

# 一个预测贮藏在低温种质库的小麦种子寿命的方程

伍少云,周国雁

(云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所/云南省农业生物技术重点实验室  
/农业部西南作物基因资源与种质创制重点实验室,昆明 650223)

**摘要:**为探讨将种子发芽率百分数转化为存活比,促使种子存活曲线变成直线,并用于预测种子寿命的可行性,3个含水量水平的3种小麦8个种子批的种子被贮藏在20℃、30℃和40℃的温度下长达810d,以获取发芽率和贮藏时间的成套数据。比较了概率、存活比与贮藏时间绘制的种子存活曲线、构建的概率回归和存活比线性回归方程的拟合性,并利用逐步回归法分析了贮藏温度、种子含水量及其交互作用对种子平均寿命和死亡时间分布标准差的影响。结果表明,与概率值相比,存活比更容易将种子存活曲线转变成直线,与贮藏时间的线性回归方程的拟合性也优于概率回归方程;贮藏温度和种子含水量的交互作用是影响小麦种子平均寿命和死亡时间分布标准差的主要因素,其作用也大于独立的温度、种子含水量、温度平方和种子含水量的对数。在此基础上,建议将Ellis和Roberts活力模型改写成 $V_i = K_i - p/10^{K-C_{WT}(t \times m)}$ 和 $G_i/G_0 = A - p/10^{K-C_{WT}(t \times m)}$ ,并比较了两者的对贮藏低温种质库的普通小麦种子的贮藏时间和发芽率的预测准确性,结果后者预测的分布在“观察值±观察值×10%”范围的贮藏时间和发芽率分别是前者的2倍和3.5倍,证明用后者预测贮藏在低温种质库的普通小麦种子的寿命和发芽率,尤其发芽率是适合的。

**关键词:**种子寿命;预测方程;低温种质库;小麦

## An Equation of Predicting Longevity of Wheat Seeds Stored at Low-temperature Genebank

WU Shao-Yun, ZHOU Guo-yan

(Biotechnology and Germplasm Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences/Yunnan Provincial Key Lab of Agricultural Biotechnology/Key Lab of Southwestern Crop Gene Resources and Germplasm Innovation, Ministry of Agriculture, Kunming 650223)

**Abstract:** For exploring the feasibility that seed survival curve were transformed into line by survivor proportion of germination percentage transformed, and that survivor proportion were used to predict longevity of seed, data sets of germination percent and storage time were obtained of wheat seeds of 8 seed lot of 3 species stored at 20℃, 30℃ and 40℃ up to 810 d with 3 levels of seed moisture content. Seed survival curve which drawn with probability and survival proportion against storage time and fitting between regression equation of the probability and survival proportion against storage time were compared, impact of storage temperature, seed moisture content and their interaction on mean viability period and standard deviation of seed depth distribution in time were analyzed using stepwise regress analysis method. The result showed that survivor proportion were easier than probability for seed survival curve were transformed into line, the fitting of liner regression equation of it against storage time were also better than regression equation of probability against storage time. Interaction between storage temperature and seed moisture content were mainly factor influencing mean longevity of seed lot and standard deviation of seed depth distribution in time, its action were also bigger than independent storage temperature, seed moisture content, quadratic term

收稿日期:2013-03-28 修回日期:2013-04-28 网络出版日期:2013-10-23

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20131023.1508.003.html>

基金项目:种质资源中期库运转、资源收集保存更新及种质创制(YAAS2012ZY011)

第一作者主要从事种质资源的保存与种质创新研究。E-mail: caiyunwu205cn@aliyun.com

of temperature and logarithm of seed moisture content. Based on the result, it was suggested that Ellis and Roberts viability model were rewritten as  $V_i = K_i - p/10^{K-C_{WT}(t \times m)}$  and  $G_i/G_0 = A - p/10^{K-C_{WT}(t \times m)}$ . Veracity of storage time and germination percent of common wheat of seed lot stored at low temperature genebank they predicted were compared. The result indicated that storage time and germination percent distributing at a range of "observed  $\pm$  observed  $\times 10\%$ " by latter predicted were 2 times and 3.5 times of by former predicted, respectively. Proving latter were fitted to predict storage time and germination percent of common wheat of seed lot stored at low temperature genebank, especially germination percent.

**Key words:** seed longevity; predict equation; low temperature genebank; wheat

前人的研究表明,在一个群体内正常型种子的个体存活期分布不仅可由负积累的正态分布描述,而且这个分布的时间范围与群体平均活力期(平均寿命  $p50$ )是成比例的,影响个体种子存活期的贮藏温度( $t, ^\circ\text{C}$ )、种子含水量( $m, \%$ )和群体平均寿命的对数( $\log p50$ )是简单的负直线关系<sup>[1]</sup>,即  $\log p50 = K_v - C_1 t - C_2 m$  (1),也就是  $t$  和  $m$  之间没有影响种子生活力的交互作用,并为贮藏在任一环境下的种子建立了预测其寿命的改进活力方程<sup>[2]</sup>,即  $V_i = K_i - p/10^{K_E - C_W \log m - C_H t - C_Q t^2}$  (2)。式中的  $K_v$  和  $K_i$  是方程的常数截距,  $C_1$  和  $C_2$  分别是温度和种子含水量对  $\log p50$  的简单回归系数,  $V_i$  为种子在贮藏时间  $p$  (d) 的发芽率百分数概率,  $K_E$ 、 $C_W$ 、 $C_H$  和  $C_Q$  为物种常数。根据不同的研究目的,方程(2)又可被改写成  $V_i = K_i - (1/\delta)p$  (3) 和  $\log \delta = K_E - C_W \log m - C_H t - C_Q t^2$  (4)。这两个方程中的  $\delta$  为群体中个体种子死亡时间分布的标准差(d),  $1/\delta$  为种子在贮藏过程中的衰退率。前者用于估算种子批或品种的平均寿命和标准差,后者用于测定物种常数。尽管,自方程(2)问世以来,已在大麦和小麦<sup>[3]</sup>、黑麦、小黑麦<sup>[4]</sup>、水稻<sup>[5]</sup>、樟子松和油松<sup>[6]</sup>等几十个重要农业物种中被利用,并对种子贮藏寿命的研究产生了重要影响,但至少存在如下的不足而受到质疑:(a) 它适用的温度和种子含水量的范围是  $-20 \sim 90 ^\circ\text{C}$  和  $5\% \sim 25\%$ , 因而不推荐用它来预测贮藏在  $-20 ^\circ\text{C}$  以下的种子寿命<sup>[2]</sup>。因为如果将大麦种子贮藏在  $-93.4 ^\circ\text{C}$ , 它的  $(-C_H t) + (-C_Q t^2)$  项等于 0, 进一步降低贮藏温度, 预测到的大麦种子寿命反而是减少的<sup>[2]</sup>。因此, 温度平方项的适宜范围是  $20 \sim 40 ^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>。(b) 它也可能不适用于预测有休眠特性<sup>[2]</sup> 或初始生活力较低的种子、禾本科牧草种子<sup>[8]</sup>, 甚至玉米<sup>[9]</sup> 和大豆<sup>[10]</sup> 种子的贮藏寿命。(c) 它的物种常数需要在不同贮藏温度和种子含水量的组合(贮藏环境)中被测定, 必将消耗大量的种子<sup>[11]</sup>, 因而也可能不适用于预测贮藏在低温种质库的种子寿命。(d) 将种子

贮藏后的发芽率百分数转化成概率值的目的是促使种子存活曲线转变成直线<sup>[2]</sup>。然而, 转化时的系统偏差<sup>[12]</sup> 却导致了显著或极显著的大卡方( $\chi^2$ ), 而使概率回归方程(3)的拟合性较差并降低了其预见性。除此之外, 近年来在欧洲大果栎(*Quercus macrocarpa*)<sup>[13]</sup>、杉木(*Cunninghamia lanceolata*) 和马尾松(*Pinus massoniana*)<sup>[14]</sup>、花生(*Arachis hypogaea*)<sup>[15]</sup>、以及胡萝卜(*Daucus carota*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)、洋葱(*Allium cepa*) 和番茄(*Lycopersicon esculentum*)<sup>[16]</sup> 种子的贮藏试验中, 发现贮藏温度和种子含水量的交互作用( $t \times m$  或  $t \times \log m$ ) 对种子寿命的影响是显著的, 这使对方程(2), 尤其来源于方程(1)的方程(4)的正确性产生了怀疑。

本研究的目的是用小麦种子贮藏试验获得的发芽率百分数和贮藏时间的成套数据, 分析存活比<sup>[17]</sup> 使种子存活曲线转变成直线的可行性, 及贮藏温度、种子含水量的交互作用对小麦种子平均寿命和死亡时间分布标准差的影响, 修改方程(3)和(4), 并为贮藏在低温种质库的小麦种子建立一个类似于方程(2)的寿命预测模型。这主要基于如下的考虑:(a) 如果将种子贮藏后的发芽率百分数转换成包含初始发芽率百分数的存活比, 也如概率一样, 能使种子存活曲线转变成直线, 那么存活比就能替代方程(2)和(3)的概率( $V_i$ ), 使方程(3)转变成线性回归方程,  $G_i/G_0 = A - (1/\delta)p$  (5), 并避免了由卡方( $\chi^2$ )值的显著性来判断方程拟合度的问题。式中的  $G_i$  为种子在贮藏时间  $p$  (d) 的发芽率百分数,  $G_0$  为种子在贮藏开始时的初始发芽率百分数,  $A$  为直线回归方程的截距。(b) 如果贮藏温度和种子含水量的交互作用对小麦种子的贮藏寿命也有显著的影响, 那么这个交互作用就应该被作为方程(2)和(4)的一个重要变量来考虑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和贮藏试验

本试验用的圆锥小麦种(*Triticum turgidum*,

AABB,  $2n = 4x = 28$ , TT) 的野生二粒小麦 (*T. turgidum* subsp. *dicoccoides*, TTDIC)、栽培二粒小麦 (*T. turgidum* subsp. *dicoccum*, TTDICO) 和东方小麦 (*T. turgidum* subsp. *turanicum*, TTUR), 茹科夫斯基小麦 (*T. zhukovskyi*, AAAAGG,  $2n = 6x = 42$ , TZ) 种, 普通小麦 (*T. aestivum* subsp. *aestivum*, AABBDD,  $2n = 6x = 42$ , TAE) 亚种的中国春 (*T. aestivum* subsp. *aestivum* cv. Chinese spring, TAECH) 和 3 个品系 (RS01、YV10141 和 YV10142) 的种子收获于 2010 年 5 月云南省农业科学院昆明试验基地。贮藏试验开始(2010 年 11 月)前, 这些种子被保存于  $-10 \sim -5$  °C 的低温种质库内达 5 个月。

试验开始时, 首先按 GB/T3543-1995 测定每份参试材料的种子含水量和发芽率, 然后将其分为 3 份。其中一份被再细分成每份约有 500 粒种子的 10~15 个小样, 单独真空密封包装在薄层铝铂袋内。另一份被装在布袋内, 并用水雾喷湿布袋外部, 然后放在下盛水上有托台的玻璃缸内, 加盖贮藏 3 d。从贮藏当天开始, 每天搅拌袋内种子并喷洒水雾 2 次, 以使袋内种子充分、均匀吸湿。第 3 份种子被放在种子架上在相对湿度 10%~25%、温度 30~35 °C 的干燥室内烘干 15 d。弄湿和干燥处理结束后, 被处理过的种子再次被测定含水量和发芽率。然后, 也将其细分成每份约有 500 粒种子的 10~15 个小样品, 并被真空密封包装在薄层铝铂袋内。最后, 将 3 个不同水分含量的每份种子贮藏于 20 °C、30 °C 和 40 °C 的恒温箱内, 形成 9 种不同的温度 × 种子含水量的贮藏环境。

从贮藏当天开始计, 每间隔一定时间从每个贮藏环境中取出一个小样品, 按 GB/T3543-1995 完成发芽试验, 并记录发芽率百分数和实际贮藏时间 (d)。其中, 贮藏于 40 °C 的样品的间隔时间为 15 d, 20 °C 和 30 °C 的间隔时间是 30 d、60 d 和 90 d 不等, 最长的贮藏时间是 810 d。

## 1.2 种子存活曲线绘制与数据统计分析

首先, 对每个种子批在每个贮藏环境中获得的发芽率百分数进行筛选, 选择发芽率至少降低一个以上标准差<sup>[1]</sup>或概率单位<sup>[8,18]</sup>, 即由 97.7% 降至 84.1%<sup>[8]</sup>或 84% 降至 50%<sup>[18]</sup>的一系列数据及其对应的贮藏时间, 共获得了 59 套成套数据。然后, 将发芽率为 0 和 100% 的观察值改写成 0.01% 和 99.99%<sup>[19]</sup>, 再利用 Excel 2003 的概率转化函数 Norminv (probability, mean, standard-dev) 将它们和其他发芽率百分数转化成概率 ( $V_i$ )。同时, 也将发芽

率观察值换算成存活比 ( $G_i/G_0$ ), 以便利用 Excel 2003 的绘图功能绘制概率和存活比种子存活曲线图。以发芽率百分数、存活比及二者对应的贮藏时间为基础数据, 用 IBM SPSS v. 19 的概率和线性回归模型分别估算出方程 (3) 和 (5) 的  $\sigma$  和  $p50$ , 再以  $\log p50$  和  $\log \sigma$  为因变量, 分别与自变量  $t$ 、 $m$ 、 $t \times m$  和  $t \times \log m$ 、 $t$ 、 $t^2$ 、 $m$ 、 $t \times m$ 、 $\log m$  和  $t \times \log m$  进行逐步回归分析, 筛选出对小麦种子寿命有显著影响的变量并检验其回归系数, 以判断其对种子寿命的影响。

## 2 结果与分析

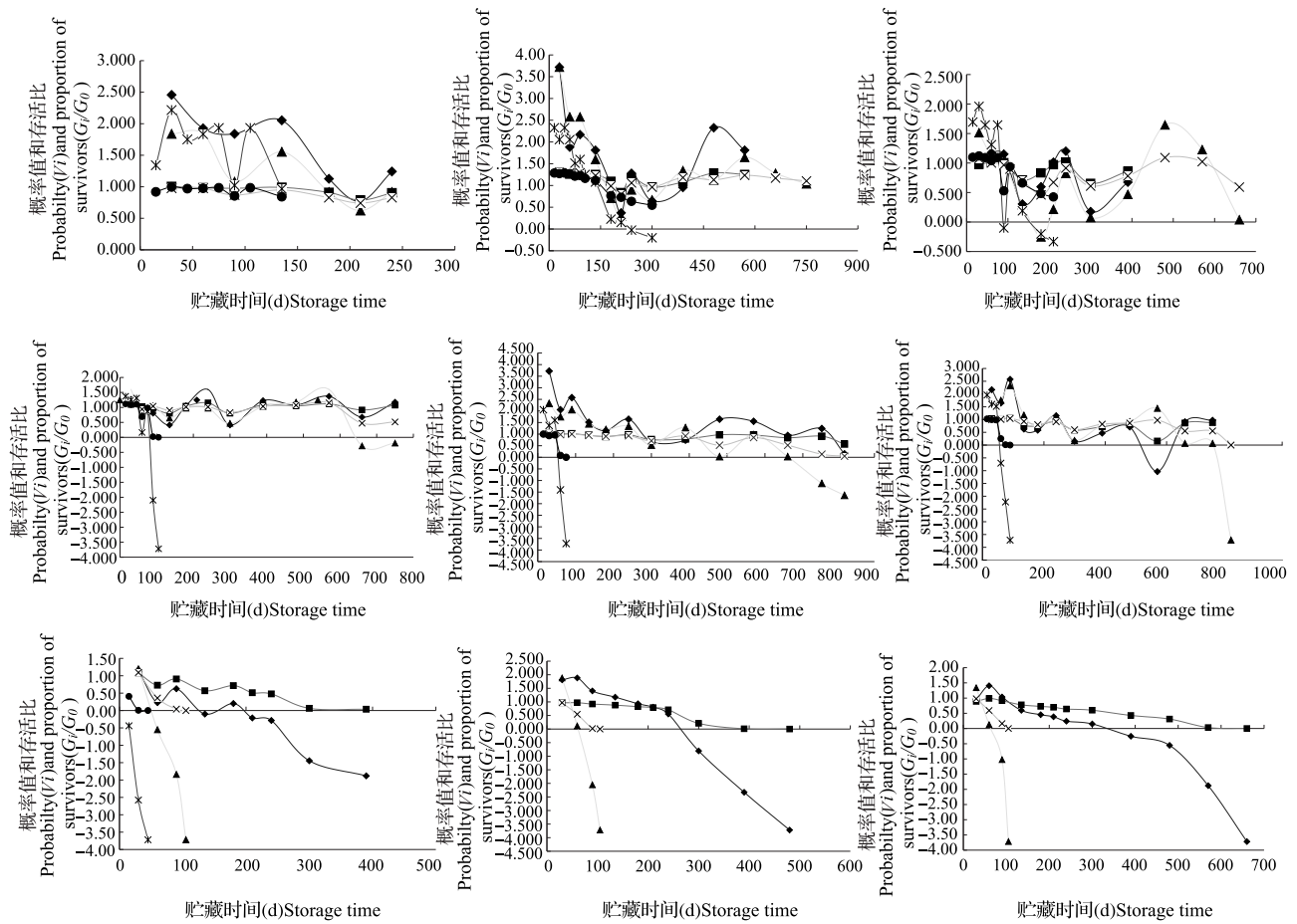
### 2.1 存活比 ( $G_i/G_0$ ) 和概率值 ( $V_i$ ) 种子存活曲线的比较

含水量在 6%~7% 的 8 个种子批或品种的发芽率百分数在被转化成概率值 ( $V_i$ ) 后, 其概率种子存活曲线, 无论在 20 °C、30 °C 或 40 °C (贮藏于 40 °C 的 TAECH 在种子被耗尽时没有获得有效数据) 的贮藏温度下, 都没有明显地被转化成直线, 而是具有剧烈起伏振荡的特点。相比之下, 存活比种子存活曲线虽然与前者有完全一致的变化特点, 但其起伏程度明显小于前者, 线性趋势也更为明显 (图 1 上排, TTDICO 代表 TT, 而 YV10141 代表 TAE)。含水量在 10.5%~11.5% 的种子, 两种存活曲线虽然也有相同的变化趋势, 但存活比种子存活曲线在 3 种贮藏温度下几乎都变成了直线, 而概率种子存活曲线只在 40 °C 时才变成了直线。另外, 两种存活曲线虽然也有一定的起伏, 但与含水量 6%~7% 的种子的存活曲线比, 其振荡程度要小很多 (图 1 中排, TTUR 代表 TT, TAECH 代表 TAE)。含水量在 13.7%~15.45% 的种子, 在 2 种 (TTDIC 和 TTUR 除外, 贮藏于 40 °C 的其他种子批在种子全部死亡前没有及时获得有效数据) 或 3 种 (TTDIC 和 TTUR) 贮藏温度下的 2 种存活曲线不但有完全一致的变化, 而且除在 20 °C 下的曲线几乎是直线外, 在 30 °C 或 40 °C (TTDIC 和 TTUR) 下的曲线都变成了直线 (图 1 下排, TTDIC 代表 TT, RS01 代表 TAE)。

所以, 无论在哪一种贮藏环境 (温度和种子含水量的组合) 下, 存活比不但都能使小麦种子的存活曲线转变成直线, 而且其转化效果也优于概率值。

### 2.2 概率回归和存活比线性回归方程的拟合性比较

表 1 列出了概率回归方程 (方程 3) 和存活比线性回归方程 (方程 5) 拟合的 8 个种子批的 59 个方程及其  $\delta$  和  $p50$ 。其中由概率值拟合的方程, 只有贮



贮藏 in 20 °C ( $V_i$ : ◆,  $G_t/G_0$ : ■), 30 °C ( $V_i$ : ▲,  $G_t/G_0$ : ×) 和 40 °C ( $V_i$ : \*,  $G_t/G_0$ : ●)

种子含水量 6.24% 的 TTDICO (上排左)、6.52% 的 TZ (上排中)、6.81% 的 YV10141 (上排右)、

10.77% 的 TTUR (中排左)、11.49% 的 TZ (中排中)、11.16% 的 TAECH (中排右)、

14.79% 的 TTDIC (下排左)、13.81% 的 TZ (下排中) 和 14.38% 的 RS01 (下排右) 的种子存活曲线

图 1 种子含水量 6%~7%、10.5%~11.5% 和 13.7%~15.45% 贮藏 in 20 °C、30 °C 和 40 °C 环境下的种子存活曲线

Fig. 1 Survival curves of seeds stored at 20 °C, 30 °C, and 40 °C with moisture content of 6%–7%,

10.5%–11.5%, and 13.7%–15.45%

藏在 20 °C 含水量 6.24% 的 TTDICO、含水量 6.67% 的 TAECH 和含水量 14.12% 的 YV10141, 贮藏 in 30 °C 含水量 14.79% 的 TTDIC、含水量 13.80% 的 TTUR、含水量 13.81% 的 TZ、含水量分别为 6.58% 和 14.38% 的 RS01, 以及贮藏 in 40 °C 含水量为 6.58% 的 RS01 等 7 个种子批的 9 个方程有统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 即 85% 的方程的拟合性都很差, 预测到的  $p50$  和  $\delta$  的可信度也自然会很低。相反, 在由存活比拟合的方程中, 只有贮藏 in 20 °C 含水量 6.36% 的 TTUR、含水量 6.58% 和 6.81% 的 RS01 和 YV10141, 贮藏 in 30 °C 含水量 13.73% 的 TTDICO、含水量 15.45% 和 14.38% 的 TAECH 及 YV10142, 以及贮藏 in 40 °C 含水量为 6.36% 和 13.80% 的 TTUR、含水量 6.24% 和 10.57% 的 TTDICO 等 6 个

种子批的 10 个方程没有统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 也就是说, 由存活比拟合的 49 个 (占 83%) 线性回归方程都是有统计学意义 ( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ) 的。在不同种子批之间, 由存活比估算出的这 49 个方程的常数 ( $A$  值) 变化在 0.853~1.516 之间, 其变化幅度不但小于方程 (3) 估算出的  $K_i$  值, 0.690~4.741, 而且全都有统计学意义 ( $P < 0.01$ )。49 个方程的决定系数 ( $R^2$ ) 变化在 0.378~0.999 之间, 其中有 21 个的  $R^2 > 0.9$ ; 预测到的  $p50$  有 19 个与方程 (3) 的相近 (相差  $\pm 10$  d 以内), 9 个较方程 (3) 的小 12~273 d, 21 个较方程 (3) 的大 12~463 d。所以, 存活比线性回归方程 (方程 5) 的预见性和可信度要高于概率回归方程 (方程 3)。

表 1 方程(3)和(5)的拟合性及其预测的平均寿命比较

Table 1 Comparison of the fitting between equation(3) and (5), and the mean viability period by they predicted

| 材料名称<br>及缩写<br>(M&A)  | $V_i = K_i - (1/\delta)p(3)$ |                 |       |            |          |           |       | $G_i/G_0 = A - (1/\delta)p(5)$ |       |       |            |              |          |
|-----------------------|------------------------------|-----------------|-------|------------|----------|-----------|-------|--------------------------------|-------|-------|------------|--------------|----------|
|                       | 种子含水<br>量(%) <sub>m</sub>    | 温度<br>(°C)<br>t | $K_i$ | $1/\delta$ | $p50$    | $\chi^2$  | $P$   | $R^2$                          | $A$   | $P-A$ | $1/\delta$ | $P-1/\delta$ | $p50$    |
| 野生二<br>粒小麦<br>(TTDIC) | 10.81                        | 20              | 0.690 | 0.000807   | 854.716  | 42.781    | 0.000 | 0.380                          | 0.974 | 0.000 | 0.000381   | 0.043        | 873.336  |
|                       | 14.79                        | 20              | 1.123 | 0.007108   | 158.042  | 47.956    | 0.000 | 0.934                          | 1.033 | 0.000 | 0.002786   | 0.000        | 145.920  |
| 东方小麦<br>(TTUR)        | 10.81                        | 30              | 0.836 | 0.002003   | 417.438  | 127.174   | 0.000 | 0.655                          | 1.041 | 0.000 | 0.000951   | 0.001        | 420.495  |
|                       | 14.79                        | 30              | 2.743 | 0.053490   | 51.281   | 1.714     | 0.424 | 0.958                          | 1.411 | 0.027 | 0.014567   | 0.042        | 52.914   |
|                       | 10.81                        | 40              | 1.881 | 0.052048   | 36.139   | 17.338    | 0.002 | 0.949                          | 1.237 | 0.001 | 0.015531   | 0.004        | 37.248   |
|                       | 6.36                         | 20              | 0.825 | 0.001096   | 752.517  | 41.908    | 0.000 | 0.236                          | 0.875 | 0.000 | 0.000377   | 0.610        | 813.870  |
| 茹科夫斯基<br>小麦<br>(TZ)   | 14.00                        | 20              | 1.219 | 0.002710   | 449.884  | 79.990    | 0.000 | 0.768                          | 1.103 | 0.000 | 0.001118   | 0.006        | 507.760  |
|                       | 6.36                         | 30              | 1.279 | 0.005105   | 250.574  | 11.391    | 0.023 | 0.721                          | 1.024 | 0.000 | 0.001783   | 0.032        | 237.275  |
|                       | 10.77                        | 30              | 1.193 | 0.001379   | 865.426  | 114.010   | 0.000 | 0.585                          | 1.102 | 0.000 | 0.000535   | 0.046        | 492.240  |
|                       | 13.80                        | 30              | 2.373 | 0.022245   | 106.663  | 0.144     | 0.931 | 0.990                          | 1.380 | 0.002 | 0.006988   | 0.010        | 112.110  |
|                       | 6.36                         | 40              | 2.000 | 0.015938   | 125.484  | 32.694    | 0.000 | 0.689                          | 1.147 | 0.001 | 0.003862   | 0.130        | 149.390  |
|                       | 10.77                        | 40              | 2.631 | 0.038492   | 71.628   | 129.405   | 0.000 | 0.860                          | 1.516 | 0.001 | 0.013353   | 0.013        | 69.711   |
|                       | 13.80                        | 40              | 4.741 | 0.249869   | 18.974   | 25420.105 | 0.000 | 0.752                          | 1.334 | 0.277 | 0.033329   | 0.332        | 22.387   |
| 栽培二粒小麦<br>(TTDICO)    | 6.52                         | 20              | 2.121 | 0.003824   | 554.705  | 24.678    | 0.000 | 0.706                          | 1.318 | 0.000 | 0.000807   | 0.009        | 820.562  |
|                       | 11.49                        | 20              | 1.769 | 0.001435   | 1232.563 | 102.338   | 0.000 | 0.378                          | 1.002 | 0.000 | 0.000291   | 0.025        | 1695.848 |
|                       | 13.81                        | 20              | 2.724 | 0.010781   | 252.681  | 40.479    | 0.000 | 0.945                          | 1.171 | 0.000 | 0.002731   | 0.000        | 223.670  |
|                       | 6.52                         | 30              | 2.352 | 0.006951   | 338.333  | 52.719    | 0.000 | 0.664                          | 1.372 | 0.000 | 0.001656   | 0.014        | 526.570  |
|                       | 11.49                        | 30              | 2.142 | 0.003739   | 572.862  | 113.612   | 0.000 | 0.780                          | 1.115 | 0.000 | 0.001069   | 0.000        | 565.230  |
|                       | 13.81                        | 30              | 4.025 | 0.066309   | 60.704   | 0.995     | 0.608 | 0.986                          | 1.366 | 0.009 | 0.013791   | 0.014        | 61.857   |
|                       | 6.52                         | 40              | 2.278 | 0.009352   | 243.561  | 21.938    | 0.015 | 0.970                          | 1.421 | 0.000 | 0.003058   | 0.000        | 257.220  |
| 中国春<br>(TAECH)        | 11.49                        | 40              | 4.601 | 0.091254   | 50.420   | 110.526   | 0.000 | 0.888                          | 1.452 | 0.014 | 0.019014   | 0.045        | 49.568   |
|                       | 6.24                         | 20              | 2.727 | 0.008641   | 315.569  | 5.766     | 0.217 | 0.840                          | 1.058 | 0.000 | 0.000987   | 0.036        | 552.950  |
|                       | 10.57                        | 20              | 1.263 | 0.001576   | 801.071  | 124.506   | 0.000 | 0.505                          | 0.985 | 0.000 | 0.000528   | 0.006        | 848.022  |
|                       | 13.73                        | 20              | 2.277 | 0.010677   | 213.258  | 57.404    | 0.000 | 0.945                          | 1.172 | 0.000 | 0.003139   | 0.002        | 218.850  |
|                       | 6.24                         | 30              | 1.862 | 0.004840   | 384.743  | 15.113    | 0.010 | 0.681                          | 1.008 | 0.000 | 0.000938   | 0.022        | 502.950  |
|                       | 10.57                        | 30              | 1.769 | 0.004702   | 376.293  | 90.276    | 0.000 | 0.936                          | 1.117 | 0.000 | 0.001556   | 0.000        | 289.680  |
|                       | 13.73                        | 30              | 4.563 | 0.092806   | 49.165   | 132.931   | 0.000 | 0.914                          | 1.379 | 0.218 | 0.016667   | 0.272        | 50.796   |
| RS01                  | 6.24                         | 40              | 1.838 | 0.005099   | 360.509  | 26.201    | 0.000 | 0.498                          | 0.994 | 0.000 | 0.000780   | 0.209        | 488.950  |
|                       | 10.57                        | 40              | 2.443 | 0.061358   | 39.815   | 33.547    | 0.000 | 0.940                          | 1.349 | 0.024 | 0.020323   | 0.060        | 49.614   |
|                       | 6.67                         | 20              | 2.221 | 0.007589   | 292.737  | 8.805     | 0.066 | 0.903                          | 1.098 | 0.000 | 0.001429   | 0.014        | 571.680  |
|                       | 11.16                        | 20              | 1.660 | 0.003625   | 457.935  | 114.813   | 0.000 | 0.644                          | 1.066 | 0.000 | 0.001156   | 0.005        | 466.855  |
|                       | 15.45                        | 20              | 2.108 | 0.011882   | 177.403  | 19.947    | 0.001 | 0.954                          | 1.227 | 0.000 | 0.003962   | 0.001        | 172.340  |
|                       | 6.67                         | 30              | 1.610 | 0.007189   | 223.882  | 11.101    | 0.025 | 0.870                          | 1.054 | 0.000 | 0.002208   | 0.007        | 263.842  |
|                       | 11.16                        | 30              | 1.658 | 0.002523   | 656.970  | 181.721   | 0.000 | 0.574                          | 1.065 | 0.000 | 0.000808   | 0.003        | 673.724  |
| RS01                  | 15.45                        | 30              | 4.055 | 0.082260   | 49.295   | 24.159    | 0.000 | 0.924                          | 1.419 | 0.197 | 0.016937   | 0.249        | 51.845   |
|                       | 11.16                        | 40              | 4.358 | 0.081508   | 53.469   | 91.819    | 0.000 | 0.926                          | 1.426 | 0.002 | 0.016776   | 0.008        | 52.923   |
|                       | 6.58                         | 20              | 1.202 | 0.002613   | 460.065  | 62.675    | 0.000 | 0.504                          | 1.355 | 0.000 | 0.001104   | 0.203        | 597.420  |
|                       | 10.53                        | 20              | 1.314 | 0.001356   | 969.046  | 73.583    | 0.000 | 0.496                          | 1.018 | 0.000 | 0.000442   | 0.007        | 1061.099 |
|                       | 14.38                        | 20              | 1.338 | 0.004415   | 303.000  | 21.604    | 0.010 | 0.983                          | 1.028 | 0.000 | 0.001599   | 0.000        | 245.180  |
|                       | 6.58                         | 30              | 1.210 | 0.002111   | 573.044  | 10.880    | 0.144 | 0.714                          | 1.364 | 0.000 | 0.000927   | 0.004        | 606.424  |
|                       | 10.53                        | 30              | 1.085 | 0.001388   | 781.213  | 131.756   | 0.000 | 0.411                          | 0.967 | 0.000 | 0.000519   | 0.018        | 804.527  |
| RS01                  | 14.38                        | 30              | 2.744 | 0.044057   | 62.283   | 5.087     | 0.079 | 0.999                          | 1.377 | 0.000 | 0.013240   | 0.001        | 64.567   |
|                       | 6.58                         | 40              | 1.796 | 0.007169   | 250.519  | 5.472     | 0.485 | 0.838                          | 1.047 | 0.000 | 0.001569   | 0.009        | 263.080  |
|                       | 10.53                        | 40              | 2.901 | 0.049735   | 58.331   | 16.246    | 0.003 | 0.969                          | 1.404 | 0.000 | 0.014830   | 0.001        | 57.250   |

表 1(续)

| 材料名称<br>及缩写<br>(M&A) | $V_i = K_i - (1/\delta)p(3)$ |                 |       |            |         |          |       | $G_i/G_0 = A - (1/\delta)p(5)$ |       |       |            |              |         |
|----------------------|------------------------------|-----------------|-------|------------|---------|----------|-------|--------------------------------|-------|-------|------------|--------------|---------|
|                      | 种子含水量<br>(%) <sub>m</sub>    | 温度<br>(°C)<br>t | $K_i$ | $1/\delta$ | $p50$   | $\chi^2$ | $P$   | $R^2$                          | $A$   | $P-A$ | $1/\delta$ | $P-1/\delta$ | $p50$   |
| YV10141              | 6.81                         | 20              | 1.143 | 0.002258   | 506.154 | 46.945   | 0.000 | 0.490                          | 1.017 | 0.000 | 0.000762   | 0.217        | 442.290 |
|                      | 10.84                        | 20              | 1.003 | 0.001299   | 772.519 | 70.640   | 0.000 | 0.514                          | 0.907 | 0.000 | 0.000622   | 0.030        | 621.146 |
|                      | 14.12                        | 20              | 1.629 | 0.007778   | 209.508 | 8.804    | 0.359 | 0.980                          | 1.008 | 0.000 | 0.002264   | 0.000        | 248.900 |
|                      | 6.81                         | 30              | 1.028 | 0.001709   | 601.662 | 44.176   | 0.000 | 0.595                          | 0.990 | 0.000 | 0.000672   | 0.025        | 619.832 |
|                      | 10.84                        | 30              | 0.959 | 0.003297   | 290.779 | 81.191   | 0.000 | 0.858                          | 0.853 | 0.000 | 0.001085   | 0.000        | 306.003 |
|                      | 14.12                        | 30              | 3.506 | 0.054734   | 64.053  | 11.145   | 0.004 | 0.977                          | 1.415 | 0.013 | 0.013851   | 0.023        | 64.628  |
|                      | 6.81                         | 40              | 1.851 | 0.011396   | 162.435 | 89.880   | 0.000 | 0.879                          | 1.222 | 0.000 | 0.003959   | 0.001        | 161.820 |
|                      | 10.84                        | 40              | 3.512 | 0.076004   | 46.212  | 69.211   | 0.000 | 0.920                          | 1.407 | 0.009 | 0.019028   | 0.027        | 46.640  |
| YV10142              | 10.79                        | 20              | 1.256 | 0.001594   | 788.406 | 61.756   | 0.000 | 0.538                          | 1.037 | 0.000 | 0.000576   | 0.010        | 824.288 |
|                      | 14.38                        | 20              | 1.886 | 0.011087   | 170.114 | 43.752   | 0.000 | 0.951                          | 1.141 | 0.000 | 0.003609   | 0.000        | 153.670 |
|                      | 6.59                         | 30              | 1.138 | 0.001765   | 644.612 | 118.229  | 0.000 | 0.476                          | 1.080 | 0.000 | 0.000732   | 0.027        | 740.937 |
|                      | 10.79                        | 30              | 1.090 | 0.002879   | 378.511 | 103.695  | 0.000 | 0.770                          | 0.992 | 0.000 | 0.001130   | 0.000        | 380.845 |
|                      | 14.38                        | 30              | 3.002 | 0.065382   | 45.922  | 3.977    | 0.046 | 0.927                          | 1.249 | 0.191 | 0.014691   | 0.245        | 48.179  |
|                      | 6.56                         | 40              | 1.658 | 0.009056   | 183.037 | 90.493   | 0.000 | 0.920                          | 1.241 | 0.000 | 0.003536   | 0.000        | 159.650 |
|                      | 10.79                        | 40              | 3.113 | 0.059676   | 52.169  | 18.318   | 0.001 | 0.963                          | 1.432 | 0.000 | 0.016581   | 0.002        | 51.188  |

M&A:材料名称及缩写;m:种子含水量;t:温度; $K_i$ :方程(3)的常数; $1/\delta$ :种子衰退率; $\chi^2$ :卡方值; $P$ :显著性水平; $R^2$ :决定系数; $A$ :方程(5)的常数; $P-A$ :方程常数项的显著水平; $P-1/\delta$ :方程及其回归系数的显著水平; $p50$ :平均寿命,下同

M&A:Name of materials and their abbreviation,m:Moisture content of seeds,t:Temperature(°C), $K_i$ :Constant of equation (3), $1/\delta$ :Ratio of seeds deterioration, $\chi^2$ :Chi-square, $P$ :Significance level, $R^2$ :Determination coefficient, $A$ :Constant of equation (5), $P-A$ :Significance level of constant in equations, $P-1/\delta$ :Significance level of equations and its regression coefficient, $p50$ :Mean viability period.The same as below

### 2.3 贮藏温度和种子含水量的交互作用对种子平均寿命和死亡时间分布标准差的影响

检验因变量与两自变量乘积的回归系数的显著性是判断自变量之间是否有交互作用的有效方法之一。本文以列于表1的 $p50$ 和 $\delta(1/\delta$ 的倒数)的对数, $\log p50$ 和 $\log \delta$ 为因变量,分别与 $t$ 、 $m$ 、 $t \times m$ 、 $t \times \log m$ 和 $t$ 、 $t^2$ 、 $m$ 、 $t \times m$ 、 $\log m$ 、 $t \times \log m$ 两组自变量进行逐步回归分析,筛选对这2个因变量有显著影响作用的自变量。如果 $t \times m$ 或 $t \times \log m$ 被保留在最终的逐步回归方程之中,就说明贮藏温度和种子含水量的交互作用( $t \times m$ 或 $t \times \log m$ )对小麦种子的平均寿命和死亡时间分布的标准差有显著影响。

表2说明,无论来自方程(3)的 $\log p50_1$ 或(5)的 $\log p50_2$ ,它们与贮藏温度、种子含水量、 $t \times m$ 和 $t \times \log m$ 所得的逐步回归方程都保留有变量 $t \times m$ 或 $t \times \log m$ ,并且所有方程及其常量、保留自变量的系数也都有统计学意义( $P < 0.05$ 或 $0.01$ )。因此,贮藏温度和种子含水量的交互作用, $t \times m$ 或 $t \times \log m$ ,是影响小麦种子平均贮藏寿命的主要因素。但是,不同物种的种子批在逐步回归方程中保留的变量 $t \times m$ 或 $t \times \log m$ 有所不同。不管是对 $\log p50_1$ 还是 $\log p50_2$ ,圆锥小麦种TTUR的方程都只保留了 $t \times \log m$ ;而对于 $\log p50_1$ ,除

TZ的方程只保留了 $t \times \log m$ 和TAECH种子批外,其他方程也都只导入了 $t \times m$ ;而除TTUR外,所有种子批或种子批组合(合并估算的TT种子批和TAE种子批)的 $\log p50_2$ 对自变量的方程也都只保留了 $t \times m$ 。

表3则说明,不管来自方程(3)的 $\log \sigma_1$ 或方程(5)的 $\log \sigma_2$ ,TTUR的方程都只保留了 $t \times \log m$ ;而对于 $\log \sigma_1$ ,除TAECH外,所有种子批或种子批组合的方程都只包含了 $t \times m$ ;对于 $\log \sigma_2$ ,除TZ的方程保留了 $t \times \log m$ 外,其他种子批或种子批组合的方程也都只保留了 $t \times m$ 。因此,贮藏温度和种子含水量的交互作用, $t \times m$ ,也是影响种子死亡时间分布标准差的最重要因素。

由于逐步回归分析模型首先导入对因变量有最大影响作用的自变量,然后再引进有次要作用的自变量。所以,逐步回归分析在TTUR和TZ的方程中导入了对种子平均贮藏寿命和死亡时间分布标准差影响作用较 $t \times m$ 更大的 $t \times \log m$ ,如果 $t \times \log m$ 不被考虑为自变量,两者的逐步回归方程也应保留 $t \times m$ ,而在TAECH的 $\log p50_1$ 和 $\log \sigma_1$ 对自变量的关系中没有发现任何有统计学意义的变量。因此,对于表2和表3中的所有种子批、合并的圆锥小麦种子批和普通小麦种子批的组合而言,变量 $t \times m$ 是影响种子批平均寿命和死亡时间分布标准差的最主要因

子,应被吸纳进种子平均寿命和死亡时间分布标准的预测模型。所以,种子平均寿命、死亡时间分布的标准差与贮藏温度和种子含水量之间的关系,即方程(1)和(4)应该被分别修改为  $\log p50 = K_v - C_{WT}(t \times$

$m)$  (6)和  $\log \sigma = K - C_{WT}(t \times m)$  (7)。另外,由于表2和表3中的所有方程都没有保留  $t, m, t^2$  和  $\log m$ ,所以,  $t \times m$  或  $t \times \log m$  对种子批平均寿命和死亡时间分布标准差的影响作用应大于这些独立因素。

表2 小麦种子平均寿命的对数与贮藏温度和种子含水量交互作用的逐步回归方程及其参数

Table 2 Stepwise regression equations of mean vitality period against interaction between storage temperature and water content of seeds and their parameters

| 材料名称<br>及缩写<br>(M&A)      | $\log p50_1$   |          |             |       |       |          |  | $\log p50_2$ |       |           |       |   |       |  |
|---------------------------|----------------|----------|-------------|-------|-------|----------|--|--------------|-------|-----------|-------|---|-------|--|
|                           | 常数 $K_v$       |          | 回归系数        |       | 决定系数和 |          | 保留的变量<br>Independent<br>variable<br>remained | 常数 $K_v$     |       | 回归系数      |       | 决定系数和   |       | 保留的变量<br>Independent<br>variable<br>remained |
|                           | Constant $K_v$ |          | Coefficient |       | 显著水平  |          |  | Coefficient  |       | 显著水平      |       | Determination<br>coefficient and<br>significance<br>level |       |  |
|                           | 估计值            | P        | 估计值         | P     | $R^2$ | P        | 估计值  | P            | 估计值   | P         | $R^2$ | P   |       |  |
| Estimate                  | P              | Estimate | P           | $R^2$ | P     | Estimate | P  | Estimate     | P     | $R^2$     | P     |   |       |  |
| TTDIC                     | 4.134          | 0.003    | -0.005636   | 0.024 | 0.856 | 0.024    | $t \times m$                                 | 4.108        | 0.004 | -0.005556 | 0.029 | 0.840   | 0.029 | $t \times m$                                 |
| TTUR                      | 3.787          | 0.000    | -0.049213   | 0.007 | 0.727 | 0.007    | $t \times \log m$                            | 3.769        | 0.000 | -0.048733 | 0.001 | 0.844   | 0.001 | $t \times \log m$                            |
| TTDICO                    | 3.320          | 0.000    | -0.003557   | 0.014 | 0.664 | 0.014    | $t \times m$                                 | 3.530        | 0.000 | -0.004079 | 0.002 | 0.827   | 0.002 | $t \times m$                                 |
| 合并的圆锥小麦<br>(TT combined)  | 3.385          | 0.000    | -0.003578   | 0.000 | 0.662 | 0.000    | $t \times m$                                 | 3.466        | 0.000 | -0.003764 | 0.000 | 0.761   | 0.000 | $t \times m$                                 |
| TZ                        | 3.645          | 0.000    | -0.043253   | 0.026 | 0.589 | 0.026    | $t \times \log m$                            | 3.612        | 0.000 | -0.003909 | 0.014 | 0.661   | 0.014 | $t \times m$                                 |
| TAECH                     |                |          |             |       |       |          |  | 3.240        | 0.000 | -0.003000 | 0.031 | 0.640   | 0.031 | $t \times m$                                 |
| RS01                      | 3.328          | 0.000    | -0.003133   | 0.013 | 0.606 | 0.013    | $t \times m$                                 | 3.367        | 0.000 | -0.003253 | 0.012 | 0.617   | 0.012 | $t \times m$                                 |
| YV10141                   | 3.740          | 0.000    | -0.004655   | 0.002 | 0.869 | 0.002    | $t \times m$                                 | 3.702        | 0.000 | -0.004520 | 0.002 | 0.877   | 0.002 | $t \times m$                                 |
| YV10142                   | 3.758          | 0.000    | -0.004719   | 0.004 | 0.831 | 0.004    | $t \times m$                                 | 3.775        | 0.000 | -0.004779 | 0.006 | 0.802   | 0.006 | $t \times m$                                 |
| 合并的普通小麦<br>(TAE combined) | 3.482          | 0.000    | -0.003766   | 0.000 | 0.698 | 0.000    | $t \times m$                                 | 3.460        | 0.000 | -0.003702 | 0.000 | 0.707   | 0.000 | $t \times m$                                 |

表3 小麦种子死亡时间分布标准差的对数与贮藏温度和种子含水量交互作用的逐步回归方程及其参数

Table 3 Stepwise regression equations of standard deviation against interaction between storage temperature and water content of seeds and their parameters

| 材料名称<br>及缩写<br>(M&A) | $\log \sigma_1$ |          |             |       |       |          |  | $\log \sigma_2$ |       |           |       |   |       |  |
|----------------------|-----------------|----------|-------------|-------|-------|----------|--|-----------------|-------|-----------|-------|---|-------|--|
|                      | $K_i$           |          | 回归系数        |       | 决定系数和 |          | 保留的变量<br>Independent<br>variable<br>remained | $K_i$           |       | 回归系数      |       | 决定系数和   |       | 保留的变量<br>Independent<br>variable<br>remained |
|                      |                 |          | Coefficient |       | 显著水平  |          |  | Coefficient     |       | 显著水平      |       | Determination<br>coefficient and<br>significance<br>level |       |  |
|                      | 估计值             | P        | 估计值         | P     | $R^2$ | P        | 估计值  | P               | 估计值   | P         | $R^2$ | P   |       |  |
| Estimate             | P               | Estimate | P           | $R^2$ | P     | Estimate | P  | Estimate        | P     | $R^2$     | P     |   |       |  |
| TTDIC                | 4.853           | 0.004    | -0.008041   | 0.018 | 0.881 | 0.018    | $t \times m$                                 | 4.925           | 0.002 | -0.006997 | 0.017 | 0.886   | 0.017 | $t \times m$                                 |
| TTUR                 | 4.279           | 0.000    | -0.073130   | 0.003 | 0.787 | 0.003    | $t \times \log m$                            | 4.475           | 0.000 | -0.062631 | 0.003 | 0.800   | 0.003 | $t \times \log m$                            |
| TTDICO               | 3.178           | 0.000    | -0.004278   | 0.031 | 0.566 | 0.031    | $t \times m$                                 | 4.045           | 0.000 | -0.005075 | 0.004 | 0.767   | 0.004 | $t \times m$                                 |
| TT Combined          | 3.500           | 0.000    | -0.004756   | 0.000 | 0.615 | 0.000    | $t \times m$                                 | 4.025           | 0.000 | -0.004685 | 0.000 | 0.730   | 0.000 | $t \times m$                                 |
| TZ                   | 3.261           | 0.000    | -0.004339   | 0.023 | 0.603 | 0.023    | $t \times m$                                 | 4.246           | 0.000 | -0.057259 | 0.018 | 0.633   | 0.018 | $t \times \log m$                            |
| TAECH                |                 |          |             |       |       |          |  | 3.508           | 0.000 | -0.003353 | 0.042 | 0.598   | 0.042 | $t \times m$                                 |
| RS01                 | 3.465           | 0.000    | -0.004342   | 0.010 | 0.634 | 0.010    | $t \times m$                                 | 3.848           | 0.000 | -0.003998 | 0.012 | 0.617   | 0.012 | $t \times m$                                 |
| YV10141              | 4.215           | 0.000    | -0.006922   | 0.004 | 0.834 | 0.004    | $t \times m$                                 | 4.393           | 0.000 | -0.005922 | 0.006 | 0.809   | 0.006 | $t \times m$                                 |
| Y10142               | 4.039           | 0.000    | -0.006405   | 0.006 | 0.810 | 0.006    | $t \times m$                                 | 4.250           | 0.000 | -0.005544 | 0.008 | 0.788   | 0.008 | $t \times m$                                 |
| TAE Combined         | 3.568           | 0.000    | -0.004968   | 0.000 | 0.661 | 0.000    | $t \times m$                                 | 3.921           | 0.000 | -0.004457 | 0.000 | 0.676   | 0.000 | $t \times m$                                 |

表 4 方程(8)和(9)预测的贮藏在低温种质库的普通小麦种子的发芽率和贮藏时间

Table 4 Germination percentage and storage time of common wheat seeds stored at low temperature genebank by equation (8) and (9) predicted

| 编号<br>Code | 种子含<br>水量(%)<br>m | 初始发<br>芽率(%)<br>IGP | 观察值            |                | 方程(8) Equation (8) |                 |               | 方程(9) Equation(9) |                 |               | 包装<br>Packages |
|------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------|---------------|----------------|
|            |                   |                     | Observed value |                | $K_i$              | 预测值             |               | 预测值               |                 |               |                |
|            |                   |                     | 发芽率<br>(%) GP  | 贮藏时间<br>(d) ST |                    | Predicted value |               | A                 | Predicted value |               |                |
|            |                   |                     |                |                |                    | 贮藏时间<br>(d) ST  | 发芽率<br>(%) GP |                   | 贮藏时间<br>(d) ST  | 发芽率<br>(%) GP |                |
| 835        | 12.4              | 90                  | 76             | 2920           | 1.3824             | 3613.2          | 79.8a         | 1.034             | 2201.8          | 71.6a         | N              |
|            | 11.9              | 90                  | 88             | 3650           | 2.5375             | 7174.6          | 96.7          | 1.254             | 3158.9a         | 85.5a         | V              |
| 839        | 12.7              | 90                  | 77             | 3285           | 1.6541             | 4935.1          | 85.2          | 1.104             | 2906.8          | 75.4a         | N              |
|            | 12.4              | 90                  | 73             | 4015           | 1.4466             | 4456.3          | 75.5a         | 1.078             | 3091.8          | 67.4a         | V              |
| 842        | 12.7              | 100                 | 84             | 4015           | 1.6572             | 3573.5          | 81.9a         | 0.959             | 1393.6          | 63.3          | N              |
|            | 12.4              | 100                 | 80             | 4015           | 2.5770             | 9274.6          | 96.6          | 1.081             | 3263.3          | 75.2a         | V              |
| 843        | 13.0              | 85                  | 55             | 4015           | 1.1717             | 5691.2          | 67.8          | 1.183             | 6316.7          | 73.1          | N              |
|            | 12.6              | 85                  | 57             | 4015           | 1.4523             | 6859.6          | 76.0          | 1.054             | 4473.2          | 61.8a         | V              |
| 849        | 12.5              | 91                  | 70             | 3650           | 1.3089             | 4205.5          | 73.5a         | 1.005             | 2743.7          | 64.3a         | N              |
| 851        | 12.8              | 85                  | 70             | 4015           | 1.7663             | 6716.4          | 84.7          | 1.158             | 3916.4a         | 70.8a         | N              |
| 853        | 12.5              | 85                  | 78             | 4015           | 1.5846             | 4354.7          | 79.8a         | 1.119             | 2338.1          | 67.2          | N              |
| 864        | 13.3              | 85                  | 86             | 3650           | 2.6471             | 8600.4          | 97.6          | 1.240             | 2713.2          | 80.7a         | N              |
| 865        | 12.8              | 89                  | 56             | 2555           | 0.6407             | 2648.7a         | 56.7a         | 0.841             | 2477.5a         | 56.4a         | N              |
|            | 11.9              | 89                  | 45             | 2190           | 0.2797             | 2134.4a         | 44.6a         | 0.687             | 2074.9a         | 44.9a         | V              |
| 870        | 12.3              | 93                  | 80             | 4015           | 2.8767             | 10844.5         | 98.3          | 1.122             | 3024.3          | 73.6a         | N              |
| 874        | 12.4              | 93                  | 83             | 3650           | 1.5270             | 3061.5          | 80.0a         | 1.100             | 2400.7          | 74.4          | N              |
| 877        | 12.4              | 62                  | 50             | 4015           | 0.7112             | 3801.1a         | 48.4a         | 1.235             | 4966.8          | 56.2          | N              |
| 882        | 12.5              | 87                  | 82             | 4015           | 1.5342             | 3317.1          | 78.4a         | 1.085             | 1661.1          | 65.9          | N              |
|            | 11.9              | 87                  | 80             | 4015           | 2.2047             | 7177.7          | 95.0          | 1.217             | 3401.9          | 76.8a         | V              |
| 883        | 12.6              | 85                  | 80             | 3285           | 1.5899             | 4022.8          | 83.6a         | 1.133             | 2237.1          | 73.6a         | N              |
|            | 12.4              | 85                  | 78             | 3650           | 2.0160             | 6647.6          | 90.8          | 1.279             | 4190.8          | 83.3a         | V              |
| 886        | 12.9              | 96                  | 78             | 4015           | 1.7821             | 5478.2          | 85.2          | 1.012             | 2344.4          | 66.0          | N              |
| 887        | 12.4              | 88                  | 74             | 3650           | 1.7405             | 5863.9          | 85.5a         | 1.119             | 3223.7          | 72.1a         | N              |
| 889        | 12.6              | 89                  | 85             | 3650           | 2.0815             | 5618.7          | 92a           | 1.168             | 2483.4          | 77.5a         | N              |
| 890        | 12.7              | 86                  | 74             | 3650           | 2.4368             | 9670.7          | 96.1          | 1.275             | 4844.5          | 84.2          | N              |
|            | 11.7              | 86                  | 70             | 4015           | 3.3550             | 14816.8         | 99.5          | 1.369             | 6313.9          | 88.8          | V              |
| 892        | 12.7              | 85                  | 60             | 4015           | 1.5098             | 6775.5          | 77.8          | 1.128             | 4937.8          | 68.2          | N              |
|            | 11.9              | 85                  | 84             | 4015           | 2.2037             | 6367.7          | 92.5          | 1.261             | 3115.6          | 78.7a         | V              |
| 895        | 12.8              | 94                  | 78             | 3650           | 2.0921             | 7138.7          | 92.2          | 1.085             | 2993.3          | 74.2a         | N              |
|            | 12.1              | 94                  | 68             | 4015           | 3.4406             | 15747.7         | 99.7          | 1.292             | 6538.0          | 90.2          | V              |
| 896        | 12.9              | 92                  | 70             | 4015           | 1.9146             | 7541.3          | 88.0          | 1.081             | 3757.4a         | 69.6a         | N              |
|            | 12.0              | 92                  | 78             | 4015           | 2.7034             | 10199.7         | 97.4          | 1.216             | 4221.6a         | 81.2a         | V              |
| 897        | 12.5              | 85                  | 70             | 4015           | 1.2705             | 3999.4a         | 69.9a         | 1.073             | 2903.2          | 63.3a         | N              |
| 898        | 12.8              | 89                  | 75             | 4015           | 2.1631             | 8050.9          | 92.2          | 1.153             | 3632.3a         | 73.7a         | N              |
|            | 12.0              | 89                  | 84             | 4015           | 4.1818             | 16833.8         | 99.9          | 1.287             | 3941.1a         | 84.9a         | V              |
| 901        | 13.0              | 71                  | 85             | 3650           | 1.9144             | 4776.7          | 89.3a         | 1.438             | 2841.6          | 81.3a         | N              |
| 924        | 12.7              | 85                  | 80             | 2920           | 1.4704             | 3390.4          | 82.4a         | 1.117             | 2056.5          | 74.8          | N              |
| 925        | 12.8              | 89                  | 83             | 2920           | 1.9736             | 5513.5          | 92.4          | 1.144             | 2479.5          | 80.8a         | N              |
|            | 12.0              | 89                  | 82             | 4015           | 1.7760             | 4545.2          | 84.5a         | 1.117             | 2246.3          | 69.8          | V              |
| 926        | 12.7              | 91                  | 40             | 4015           | 2.4194             | 14412.3         | 95.3          | 1.177             | 8614.2          | 77.4          | N              |
| 933        | 12.7              | 96                  | 70             | 4015           | 1.7816             | 6779.0          | 85.0          | 1.017             | 3366.1a         | 66.3a         | N              |
|            | 12.0              | 96                  | 68             | 4015           | 4.1596             | 19498.5         | 99.9          | 1.243             | 6128.6          | 87.3          | V              |
| 936        | 12.9              | 94                  | 70             | 4015           | 2.2669             | 9452.0          | 93.6          | 1.085             | 3994.8          | 71.5a         | N              |

a:表示该值分布在“观察值±观察值×10%”的范围; N和V:分别表示非真空和真空包装

a: Showed the value distribution at a range of “observed ± observed × 10%”, N and V: Showed no-vacuum and vacuum packages, respectively, IGP: Initial germination percent, GP: Germination percent, ST: Storage time



基于存活比能更好地将小麦种子的存活曲线转变成直线,以及贮藏温度和种子含水量的交互作用对种子平均贮藏寿命、死亡时间分布标准差的显著作用,建议将 Ellis 和 Roberts 活力模型(方程 2)修改成  $V_i = K_i - p/10^{K-C_{WT}(t \times m)}$  (8) 和  $G_i/G_0 = A - p/10^{K-C_{WT}(t \times m)}$  (9)。前者也许适用于预测初始发芽率未被测定的种子寿命,而后者也许对预测初始发芽率已被测定的种子寿命是适合的。

## 2.4 利用存活比线性回归方程预测种子寿命的有效性

利用已报道的贮藏在  $-2 \pm 2$  °C 低温种质库的小麦种子发芽率百分数和贮藏时间数据<sup>[20]</sup>,筛选其中发芽率百分数已降低一个以上概率单位并测定了种子含水量的 43 个样品<sup>[21]</sup>的成套数据,比较了方程(8)和(9)在预测贮藏时间和发芽率百分数时的有效性。首先,由方程(3)和(5)估算出这些样品的  $K_i$  和  $A$  值(表 4),再利用表 3 的普通小麦种子批合并计算的  $K = 3.568$  和  $3.921$ 、 $C_{WT} = 0.00496$  和  $0.004457$ ,并根据在  $0 \sim 5$  °C 范围波动的温度取  $2.6$  °C<sup>[22]</sup>决定  $t = -2.6$  °C,分别计算出方程(8)和(9)各自能预测到的贮藏时间(d)和发芽率。以观察发芽率百分数预测贮藏时间时,方程(8)预测的贮藏时间在 2134.4 ~ 19498.5 d 之间,与观察值相差  $-697.9 \sim 15483.5$  d,其中 4 个在“观察值  $\pm$  观察值  $\times 10\%$ ”的范围(表 4 中标记为“a”);方程(9)预测的贮藏时间在 1393 ~ 8614 d 之间,与观察值相差  $-2621.4 \sim 4599.2$  d,其中 8 个在“观察值  $\pm 10\%$ ”的范围。以实际贮藏时间预测发芽率时,方程(8)预测的值在 44.6% ~ 99.9% 之间,与观察值相差  $-3.6\% \sim 55.3\%$ ,其中 8 个在“观察值  $\pm$  观察值  $\times 10\%$ ”的范围,而方程(9)预测的值在 44.9% ~ 90.2% 之间,与观察值相差  $-20.7\% \sim 37.4\%$ ,其中 28 个分布在“观察值  $\pm 10\%$ ”的范围,为预测数据的 65%。很显然,方程(9)预测的贮藏时间和发芽率的准确性分别是方程(8)的 2 倍和 3.5 倍。所以,存活比线性回归方程(方程 9)无论在预测贮藏时间或是发芽率时都有较概率回归方程(方程 8)更高的准确性。

## 3 讨论

### 3.1 对种子寿命预测模型的探讨与应用

W. Christina 等<sup>[23]</sup>利用 Avrami 方程的 Johnson - Mehl - Avrami 模型,即  $\ln(\ln(N_0/N)) = n \ln(t) - n \ln(\Phi)$ ,估算了贮藏  $-196 \sim 50$  °C 之间的莴苣种子的贮藏时间( $t$ )及其系数( $n$ )。式中  $N_0$  和  $N$  是种子

在贮藏开始和贮藏后的发芽率百分数, $n \ln \Phi$  被看作是方程的截距。但是,这个模型不仅没有考虑贮藏温度和种子含水量的交互作用对种子寿命的影响,甚至也没有考虑温度、含水量的独立作用。针对 Ellis 和 Roberts 活力模型(方程 2)不适用于有休眠或生活力较低的种子,A. Mead 等<sup>[24]</sup>在已为杀虫剂的生物测定建立了控制死亡率概率模型的基础上,提出了  $\Phi^{-1}(\%_v/100) = A + Bt$  的反函数方程。式中  $\%_v$  是有生存能力的种子百分数,而  $A$  和  $B$  分别等于方程(3)的  $K_i$  和  $1/\delta$ 。这个方程虽然考虑了贮藏温度和含水量对种子生活力的影响,但是没有考虑两者间的互作。T. Shande 等<sup>[9,18]</sup>针对 Ellis 和 Roberts 活力模型关于相同贮藏环境下一个物种内的所有种子批是以相同比率衰弱的假设,不适用于杂交玉米种子,提出了一个基于潜在可贮性指数和贮藏环境系数的预测杂交玉米种子衰弱率的替代模型<sup>[25]</sup>。他们指的可贮性指数是一个种子批在两种贮藏环境下的平均寿命或任意发芽率水平的寿命比值,而贮藏环境系数是两种温度、水分或湿度的差值。这个模型的核心是用一种环境下的种子寿命去预测该种子在另一种环境下的寿命。该模型虽然考虑了种子含水量与贮藏温度的交互作用,但不是本研究建议的  $t \times m$  而是  $t \times lnm$ 。相比之下,本研究不仅证明了将种子发芽率百分数转换成存活比,也和概率值一样,可使种子存活曲线变成直线,继而概率回归方程(方程 3)也可被改写成存活比线性回归方程(方程 5),而方程拟合性的检验也由  $F$  值代替了  $\chi^2$  值,而且还揭示了影响小麦种子贮藏寿命的主要因子是贮藏温度和种子含水量的交互作用。与前人<sup>[13-16]</sup>对这个交互作用的发现不同,本研究不仅发现了这个作用对小麦种子贮藏寿命的影响,而且提出了利用它来预测小麦种子寿命的建议,即将 Ellis 和 Roberts 活力模型修改成方程(8)和(9)的建议。

### 3.2 存活比线性回归模型的优势与应用

与方程(2)相比,存活比线性回归方程(9)不仅考虑了传统意义的种子初始质量<sup>[4]</sup>——初始发芽率,而且只包含了对种子批寿命有主要影响作用的温度和种子含水量的互作( $t \times m$ )1 个变量,没有考虑影响作用较小的独立变量  $t$ 、 $t^2$  和  $\log m$ 。因此,克服了方程(2)对贮藏温度的限制。在利用时也只需为它测定  $C_{WT}$  1 个系数,而不是方程(2)的  $C_w$ 、 $C_H$  和  $C_Q$  3 个,因此较方程(2)简单。和概率回归方程(3)一样,存活比线性回归方程(5)也可估计贮藏于单一条件下的种子批寿命。首先,在一定的间隔期测

得种子批或品种至少 3 个发芽率和贮藏时间的成套数据,然后由方程(5)估算出截距  $A$  和种子死亡衰退率( $1/\delta$ ),再用  $A$  和  $1/\delta$  反过来预测该种子批或品种在该贮藏环境下,发芽率下降至任意水平的贮藏时间,或者贮藏至任意时间的发芽率。但是,与方程(3)不同的是,利用方程(5)的前提是种子批在贮藏开始时的初始发芽率必须是已知的,否则只能利用方程(3)。若要用方程(9)来预测一个物种内未知  $A$  和  $1/\delta$  的种子批寿命,则必须在一种贮藏温度两个种子含水量水平或者一种水分两种温度下获得该物种内的某个或某些种子批的发芽率和贮藏时间数据,并联合运用方程(5)和(7)测得  $K$  和  $C_{WT}$  后,再利用方程(9)来预测该物种内其他种子批的贮藏寿命。

### 3.3 $C_{WT}$ 和 $C_w$ 、 $K_i$ 和 $A$ 的差异

本研究利用逐步回归分析方法测得方程(8)的 7 个种子批(TAECH 除外)及圆锥小麦、普通小麦种子批组合的  $C_{WT} = -0.073130 \sim -0.004278$ ,  $K = 3.178 \sim 4.853$ ;而测得方程(9)的  $C_{WT} = -0.062631 \sim -0.003353$ ,  $K = 3.508 \sim 4.925$ (表 3)。同一种子批或给合的  $C_{WT}$ (TTDICO 和 TZ 除外),后者较前者的小 0.000071 ~ 0.010499,  $K$  值(TAECH 除外)较前者的大 0.072 ~ 0.985。同一物种不同种子批的  $C_{WT}$  和  $K$  值,尤其  $K$  值在两个方程中都有一定差异。例如方程(9)中普通小麦 YV10141 的  $K = 4.393$ ,  $C_{WT} = -0.005922$ , 而 TAECH 的  $K = 3.508$ ,  $C_{WT} = -0.003353$ , 分别相差达 0.885 和 0.002569。因此本文测得的  $K$  和  $C_{WT}$  是否如方程(2)的  $K_E$ 、 $C_w$ 、 $C_H$  和  $C_Q$  一样是物种常数,有待进一步研究。另外,这些  $C_{WT}$  值和 R. H. Ellis 等<sup>[26]</sup>报道的普通小麦的  $C_w = -1.664$  是完全不同的,因为本文测得的  $C_{WT}$  是贮藏温度与种子含水量的交互作用对  $\log\sigma$  的回归系数,而  $C_w$  是独立变量  $\log m$  对  $\log\sigma$  的回归系数。 $K_i$  是受基因型、种子收获前、后所处环境、基因型  $\times$  收获前环境影响的反映种子综合质量的概率,很难将其中某个因素扮演的角色分离出来<sup>[27]</sup>。所以,在贮藏开始时的种子初始发芽率只是影响  $K_i$  值诸多因素中的一个,有高初始发芽率的种子批不一定有高的  $K_i$  值。如表 4 中初始发芽率为 100% 的 842,由方程(3)测得的在真空密封和非真空包装贮藏后的  $K_i$  值为 2.5770 和 1.6572,较初始发芽率为 89% 的 898 的  $K_i$  值 4.1818 和 2.1631 低,而初始发芽率同样为 89% 的 865 的  $K_i$  值则分别只有 0.2797 和 0.6407。与  $K_i$  值不同,方程(5)和(9)中的  $A$  值仅与初始发芽

率有关,可将其理解为是  $K_i$  值中只与初始发芽率有关的部分。因此,  $A$  值应比  $K_i$  值小。在普通小麦种子批组合的  $K_i$  值、 $C_{WT}$  值相当的情况下,绝大多数方程(8)预测的贮藏时间和发芽率都远大于观察值(表 4),说明  $K_i$  值的预测作用被夸大了,而  $A$  也许恰好抵消了它被夸大的部分,所以方程(9)有较方程(8)高数倍的预测准确性。

### 参考文献

- [1] Roberts E H. Predicting the storage life of seeds[J]. Seed Sci Technol, 1973, 1: 499-514
- [2] Ellis R H, Roberts E H. Improved equations for the prediction of seed longevity[J]. Ann Bot, 1980, 45: 13-30
- [3] Pieta F C, Ellis R H. Estimating the value of the seed lot constant ( $K_i$ ) of the seed viability equation in barley and wheat[J]. Seed Sci Technol, 1992, 20: 93-99
- [4] Maciej N, Christina W, Wieslaw L, et al. Assessment of variation in seed longevity within rye, wheat and the intergeneric hybrid triticale[J]. Seed Sci Res, 2009, 19: 213-224
- [5] Ellis R H, Hong T D. Desiccation tolerance and potential longevity of developing seeds of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ann Bot, 1994, 73: 501-506
- [6] 李开隆, 施佳. 樟子松、油松种子储藏寿命的预测[J]. 东北林业大学学报, 1991, 19(2): 24-33
- [7] Ellis R H, Roberts E H. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds[J]. Seed Sci Technol, 1981, 9: 373-409
- [8] Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. A comparison of the low-moisture-content limit to the logarithmic relation between seed moisture and longevity in twelve species [J]. Ann Bot, 1989, 63: 601-611
- [9] Shande T, Dennis M T, Dennis B E, et al. Survival characteristics of corn seed during storage: I. Normal distribution of seed survival [J]. Crop Sci, 1999, 39: 1394-1400
- [10] Eric F, Dennis T, Egli D B, et al. Evaluation of a viability model for predicting soybean seed germination during warehouse storage [J]. Crop Sci, 1999, 39: 194-201
- [11] Robin J P, Matthew I D, Fiona R H. Ecological correlates of *ex situ* seed longevity a comparative study on 195 species [J]. Ann Bot, 2009, 104: 57-69
- [12] Wilson D O, McDonald M B, Martin S K. A probit planes method for analyzing seed deterioration data [J]. Crop Sci, 1989, 29: 471-476
- [13] Schroeder W R, Walker D S. Effects of moisture content and storage temperatures on germination of quercus macrocarpa acorns [J]. J Environ Hort, 1987, 5(1): 22-24
- [14] 喻方圆, 邵岚, 沈元宝. 杉木、马尾松种子贮藏过程中生理生化变化研究[J]. 林业科学, 2006, 42(12): 137-142
- [15] Sastry D V S S R, Upadhyaya H D, Gowda C L L. Survival of groundnut seeds under different storage conditions [J]. SAT ejournal, 2007, 5: 1-3
- [16] Abdullah M A, Abdullah A A, Safwat O K, et al. Influence of storage conditions on seed quality and longevity of four vegetable crops [J]. American-Eurasian J Agric Environ Sci, 2011, 11(3): 353-359
- [17] Christina W, Lisa M H, Lana J W. Dying while dry: kinetics and mechanisms of deterioration in desiccated organisms [J]. Integr Comp Biol, 2005, 45: 751-758
- [18] Shande T, Dennis M T, Dennis B E, et al. Survival characteristics of corn seed during storage: II. Rate of seed deterioration [J]. Crop Sci, 1999, 39: 1400-1406
- [19] Hong T D, Ellis R H, Buitink J, et al. A model of the effect of

- temperature and moisture on pollen longevity in air-dry storage environments[J]. *Ann Bot*, 1999, 83:167-173
- [20] 周国雁, 伍少云, 徐伦. 低温贮藏下真空与非真空包装对小麦种子生活力的影响[J]. *植物遗传资源学报*, 2011, 12(3): 368-373
- [21] 伍少云, 周国雁. 中期种质库贮藏下真空和非真空包装普通小麦种子的衰老特性及寿命差异[J]. *作物学报*, 2011, 37(6): 109-1115
- [22] Ellis R H. The viability equation, seed viability nomographs, and practical advice on seed storage[J]. *Seed Sci Technol*, 1988, 16: 29-50
- [23] Christina W, Lana W, Phillip C S. Longevity of cryogenically stored seeds[J]. *Cryobiology*, 2004, 48: 229-244
- [24] Mead A, Gray D. Prediction of seed longevity: a modification of the shape of the Ellis and Roberts seed survival curves[J]. *Seed Sci Res*, 1999, 9: 63-73
- [25] Shande T, Dennis M T, Dennis B E, et al. An alternative model to predict corn seed deterioration during storage [J]. *Crop Sci*, 2000, 40: 463-470
- [26] Ellis R H, Hong T D, Roberts E H, et al. Low moisture content limits to relations between seed longevity and moisture[J]. *Ann Bot*, 1990, 65: 493-504
- [27] Christina W V, Eric E R, Jennifer C, et al. Theoretical basis of protocols for seed storage III. Optimum moisture contents for pea seeds stored at different temperatures [J]. *Ann Bot*, 1994, 74: 531-540

## 欢迎订阅 2014 年《热带生物学报》

《热带生物学报》由海南大学主办, 海南省教育厅主管, 公开发行人。该刊已被《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国学术期刊(光盘版)》、《万方数据(CHINAINFO)系统科技期刊群》和《中文科技期刊数据库》等国内数据库收录。

《热带生物学报》选登热带生物领域学术论文、研究报告、专题评述、学术问题讨论、研究简报(或快报)、成果摘要等稿件, 内容包括热带农林科学、热带微生物科学、热带海洋生物、热带动物科学、热带医药科学、热带园林、热带生物安全以及生物学实验技术等领域的最新研究进展和成果。读者对象为从事热带农业与生命科学研究的科技工作者、大专院校师生等。

季刊, 大 16 开本, 100 页, 季末 25 日出版。每册定价 15.00 元(含邮寄费), 全年 60.00 元。邮发代号: 国内 84-32, 全国各地邮局办理订阅手续。本刊编辑部全年办理补订手续。

地址: (570228) 海南省海口市人民大道 58 号海南大学学报编辑部《热带生物学报》编辑室

电话: 0898-66281595(投稿), 66289657(订阅)

网址: <http://xb.hainu.edu.cn>

E-mail: rds wxb@163.com

联系人: 林尤刚, 胡守景

## 欢迎订阅 2014 年《大豆科学》

《大豆科学》是由黑龙江省农业科学院主管主办的大豆专业领域学术性期刊, 也是被国内外多家重要数据库和文摘收录源收录的重点核心期刊。主要刊登有关大豆遗传育种、品种资源、生理生态、耕作栽培、植物保护、营养肥料、生物技术、食品加工、药用功能及工业用途等方面的学术论文、研究报告、研究简报、国内外研究述评、学术活动简讯和新品种介绍等。

《大豆科学》主要面向从事大豆科学研究的科技工作者, 大专院校师生、各级农业技术推广部门的技术人员及科技种田的农民。

双月刊, 16 开本, 每期 144 页。国内外公开发行人, 国内每期订价: 10.00 元, 全年 60.00 元, 邮发代号: 14-95。国外每期订价: 10.00 美元(含邮资), 全年 60 美元, 国外代号: Q5587。全国各地邮局均可订阅, 也可向编辑部直接订购。广告经营许可证号: 2301030000004。

地址: (150086) 哈尔滨市南岗区学府路 368 号《大豆科学》编辑部

电话: 0451-86668735

网址: [www.haasep.cn](http://www.haasep.cn)

E-mail: dadoukx@sina.com      ddkexue@126.com