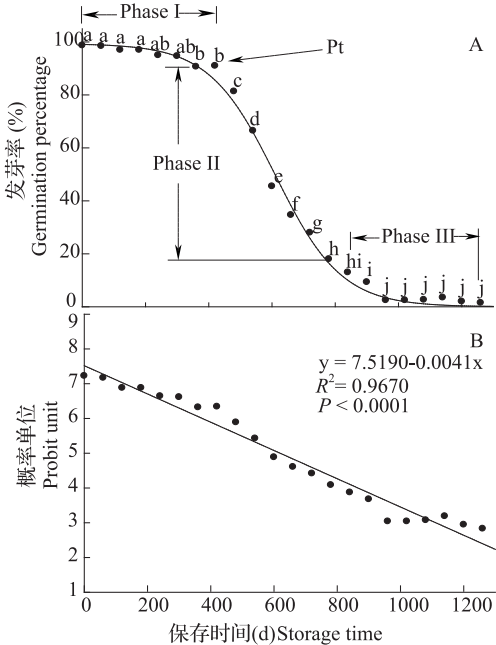
其中 G<sub>t</sub> 代表 t 天的发芽数, D<sub>t</sub> 代表发芽天数。每个

发芽率检测至少重复 3 次,每重复 50 粒种子。

1.3 种子生活力下降指标测定

测定指标包括:种子存活曲线的平台期(Phase I)、生活力骤降期(Phase II)和保存寿命期(Phase III),以天(d)表示;种子存活曲线中 Phase I 和 Phase II 之间转折点的发芽率(P<sub>t</sub>);种子生活力在 Phase II 和整个存活期的下降速度,分别以 R<sub>II</sub> 和 R 表示。

对种子发芽率数值进行 t 检验(SPSS 13.0),若两次相邻监测间的 P 值小于 0.05,则表示发芽率间差异有统计学意义,若这种差异持续,则表明种子处于 Phase II。Phase I 和 Phase II 之间的转折点标记为 P<sub>t</sub>(图 1A)。如图 1A 所示,Phase I 是存活曲线的平台期,该阶段种子生活力下降速度十分缓慢;在 Phase II 死亡种子比例快速增加;到最后群体中所剩少数寿命较长的种子开始慢慢死亡。



A:小麦品种 6172 在 40 ℃下的种子存活曲线,字母标记为 t 检验结果,不同字母表示数据间差异有统计学意义(P < 0.05)。B:种子发芽率百分数经概率单位转换后对保存时间作散点图,并进行线性拟合。可以看到 R<sup>2</sup> = 0.9670, P < 0.0001,因此可以通过概率单位转换将反 S 形的存活曲线转化成直线,从而得出种子的老化速率和保存寿命

A:The survival curve of wheat variety 6172 stored under 40 ℃. The difference between two adjacent monitored germination percentages were analyzed using t-test. The points marked with different letters are significantly different (P < 0.05). B:Scatter diagram of probit germination percentages against storage time. Linear fitting showed R<sup>2</sup> = 0.9670, P < 0.0001. Therefore, seed ageing rate and storage longevity could be obtained by converting the survival curve into a straight line

图 1 种子存活曲线 P<sub>t</sub>(A) 和老化速率 (B) 示意图  
Fig.1 Determination of P<sub>t</sub> and the three phases of a survival curve(A) and seed ageing rate(B)

在种子存活曲线的 Phase II 阶段,将种子发芽率和保存时间进行线性拟合,其方程系数即  $R_{II}$ ,单位为发芽率/天(G/d)。种子的寿命和 R 的计算则需要进行发芽率百分数的概率单位转换后对保存时间进行线性拟合<sup>[18]</sup>(图 1B),自变量系数即老化速率 R,单位为概率单位/天(probit unit/d),半致死时间即该批种子的寿命,可由图 1B 中线性回归方程计算获得。

### 1.4 数据分析

利用 SPSS 13.0 软件对数据进行 t 检验和单样本 K-S 检验(one-sample Kolmogorov-Smirnov test)。其中单样本 K-S 检验是用于检验种子寿命数据是否服从正态分布,若  $P$  值大于 0.05 则认为服从正态分布。采用 SigmaPlot 10.0 软件对种子存活曲线进行 Sigmoid 拟合, $P$  值小于 0.05 者为有效拟合。

表 1 小麦种子在 40 ℃下种子寿命单样本 K-S 检验结果

Table 1 One-sample K-S test on normal-distribution of wheat seeds stored at 40 ℃

| 品种<br>Varieties | 单样本 K-S 检验 $P$ 值 $P$ value of one-sample K-S Test |          | 品种<br>Varieties | 单样本 K-S 检验 $P$ 值 $P$ value of one-sample K-S Test |          |
|-----------------|---|----------|-----------------|---|----------|
|                 | 全数据 Full Data                                     | 5% ~ 95% |                 | 全数据 Full Data                                     | 5% ~ 95% |
| 449             | 0.703   | 1.000    | 晋麦 46           | 0.239   | 0.733    |
| 4185            | 0.062   | 0.727    | 克丰 6 号          | 0.161   |          |
| 5022            | 0.113   | 0.392    | 陇春 15 号         | 0.494   | 0.774    |
| 5099            | 0.089   | 0.982    | 陇春 17 号         | 0.522   | 0.964    |
| 6172            | 0.421   | 0.779    | 陇春 20 号         | 0.524   | 0.450    |
| 8901            | 0.672   | 0.984    | 陇春 21 号         | 0.287   | 0.845    |
| 121-4           | 0.146   | 0.524    | 龙辐麦 7 号         | 0.597   |          |
| 125-A2          | 0.368   | 0.833    | 龙辐麦 8 号         | 0.364   | 0.731    |
| 98-6 系          | 0.269   | 0.656    | 龙麦 26           | 0.377   |          |
| 99 品 15         | 0.131   | 0.535    | LS96-2          | 0.238   | 0.775    |
| 99 品 5          | 0.223   | 0.325    | 内乡 188          | 0.194   | 0.311    |
| 99 云 27         | 0.213   | 0.593    | 石 4185          | 0.654   | 0.680    |
| 99 云-30         | 0.275   | 0.806    | 新春 6 号          | 0.345   | 0.775    |
| 99-29           | 0.359   | 0.643    | 新春 9 号          | 0.301   | 0.948    |
| 99-87           | 0.169   | 0.319    | 豫 34            | 0.169   | 0.161    |
| 99 鉴 45         | 0.292   | 0.599    | 豫尺              | 0.761   | 0.853    |
| 核生 2 号          | 0.223   | 0.291    | 豫 18            | 0.229   | 0.561    |
| 冀 38 新系         | 0.149   | 0.269    | 99G65           | 0.038   | 0.777    |
| 京冬 8 号          | 0.367   | 0.846    | 陇春 16 号         | 0.036   | 0.298    |
| 京优              | 0.226   | 0.346    |                 |   |          |

通过单样本 K-S 检验, $P>0.05$  则认为数据服从正态分布;全数据;指所有发芽率数值;5% ~ 95% ;指只选取在该范围的发芽率数据进行单样本 K-S 检验;空白单元格表示全数据均在 5% ~ 95% 范围。下同

Normal-distribution is tested by one-sample K-S test,and data follow normal-distribution when  $P>0.05$ 。Full data;all data tested,5% -95% ;G only more than 5% and less than 95% were tested,Blank cell means full data are in the range of 5% -95% . The same as below

## 2 结果与分析

### 2.1 种子寿命的正态分布检验和存活曲线

对 40 ℃ 条件下的 39 份小麦种子发芽率的全部数据进行正态分布检验,结果发现除陇春 16 号和 99G65 两份材料外,其余 37 份小麦种子的  $P$  值均大于 0.05(表 1),说明多数品种的寿命符合正态分布。而若截取 5%~95% 范围内的数据进行检验,则所有品种均服从正态分布,说明在此范围内的数据更符合正态分布。对三亚和南昌两地室温保存的 2 份小麦以及中期库保存的 378 份小麦生活力的单样本 K-S 检验结果表明室温和低温保存种子的寿命也服从正态分布(表 2)。这些结果说明,无论是高温加速老化、低温保存还是变温保存,种子寿命的分布都服从正态分布。

表 2 小麦种子在室温下种子寿命单样本 K-S 检验结果

Table 2 One-sample K-S test on normal-distribution of wheat seeds stored at room temperature

| 品种<br>Varieties | 三亚 Sanya  |          | 南昌 Nanchang |          |
|-----------------|-----------|----------|-------------|----------|
|                 | 全数据       | 5% ~ 95% | 全数据         | 5% ~ 95% |
|                 | Full Data |          | Full Data   |          |
| 891-3-4         | 0. 641    | 0. 961   | 0. 609      | 0. 866   |
| 中麦 9 号          | 0. 654    | 0. 662   | 0. 899      |          |

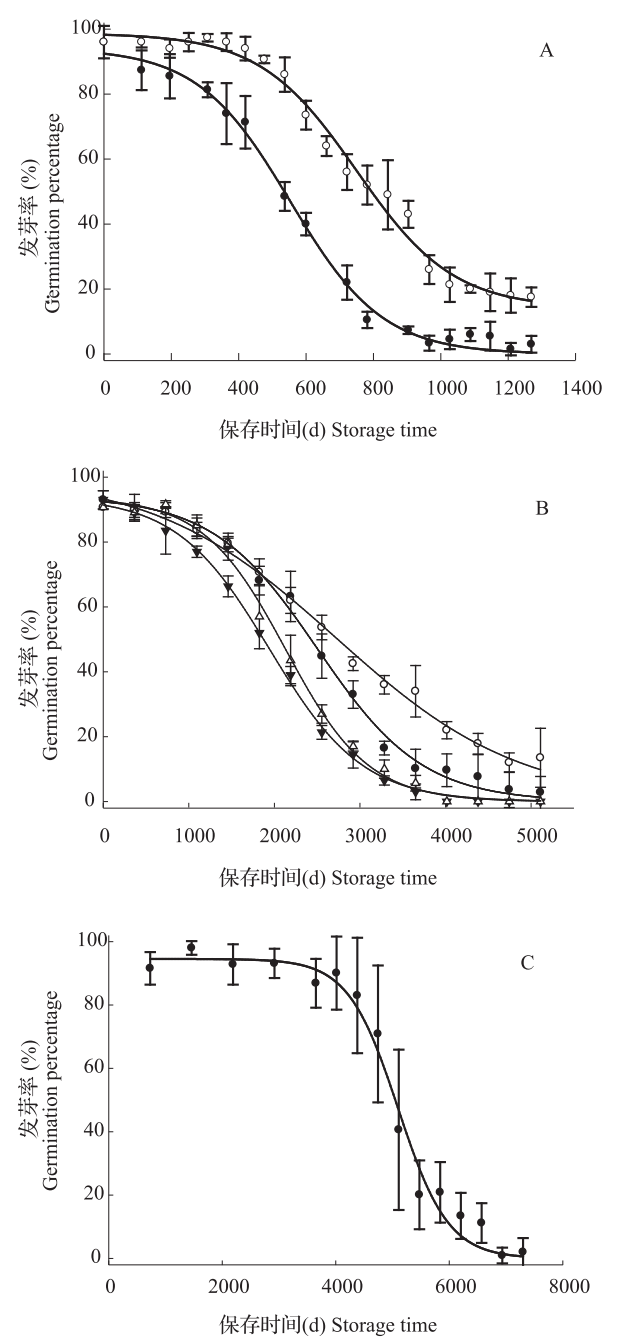
上述种子老化过程中生活力的下降并非随时间等速率下降,存活曲线经肉眼判断多数呈反 S 形(图 1、2)。对上述条件下的所有全数据服从正态分布的品种均进行 Sigmoid 拟合(图 2),结果所有拟合的  $R^2$  均大于 0. 9,  $P$  值均小于 0. 0001。而对于全数据不服从正态分布的陇春 16 号和 99G65,对其 5%~95% 间的数据进行 Sigmoid 拟合,也获得一致结果。这些结果说明 3 种条件下的所有小麦种子的存活曲线均可进行有效的曲线拟合,即种子存活曲线均为反 S 形,暗示种子存活曲线类型不受保存条件影响。这与前人对玉米的研究类似,S. Tang 等<sup>[15]</sup>研究了不同保存条件下玉米种子的存活曲线,认为种子存活曲线类型不受诸如保存温度、种子含水量、起始发芽率、生活力监测和取样间隔等因素的影响,均呈反 S 形。然而,也有人因为种子在十分严酷环境下保存时平台期会大大缩短甚至消失,从而认为种子存活曲线类型会受保存条件的影响<sup>[14]</sup>。

2.2 种子保存过程中的生活力下降转折点、老化速率和保存寿命

小麦种子在 40 ℃、中期库、三亚室温和南昌室温保存的起始发芽率虽然有些差别(91. 8%~98. 0%),但其存活曲线的变化趋势一致,各曲线 Phase I 和 Phase II 之间转折点(Pt)的发芽率相对较为接近,分别是 83. 6%、83. 0%、82. 2%和 82. 5%(表 3)。

种子生活力下降的速度随着种子保存条件温度的降低而减小。例如,小麦在 40 ℃的平均寿命为 711 d,而在中期库保存的寿命则可达 4824 d(表 3)。种子在 Phase II 的生活力下降速度( $R_{II}$ )明显高于整个生命期的下降速度( $R$ )。

小麦种子在 40 ℃保存 402 d 后生活力开始快速下降,而在中期库保存时的 Pt 则出现于 4015 d(表 3),即 Phase I 随着保存温度的降低而延长。由此可见,在 40 ℃、三亚室温和南昌室温保存时的首次生活力监测可以分别在保存后 400 d、600 d 和 800 d



A: 小麦 40 ℃ 下的存活曲线,品种为晋麦 46(●)和新春 9 号(○);  
B: 小麦在南昌(●,○)和三亚(▲,△)室温的存活曲线,品种为中麦 9 号(○,△)和 891-3-4(●,▲);  
C: 小麦在低温库保存 20 年的存活曲线  
A: The survival curves of wheat seeds stored at 40 ℃, and the varieties are Jinmai 46(●)and Xinchun 9(○), B: The survival curves of wheat seeds stored at room temperature in Nanchang(●,○) and Sanya(▲,△), and the varieties are Zhongmai 9(○,△) and 891-3-4(●,▲), C: The survival curves of wheat seeds stored in the low temperature genebank for 20 years

图 2 小麦种子在不同条件下的存活曲线

Fig. 2 Survival curves of wheat seeds stored under different conditions



表 3 种子在不同条件下保存相关指标比较

Table 3 Comparison of seed ageing under different storage conditions

| 指标<br>Indicators | 保存条件 Storage condition |                                   |                                      |                                |
|------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
|                  | 40 ℃                   | 三亚室温<br>Sanya room<br>temperature | 南昌室温<br>Nanchang room<br>temperature | 中期库<br>Medium-term<br>Genebank |
| G0               | 94.6                   | 91.8                              | 91.8                                 | 98                             |
| Pt               | 83.6                   | 82.5                              | 82.2                                 | 82.5                           |
| Phase I (d)      | 402                    | 608                               | 791                                  | 4015                           |
| Longevity (d)    | 711                    | 1597                              | 2628                                 | 4824                           |
| R <sub>II</sub>  | 0.1702                 | 0.7590 × 10 <sup>-1</sup>         | 0.5700 × 10 <sup>-1</sup>            | 0.4420 × 10 <sup>-1</sup>      |
| R                | 3.3 × 10 <sup>-3</sup> | 1.3 × 10 <sup>-3</sup>            | 0.7 × 10 <sup>-3</sup>               | 0.6 × 10 <sup>-3</sup>         |

G0:初始发芽率;Pt:存活曲线第1和第2阶段的转折点;Phase I即第1阶段;Longevity:种子寿命,即半活期;R<sub>II</sub>和R分别指在第2阶段和整个存活曲线中,种子生活力下降速度,下同

G0:initial germination percentage,Pt:the turning point between Phase I and II,Longevity:seed ageing,R<sub>II</sub> and R,rate of viability reduction during Phase II and whole lifespan,the same as below

进行。根据FAO/IPGRI<sup>[19]</sup>颁布的“基因库标准(Genebank Standards)”,中期库的生活力监测可5年1次,监测间隔可视种子起始发芽率和保存环境而延长或者缩短。本研究研究结果则表明中期库保存小麦种子的首次生活力监测则可推迟至保存11年时,既可以节省人力物力,也有助于减少对库存种子的浪费。另外,本研究认为除了考虑种子起始发芽率和保存环境这2个因素外,种子生活力监测间隔还应根据保存过程中的生活力变化进行适时调

表 4 小麦 98-6 系品种在 40 ℃ 的 G、Gp、Gi 和萌发时间

Table 4 Changes of G,Gp,Gi,and germinating time of variety 98-6 during storage at 40 ℃ condition

|         | G0         | A           | Pt         | B           | C           | D         | E         |
|---------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| G       | 98.0 ± 1.6 | 97.0 ± 2.0  | 93.5 ± 1.9 | 75.3 ± 11.0 | 48.0 ± 15.5 | 3.0 ± 1.4 | 2.5 ± 2.5 |
| Gp      | 98.0 ± 1.6 | 81.0 ± 14.3 | 73.0 ± 5.3 | 34.5 ± 7.2  | 1.0 ± 1.2   | 1.0 ± 1.2 | 0.5 ± 1.0 |
| Gi      | 16.3 ± 0.2 | 12.7 ± 0.9  | 11.6 ± 0.2 | 7.8 ± 1.2   | 4.3 ± 1.4   | 0.2 ± 0.2 | 0.3 ± 0.2 |
| Time(d) | 2.87       | 2.95        | 2.92       | 3.03        | 3.05        | 3.63      | 4.3       |

A和B分别是Pt前后的点;C:50%存活率;D和E分别指曲线的第2阶段和整个曲线的终点;时间为从吸胀开始到第1粒种子萌发的时间。表中数据为平均值±标准偏差

A and B:the point before and after Pt,C:50% survival rate,D and E:the end of phase II and the survival curve,time was taken from imbibition to germinating. Data are mean ± standard deviation

由表4可见,在Phase I(G0至A点)种子发芽率没有明显的变化,而Gp和Gi则已经显著降低。在B点,种子发芽率为75.3%,但其Gp和Gi则分别降低至34.5%和7.8;而当发芽率降低至48.0%时,Gp则已降至1.0%。由此,与发芽率相比,Gp和Gi对老化更为敏感。另外,随着种子生活力下降,

整。由于种子生活力在Phase II阶段会快速下降,若检测发芽率降低到82.8% ± 0.6%(小麦种子在3种条件下Pt的平均值)时,生活力监测间隔应大大缩短。若2次相邻监测数值间差异有统计学意义(t检验),种子则可能很快会进入Phase II,此时需要考虑繁殖更新。本研究结果也表明保存环境会影响种子老化速率、Phase I和寿命长短,但对种子生活力变化模式无影响。因此,Phase I和Phase II之间的转折点应被视为种子的生物学特性,并不受保存环境影响。所以82.8%发芽率可以用作不同保存条件下种子生活力快速下降的预警指标,但其机制需要进一步研究。

2.3 种子生活力下降的其他预警指标

目前各地种子库均只能采用发芽方法检测种子生活力。通常用发芽势和发芽率评价种子质量。然而据报道,在种子芽率仍然较高时,其活力<sup>[20-22]</sup>和田间出苗率<sup>[20-24]</sup>则可能大幅降低。为更清楚了解种子老化特性,从种子存活曲线上取几个关键点,组成简化的曲线,分析各点的首次发芽时间、发芽势、发芽指数等指标。关键点包括:初始发芽率(G0)、Pt及其前后一点(分别记为A和B)、50%存活(C)以及Phase II和Phase III的终点(分别记为D和E)。以40 ℃的小麦98-6系为例,将结果列入表4。结果表明种子从吸胀到萌发的时间随着发芽率的降低而延长,起始发芽时间是2.87 d,而到生活力降至Phase II结束时则延长至3.63 d(表4)。

Gp、G和Gi 3个指标的重复性变差,变异系数(标准偏差/平均值)增加(表4),尤其是在Phase II(B点至D点)。这些结果也证实了种子活力先于种子生活力下降<sup>[20-21]</sup>,而且种子保存过程中生活力丧失的预警需要多指标组合共同判定。因此需要进一步研究,以探究多指标的预警体系,例如结合种子挥发性

气体<sup>[25-26]</sup>和液体粘粘特性(vistoelastic properties)<sup>[27]</sup>等方法。多指标预警体系的构建将有效提高对库存种子生活力的动态监测能力,确保库存种质的安全保存,并且可以有效减轻库存种子生活力监测工作。另外,如果能够构建实用的生活力无损检测技术,则可以减少对库存种子量和种质库人力物力的消耗。

3 讨论

根据上述结果,无论种子保存在低温、室温还是高温条件下,其保存寿命均服从正态分布,其存活曲线均呈反S形,服从Sigmoid拟合;在种子存活曲线中存在生活力快速下降的过程,其转折点不受保存条件影响。随着保存温度下降,在其生活力快速下降阶段和整个存活期间的生活力下降速度减缓,同时其平台期和寿命延长。在中期库保存的小麦种子,发芽率从98%降低到转折点(约83%),大约需要11年时间。若监测发芽率降低到83%左右,并且伴随着其发芽势、发芽指数以及重复间一致性的降低,变异系数的显著增加,应缩短监测频率,及时安排种子繁殖更新。

致谢:本研究40℃条件下39份材料由本所李立会研究员提供,在此表示感谢。

参考文献

[1] FAO. Draft second report on the state of the world's plants genetic resources for food and agriculture[M]. Rome: Intergovernmental Technical Working Group on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture, 2009: 51-89

[2] Walters C. Understanding the mechanisms and kinetics of seed aging[J]. Seed Sci Res, 1998, 8: 223-244

[3] Caid H S, Ecchemmakh T, Elamrani A, et al. Alterations occurring during accelerated ageing of winter wheat[J]. Cahiers Agric, 2008, 17: 39-44

[4] Walters C, Wheeler L M, Grotenhuis J M. Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics[J]. Seed Sci Res, 2005, 15(1): 1-20

[5] Specht C E, Keller E R J, Freytag U, et al. Survey of seed germinability after long-term storage in the Gatersleben genebank[J]. Plant Genet Newsl, 1997, 111: 64-68

[6] Chojnowski M. Viability of winter wheat(*Triticum aestivum* L.) seeds stored at the National Centre for Plant Genetic Resources, Ploand[J]. Polish J Natural Sci, 2008, 5(S): 265

[7] 辛霞,陈晓玲,张金梅,等. 国家库贮藏20年以上种子生活力与田间出苗率监测[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(6): 934-940

[8] 卢新雄,崔聪淑,陈晓玲,等. 国家种质库部分作物种子生活力检测结果与分析[J]. 植物遗传资源学报, 2001, 2(2): 1-5

[9] Harrington J F. Biochemical basis of seed longevity[J]. Seed Sci Technol, 1973, 1: 453-461

[10] Ellis R H, Roberts E H. Improved equations for the prediction of seed longevity[J]. Ann Bot-London, 1980, 45: 13-30

[11] Ellis R H, Roberts E H. The influence of temperature and moisture on seed viability period in barley(*Hordeum distichum* L.) [J]. Ann Bot-London, 1980, 45: 31-37

[12] Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. Logarithmic relationship between moisture content and longevity in sesame seeds[J]. Ann Bot-London, 1986, 57: 499-503

[13] Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. The low-moisture-content limit to the negative logarithmic relation between seed longevity and moisture content in three subspecies of rice[J]. Ann Bot-London, 1992, 69: 53-58

[14] Bernal-Lugo I, Leopold A C. The dynamics of seed mortality[J]. J Exp Bot, 1998, 49: 1455-1461

[15] Tang S, TeKrony D M, Egli D B, et al. Survival characteristics of corn seed during storage: I. Normal distribution of seed survival[J]. Crop Sci, 1999, 39: 1394-1400

[16] Tang S, TeKrony D M, Egli D B, et al. Survival characteristics of corn seed during storage: II. Rate of seed deterioration[J]. Crop Sci, 1999, 39: 1400-1406

[17] ISTA. International rules of seed testing[J]. Seed Sci Technol, 1985, 13: 299-355

[18] Finney D J. Probit Analysis[M], 3rd edn. Cambridge: Cambridge University Press, 1971: 333

[19] FAO/ IPGRI. Genebank standards[M]. Rome: FAO/ IPGRI, 1994: 7-8

[20] 陶嘉龄,郑光华. 种子活力[M]. 北京: 科学出版社, 1991

[21] Walters C, Rao N K, Hu X R. Optimizing seed water content to improve longevity in ex situ genebanks[J]. Seed Sci Res, 1998, 8(S): 15-22

[22] 卢新雄,陈晓玲. 水稻种子贮藏过程中生活力丧失特性及预警指标的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(8): 975-979

[23] 卢新雄,崔聪淑,陈晓玲,等. 小麦种质贮藏过程中生活力丧失特性及田间出苗率表现[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 220-224

[24] Hampton J G, Coolbear P. Potential versus actual seed performance-can vigor testing provide an answer[J]. Seed Sci Technol, 1990, 18: 215-228

[25] Zhang M, Maeda Y, Furihata Y, et al. A mechanism of seed deterioration in relation to the volatile compounds evolved by dry seeds themselves[J]. Seed Sci Technol, 1994, 4: 49-56

[26] Zhang M, Maeda Y, Furihata Y, et al. Enzymatic conversion of volatile metabolites in dry seeds during storage[J]. Plant Cell Physiol, 1995, 36: 157-164

[27] Walters C. Biophysical approaches to measure and predict seed longevity[J]. Polish J Natural Sci, 2008, 5(S): 88