

影响 4 类作物种子寿命的主要贮藏环境因素

周国雁, 伍少云, 王莉花, 王艳青

(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:为研究利用存活比、影响种子贮藏寿命和生活力的主要贮藏环境因子来预测高粱、苋属、甜荞麦和莠苣种子批的寿命和生活力, 3 个含水量水平的高粱和苋属的 8 个种子批被贮藏在 20 °C、30 °C 和 40 °C 的贮藏温度下长达 810 d。以概率回归和存活比线性回归方法, 贮藏试验获得的高粱、苋属及文献报道的甜荞麦、莠苣种子批的发芽率和贮藏时间的成套数据, 被用于估算不同种子批的平均贮藏寿命($p50$)和种子死亡时间分布的标准差(σ), 同时两种回归方程的拟合性也被比较; 两种方法估算出的 $p50$ 和 σ 则分别被用于对贮藏环境因子: 贮藏温度(t)及其平方、种子含水量(m)及其对数($\log m$)以及 t 和 m 的交互作用($t \times m$ 和 $t \times \log m$)作逐步回归分析, 结果表明, 用存活比来估算 $p50$ 、 σ 是可行的, 而且估算出的 $p50$ 和 σ 较用概率估算的有统计学意义; 贮藏温度和种子含水量的交互作用($t \times m$)是使 4 类作物种子快速丧失生活力, 减少寿命的主要贮藏环境因子, 包含这个因子和存活比的数学模型: $G_i/G_0 = A - p/10^{K - C_{WT}(t \times m)}$, 预测甜荞麦种子批的发芽率较 $V_i = K_i - p/10^{K - C_{WT}(t \times m)}$ 有更高的准确性; 所以, 建议用前者来预测初始发芽率是已知的种子的贮藏寿命和生活力, 而用后者预测初始发芽率未被测定的种子的寿命和生活力。

关键词: 种子寿命; 生活力; 贮藏环境; 交互作用

Main Storage Conditions Factor of Influencing Longevity of Seed in Four Crops

ZHOU Guo-yan, WU Shao-yun, WANG Li-hua, WANG Yan-qing

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

Abstract: To predict seed longevity and viability of *Sorghun vulgare*, *Fagopyrum esculentum*, *Lactuca sativa*, and *Amaranthus* by survivor proportion and main storage condition factors, seeds of 8 seed lot of *Sorghun vulgare* and *Amaranthus* with 3 levels of water content were stored at 20 °C, 30 °C, and 40 °C for lasting 810 d. Data sets of germination percent and storage period of seed from storage experiments of *Sorghun vulgare* and *Amaranthus* seed lot and from literature reported for *Fagopyrum esculentum* and *Lactuca sativa* seed lot were used to estimate mean viability period ($p50$) and standard deviation of seeds death distribution in time (σ) for different seed lot using regression equations of probability and survivor proportion in linearity, and fitting of the equations were also synchronously compared. Moreover, $p50$ and σ by two equations estimated were used to analyze storage condition factors with stepwise regression method, including storage temperature(t) and its quadratic term(t^2), water content of seed (m) and its logarithm($\log m$), and interaction between storage temperature and water content of seeds ($t \times m$ and $t \times \log m$), respectively. The results showed that estimated $p50$ and σ with survivor proportion to estimate was feasible and had more statistical significance than probability estimated. Seed viability was quickly lost and its longevity

收稿日期: 2013-04-10 修回日期: 2013-05-19 网络出版日期: 2013-12-19

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20131219.1308.021.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); 国家农作物种质资源平台(云南, 2012-030)

第一作者主要从事种质资源保存与创新研究。E-mail: yangguozhou@126.com.cn

通信作者: 伍少云, 主要从事种质资源保存与创新研究。E-mail: caiyunwu205cn@yahoo.com.cn

was decreased by interaction between storage temperature and water content of seed ($t \times m$). The mathematic model $G_i/G_0 = A - p/10^{K - C_{WT}(t \times m)}$ containing the interaction factor and survivor proportion had higher accuracy to predict initial germination percent of *Fagopyrum esculentum* than the model $V_i = K_i - p/10^{K - C_{WT}(t \times m)}$. Thus, the former and latter models were recommended to predict initial germination rate with longevity and viability of seed known and unknown, respectively.

Key words: seed longevity; viability; storage conditions; interaction

众所周知,除种子本身的质量或发芽率外,种子含水量和贮藏温度是影响种子生活力随贮藏时间逐步衰退的重要环境因素。基于种子生活力衰退机制的研究和种子寿命是可预测的发现,前人提出了预测种子贮藏寿命的 3 个重要假设及其基本生活力方程^[1],其中 3 个重要假设分别是:(1)在一个正常型种子的群体内个体种子的存活期(贮藏时间 p 或寿命)分布能由负积累正态分布描述;(2)这个分布的时间范围是群体平均活力期(平均寿命 p_{50})的比例;(3)贮藏温度(t)、种子含水量(m)和平均寿命的对数($\log p_{50}$)之间的关系是简单的负直线,即 $\log p_{50} = K_V - c_1 t - c_2 m$,也就是说 t 和 m 之间不存在影响种子寿命的交互作用。根据这些假设和基本生活力方程,R. H. Ellis 等^[2]建立了预测贮藏在一环境下的种子寿命的改进活力方程: $V_i = K_i - p/10^{K_E - C_W \log m - C_H t - C_Q t^2}$ 或 $p = (K_i - V_i) 10^{K_E - C_W \log m - C_H t - C_Q t^2}$ ^[3]。式中 V_i 为种子在贮藏时间 p 的发芽率百分数的概率, K_i 为概率回归方程的截距,也是种子在贮藏开始时的初始质量的概率, K_E 、 C_W 、 C_H 和 C_Q 为物种常数。虽然,这个改进的活力模型一直被引用^[4-6]并对种子贮藏寿命的研究和预测产生了积极的重要影响,但是也受到了不少质疑^[8-11],尤其是近年来,在不同物种中发现种子含水量和贮藏温度的交互作用对种子的生活力有显著地影响并减少了种子的贮藏寿命,因此不得不质疑 E. H. Roberts^[1] 的第 3 个假设的正确性。W. R. Schroeder 等^[12]在检测种子含水量为 17%、27%、37% 或 44%,贮藏在一 2℃、1℃ 和 5℃ 的欧洲大果栎(*Quercus macrocarpa*)种子的发芽率时,发现这个交互作用显著地影响了种子的发芽力和发芽比率。喻方圆等^[13]在研究贮藏在一 25℃、3℃、-18℃ 和 -30℃,种子含水量为 4%、10% 和 18% 的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、种子含水量 4%、8% 和 14% 的马尾松(*Pinus massoniana*)种子的生理生化变化时,也发现这个交互作用对这两个物种的种子发芽率有显著影响。D. V. S. S. R. Sastry 等^[14]在研究真空和非真空包装对种子初始含水量为 1.7%、3.4%、4.4%、7.1% 和 10.1%,贮藏在一 35℃ 和 50℃

的花生(*Arachis hypogaea*)种子的发芽率变化时,发现贮藏温度、种子含水量以及贮藏方法之间的交互作用在不同贮藏环境间是显著的。A. M. Alhamdan 等^[15]研究了贮藏在一 5℃、15℃、25℃ 和 35℃ 及相对湿度为 11.3%、22.5%、32.5%、43.2%、58.4%、75.3% 和 84.3% 环境下的胡萝卜(*Daucus carota*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)、洋葱(*Allium cepa*)和番茄(*Lycopersicon esculentum*)种子的发芽率、平均发芽时间和发芽速率系数的变化,发现贮藏温度和相对湿度对这 3 个指标都有显著地交互影响。因为在以这 3 个指标为 y 轴,贮藏温度为 x 轴的图形中,代表不同相对湿度水平的线段都发生了交叉。最近,本课题组在分析来自普通小麦、圆锥小麦和茹科夫斯基小麦种子老化贮藏试验的发芽率数据时,也发现这个交互作用是影响 3 种小麦种子平均寿命和死亡时间分布标准差的主要贮藏环境因子。同时,发现由包含种子初始发芽率的存活比^[16]替代改进活力模型的概率 V_i ,也能很好地将小麦种子的存活曲线转变成直线,并因此建议将改进的活力模型修改成只含有这个交互作用而不包括 t 、 t^2 和 $\log m$ 的 $V_i = A_i - p/10^{K - G_{WT}(t \times m)}$ (1) 和 $G_i/G_0 = A - p/10^{K - G_{WT}(t \times m)}$ (2)。式中 G_i 和 G_0 分别是种子在贮藏时间 p 和贮藏开始时的发芽率, A 为存活比线性回归方程的截距, K 为常数,而 C_{WT} 是贮藏温度和种子含水量互作 $t \times m$ 的系数。测得的普通小麦、圆锥小麦的 K 值分别是 3.921 和 4.025,而 C_{WT} 分别为 -0.004457 和 -0.004685。利用测得的普通小麦种子的 K 、 C_{WT} 值,以及贮藏在一 2 ± 2 ℃ 的普通小麦种子的实际贮藏时间和发芽率,比较了方程(1)和(2)预测普通小麦种子的贮藏寿命和发芽率的准确性,结果表明方程(2)不仅可用于预测贮藏在低温种质库的普通小麦种子的贮藏寿命和生活力,而且其预测的准确性分别是方程(1)的 2 倍和 3.5 倍。本文评价了这个交互作用对高粱(*Sorghum bicolor* var. kaoliang)、苋属(*Amaranthus*)、甜荞麦(*Fagopyrum esculentum*)和莴苣(*Lactuca sativa*)4 类作物种子平均寿命和死亡标

准差的影响,以及利用包含这个交互作用和存活比的方程(2)来预测这4类作物种子贮藏寿命和发芽率的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料与种子贮藏试验

为获得高粱和苋属种子批的发芽率和贮藏时间数据,2009年10月将收获于昆明的高粱(yngl-145:红甜高粱,yngl-147:高红高粱,yngl-152:甜高粱)3个和苋属(ynzlx-23:玉米子,ynzlx-40:白粟米,ynzlx-43:红粟米,ynzlx-50:籽粒苋-1,ynzlx-51:籽粒苋-2)5个种子批的种子放在室温下保存7个月,然后转入 $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温种质库内贮藏了约6个月。

贮藏试验开始时,首先按GB/T 3543-1995测定每个种子批的含水量和发芽率,然后将其分为3份。其中一份被再细分成每份约500粒种子、含水量中等的10~15个小样品,单独真空密封包装在薄层铝铂袋内。另一份装在外部用水雾喷湿的布袋内,再把布袋放在下盛有水上有托台的玻璃缸内,加盖贮藏3d。从贮藏当天开始,每天搅拌袋内种子并向布袋外表喷水雾2次,使袋内种子充分、均匀吸湿并含有较高水分。第3份种子则被放在种子架上在相对湿度10%~25%、温度30~35 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥室内烘干15d,使其含有较低水分。湿和干燥处理结束后,被处理过的种子再次按GB/T 3543-1995测定其含水量和发芽率,并分成每份约500粒种子的10~15个小样品,真空密封包装在薄层铝铂袋内。然后,将每个种子批3个不同含水量的种子贮藏在20 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 和40 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内,形成9种不同的贮藏温度 \times 种子含水量的贮藏环境。

1.2 贮藏时间和发芽率数据采集

从贮藏当天开始,每间隔一定时间从每个贮藏环境中取出一个小样品,按GB/T 3543-1995完成发芽试验并记录实际贮藏时间和发芽率数据。其中,贮藏在40 $^{\circ}\text{C}$ 的样品的间隔时间为15d,而20 $^{\circ}\text{C}$ 和30 $^{\circ}\text{C}$ 的则间隔30d、60d和90d不等,贮藏时间最长的达810d。甜荞麦Kyushu Zairai Hanadaka Saba和莠苣Black seeded simp son种子批的数据则分别引自N. Yoshiaki等^[17]和胡小荣等^[18]的贮藏试验。

1.3 数据分析

首先,对每个种子批在每个贮藏环境中获得的发芽率数据进行筛选,选择发芽率至少降低一个以上概率单位,即由97.7%降至84.1%^[7]或84%降

至50%^[19]的种子批的发芽率及其对应的贮藏时间,共获得高粱20套、苋属38套、甜荞麦5套和莠苣22套成对数据。然后,利用IBM SPSS v. 19统计分析软件的回归模型分别估算ELLIS和ROBERTS活力模型的变形: $V_i = K_i - (1/\sigma_i)p$ (方程3,模型1)和本课题组建立的小麦存活比线性回归方程(方程2)的变形: $G_i/G_0 = A - (1/\sigma_2)p$ (方程4,模型2)的 σ_1 、 σ_2 、 $p50_i$ 和 $p50_2$,并比较两种模型拟合方程的优度,以此评估用存活比预测4类作物种子平均寿命和死亡时间分布标准差的可行性。式中 $1/\sigma$ 是回归直线的斜率,也就是种子在贮藏过程中的衰退率。随后,以 $\log\sigma$ 和 $\log p50$ 为因变量,分别与贮藏环境因子 t 、 t^2 、 m 、 $t \times m$ 、 $\log m$ 和 $t \times \log m$ 、及 t 、 m 、 $t \times m$ 和 $t \times \log m$ 进行逐步回归分析,并检验所得回归方程及其参数的显著性,以评判贮藏温度和种子含水量的交互作用 $t \times m$ 或 $t \times \log m$ 是否也是影响这4类作物种子 $p50$ 和 σ 的主要贮藏环境因子。最后,以测得的甜荞麦种子批的 K 和 C_{WT} 值,比较方程(1)和(2)的预测准确性。

2 结果与分析

2.1 用存活比预测4类作物种子平均寿命和死亡时间分布标准差的可行性

2.1.1 高粱 除贮藏在30 $^{\circ}\text{C}$ 含水量为13.92%的红甜高粱和贮藏在40 $^{\circ}\text{C}$ 含水量为10.99%的甜高粱外,模型1拟合的概率回归方程的 χ^2 值全都达到极显著水平($P < 0.01$),而除贮藏在30 $^{\circ}\text{C}$ 含水量6.75%和13.92%的红甜高粱、贮藏在20 $^{\circ}\text{C}$ 含水量6.86%和11.52%的高红高粱、贮藏在30 $^{\circ}\text{C}$ 含水量15.35%的高红高粱和含水量13.84%的甜高粱外,模型2拟合的存活比线性回归方程也全都达到显著($P < 0.05$)或极显著水平(表1),即在20个方程中,14个存活比线性回归方程都具有统计学意义,而概率回归方程只有2个。因此,模型2估算的标准差和平均寿命也较模型1的真实、客观,用存活比估算高粱种子批的 $p50$ 和 σ 是可行的。其中,估算出的 σ_2 全都大于 σ_1 ,7个 $p50_2$ 与 $p50_1$ 接近($p50_2 - p50_1 = -9.124 \sim 3.610$),6个较 $p50_1$ 小,最小者相差约212d,9个较 $p50_1$ 大,最大者多2772d。另外,模型2的截距(A)变化在0.735~1.453之间,也较模型1(K_i)的0.805~2.113小。存活比线性回归方程的决定系数(R^2)变化在0.091~0.939之间,其中大于0.600的11个方程都是含有水量较高的种子批的方程,揭示了 R^2 值与种子含水量之间有某种必然的联系。

表 1 由模型 1 和模型 2 估算出的高粱种子批的截距、标准差和平均寿命
Table 1 Intercept,standard deviation,and mean longevity of sorghum by model 1 and model 2 estimated

材料 Materials	<i>t</i> (℃)	<i>m</i> (%)	模型 1 Model 1							模型 2 Model 2						
			<i>K_i</i>	<i>l</i> / <i>σ_i</i>	方程 Equation		<i>σ_i</i>	<i>p</i> 50 _{<i>i</i>}	方程 Equation		常数 Constant		<i>l</i> / <i>σ₂</i>		<i>σ₂</i>	<i>p</i> 50 ₂
					<i>χ</i> ²	<i>P</i>			<i>R</i> ²	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>P</i>	Estimate	<i>P</i>		
红甜高粱	20	6.75	1.027	0.001039	34.681	0.000	962.460	988.241	0.497	0.015	1.453	0.000	0.000569	0.015	1758.061	1064.096
Red sweet sorghum	20	11.79	0.940	0.000876	29.161	0.001	1142.075	1073.968	0.458	0.022	1.112	0.000	0.000387	0.022	2586.515	862.172
	20	13.92	1.018	0.004531	41.173	0.000	220.726	224.624	0.903	0.000	1.038	0.000	0.001800	0.000	555.577	215.500
	30	6.75	0.890	0.000676	31.392	0.000	1480.300	1317.914	0.343	0.059	1.387	0.000	0.000376	0.059	2662.792	1435.740
	30	11.79	0.895	0.002062	76.607	0.000	485.036	434.201	0.605	0.008	1.110	0.000	0.001024	0.008	976.955	432.826
	30	13.92	0.805	0.025187	1.204	0.548	39.704	31.973	0.856	0.075	0.735	0.041	0.006010	0.075	166.392	18.262
高红高粱	40	11.79	1.635	0.051860	17.807	0.000	19.283	31.534	0.915	0.043	1.384	0.019	0.022074	0.043	45.302	32.517
	20	6.86	1.547	0.000464	21.495	0.003	2156.774	3335.811	0.091	0.430	1.034	0.000	0.000079	0.430	12602.877	6107.877
	20	11.52	1.587	0.001524	68.999	0.000	656.253	1041.247	0.377	0.059	1.097	0.000	0.000407	0.059	2457.788	1322.050
	20	15.35	1.604	0.004538	81.125	0.000	220.384	353.523	0.866	0.000	1.116	0.000	0.001601	0.000	624.719	283.275
	30	11.52	1.402	0.001512	21.606	0.006	661.202	926.836	0.703	0.002	1.069	0.000	0.000479	0.002	2088.430	1040.230
High red sorghum	30	15.35	1.797	0.026821	29.175	0.000	37.284	67.011	0.828	0.090	1.155	0.043	0.008755	0.090	114.217	66.063
	40	11.52	2.113	0.044560	23.756	0.000	22.442	47.413	0.905	0.001	1.202	0.000	0.012797	0.001	78.142	48.755
	20	6.61	1.196	0.001078	28.175	0.001	928.043	1110.268	0.531	0.011	0.994	0.000	0.000346	0.011	2891.119	1267.520
	20	10.99	1.414	0.001682	69.999	0.000	594.703	840.623	0.576	0.004	1.092	0.000	0.000578	0.004	1729.643	735.595
	20	13.84	1.058	0.003929	45.502	0.000	254.520	269.373	0.926	0.000	0.928	0.000	0.001378	0.000	725.830	390.366
甜高粱	30	6.61	1.546	0.001426	38.406	0.000	701.083	1083.663	0.531	0.011	1.064	0.000	0.000381	0.011	2627.583	1336.320
	30	10.99	1.098	0.001428	68.684	0.000	700.478	769.121	0.550	0.006	1.015	0.000	0.000560	0.006	1785.606	786.931
	30	13.84	1.310	0.020697	28.721	0.000	48.316	63.299	0.792	0.110	1.006	0.049	0.007249	0.110	137.953	66.909
	40	10.99	2.019	0.044387	8.126	0.149	22.529	45.490	0.939	0.000	1.175	0.000	0.012562	0.000	79.606	46.176

贮藏 在 40 ℃ 含水量 6.75%、6.86% 和 6.61% 的种子,其发芽率没有达到降低一个以上概率单位的标准,而含水量 13.92%、15.35% 和 13.84% 的种子则在完全丧失发芽能力之前未能获得足够用于计算的数据
Seeds stored at 40 ℃ with water content of 6.75%, 6.86%, and 6.61%, their germination percentage were not up to standard of falling one or above probability unit, but water content of 13.92%, 15.35%, and 13.84%, their germination percentage were not got enough data before viability lose for calculation

2.1.2 苋属 在模型 1 和模型 2 各自拟合的 5 个种子批 38 个方程(表 2)中,除贮藏 在 20 ℃ 含水量 12.98% 的玉米子和贮藏 在 40 ℃ 含水量 8.34% 的籽粒苋-1 外,其他 36 个概率回归方程的 χ^2 值全都达到 0.05 及以上的显著水平,但在存活比线性回归方程中,贮藏 在 7 个环境下的玉米子,贮藏 在 20 ℃ 含水量 15.22%、30 ℃ 含水量 12.87%、40 ℃ 含水量 8.29% 和 12.87% 的红粟米,贮藏 在 20 ℃ 含水量 13.48% 和 16.84%、30 ℃ 含水量 13.48% 和 40 ℃ 含水量 8.34% 的籽粒苋-1,贮藏 在 20 ℃ 含水量 16.07% 的籽粒苋-2 等 14 个方程都达到了显著或极显著水平。除贮藏 在

20 ℃ 和 30 ℃ 含水量 15.26% 的白粟米外,模型 2 估算的 σ_2 也都大于 σ_1 ,估算的 $p50_2$ 有 12 个与 $p50_1$ 接近($p50_2 - p50_1 = -9.325 \sim 8.510$),其余的较 $p50_1$ 大,最大者多 36848 d;估算的截距(A)变化在 0.682 ~ 3.529 之间,也较模型 1 估算(K_i)的 0.385 ~ 3.552 小。大多数存活比线性回归方程的决定系数都较小,变化在 0.011 ~ 0.967 之间,其中 $R^2 > 0.600$ 以上的只有 14 个方程。这说明,用模型 2 预测 $p50$ 和 σ 也是可行的,且其预测值也较模型 1 预测的有统计学意义,但大多数预测值也是失真的,这可能与发芽率观察数据的离散度有关。

表 2 由模型 1 和模型 2 估算出的苋属种子批的截距、标准差和平均寿命

Table 2 Intercept, standard deviation, and mean longevity of amaranth by model 1 and model 2 estimated

材料 Materials	t (℃)	m (%)	模型 1 Model 1						模型 2 Model 2							
			K_i	l/σ_1	方程 Equation		σ_1	$p50_1$	方程 Equation		常数 Constant		l/σ_2		σ_2	$p50_2$
					χ^2	P			R^2	P	A	P	Estimate	P		
玉米子 Maize	20	8.32	2.374	0.002	27.958	0.000	459.019	1089.849	0.636	0.006	2.335	0.000	0.001	0.006	1250.673	1531.302
	20	12.98	2.162	0.002	12.129	0.146	555.458	1200.716	0.740	0.001	2.011	0.000	0.001	0.001	1706.211	1758.540
	20	15.65	3.270	0.005	47.545	0.000	190.327	622.359	0.799	0.001	3.529	0.000	0.003	0.001	291.860	613.034
	30	8.32	2.597	0.003	21.746	0.003	332.915	864.475	0.743	0.003	2.426	0.000	0.001	0.003	809.212	1064.022
	30	12.98	2.735	0.003	45.918	0.000	295.974	809.557	0.650	0.005	2.211	0.000	0.001	0.005	744.275	916.022
	30	15.65	3.552	0.022	10.084	0.000	45.996	163.360	0.945	0.006	4.410	0.002	0.018	0.006	54.730	163.181
	40	8.32	2.046	0.002	32.351	0.000	481.512	985.210	0.612	0.013	2.305	0.000	0.001	0.013	1010.979	1207.100
	40	8.32	2.046	0.002	32.351	0.000	481.512	985.210	0.612	0.013	2.305	0.000	0.001	0.013	1010.979	1207.100
白粟米 White millet	20	8.44	1.166	0.001	239.617	0.000	1550.523	1807.904	0.074	0.417	1.480	0.000	0.000	0.417	3271.081	2115.460
	20	13.66	1.396	0.001	27.587	0.001	1103.110	1539.987	0.398	0.051	1.438	0.000	0.000	0.051	2857.025	1910.798
	20	15.26	0.767	0.001	378.975	0.000	1174.189	900.649	0.103	0.310	2.255	0.000	0.001	0.310	1095.002	904.846
	30	8.44	1.191	0.000	218.765	0.000	2026.036	2413.174	0.046	0.528	1.482	0.000	0.000	0.528	4648.413	3017.005
	30	13.66	0.723	0.001	402.714	0.000	1471.281	1064.037	0.063	0.431	1.190	0.000	0.000	0.431	2551.160	1072.547
	30	15.26	0.394	0.004	328.926	0.000	254.334	100.229	0.097	0.496	1.863	0.091	0.004	0.496	234.274	101.771
	40	8.44	0.910	0.000	273.278	0.000	4507.714	4102.211	0.011	0.714	1.366	0.000	0.000	0.714	9146.169	4871.003
	40	13.66	1.382	0.051	48.882	0.000	19.644	27.145	0.727	0.066	1.169	0.031	0.015	0.066	67.431	26.984
红粟米 Red millet	20	8.29	1.513	0.001	187.204	0.000	836.149	1265.450	0.282	0.076	1.244	0.000	0.000	0.076	2542.578	1512.750
	20	12.87	1.463	0.001	137.930	0.000	952.755	1394.262	0.256	0.093	1.007	0.000	0.000	0.093	3583.684	1702.159
	20	15.22	1.539	0.002	231.694	0.000	515.061	792.686	0.434	0.028	1.064	0.000	0.001	0.028	1558.403	819.904
	30	8.29	1.398	0.001	125.635	0.000	1084.566	1516.156	0.256	0.093	1.211	0.000	0.000	0.093	3362.936	1887.119
	30	12.87	1.614	0.002	129.850	0.000	626.273	1010.985	0.490	0.011	1.044	0.000	0.000	0.011	2244.765	1149.687
	30	15.22	0.901	0.004	92.818	0.000	234.170	210.982	0.323	0.183	0.906	0.003	0.002	0.183	572.131	210.581
	40	8.29	1.518	0.002	214.942	0.000	648.345	984.224	0.370	0.016	1.249	0.000	0.001	0.016	1823.046	1093.776
	40	12.87	2.001	0.036	25.051	0.000	27.772	55.572	0.967	0.000	1.167	0.000	0.011	0.000	88.869	56.455
籽粒苋-1 Grain amaranth-1	20	8.34	1.424	0.001	263.820	0.000	1001.236	1425.384	0.144	0.250	1.073	0.000	0.000	0.250	3369.505	1699.486
	20	13.48	2.366	0.002	26.454	0.000	429.843	1016.805	0.580	0.017	1.817	0.000	0.001	0.017	1456.235	1390.623
	20	16.84	3.043	0.007	52.553	0.000	145.633	443.162	0.867	0.001	2.127	0.000	0.003	0.001	338.257	432.864
	30	8.34	1.727	0.001	174.340	0.000	730.914	1262.161	0.332	0.064	1.123	0.000	0.000	0.064	2897.606	1606.865
	30	13.48	2.275	0.002	20.274	0.005	418.416	952.017	0.722	0.004	1.826	0.000	0.001	0.004	1209.101	1165.929
	40	8.34	2.218	0.002	15.382	0.052	528.474	1172.389	0.720	0.002	1.169	0.000	0.000	0.002	2845.813	1710.775
	40	13.48	0.620	0.026	64.701	0.000	38.967	24.167	0.607	0.221	1.137	0.128	0.011	0.221	89.496	24.607
	40	13.48	0.620	0.026	64.701	0.000	38.967	24.167	0.607	0.221	1.137	0.128	0.011	0.221	89.496	24.607
籽粒苋-2 Grain amaranth-2	20	8.07	1.296	0.001	167.695	0.000	1719.942	2229.258	0.090	0.345	1.011	0.000	0.000	0.345	6353.552	2891.900
	20	13.32	1.345	0.001	139.031	0.000	1330.996	1790.534	0.164	0.191	1.059	0.000	0.000	0.191	4645.700	2250.964
	20	16.07	1.682	0.003	366.949	0.000	302.376	508.542	0.620	0.002	1.300	0.000	0.001	0.002	747.041	504.317
	30	8.07	1.231	0.001	131.567	0.000	1760.394	2166.666	0.099	0.318	0.997	0.000	0.000	0.318	6149.788	2716.806
	30	13.32	1.209	0.001	222.968	0.000	1406.746	1700.192	0.096	0.328	1.031	0.000	0.000	0.328	4374.294	1996.945
	30	16.07	0.584	0.008	234.127	0.000	131.657	76.890	0.323	0.183	0.866	0.038	0.003	0.183	321.290	77.340
	40	8.07	1.256	0.000	155.745	0.000	2847.580	3576.848	0.035	0.538	0.998	0.000	0.000	0.538	11331.782	40424.740
	40	13.32	0.385	0.018	202.183	0.000	54.610	21.009	0.322	0.240	0.682	0.089	0.006	0.240	162.040	17.317

贮藏在 40℃ 含水量 12.87% 和 15.65% 的玉米子、15.26% 的白粟米和 15.22% 的红粟米、30℃ 和 40℃ 下含水量 16.84% 的籽粒苋-1、40℃ 下含水量 16.07% 的籽粒苋-2 种子未获得足够用于计算的数据

Seeds of maize stored at 40℃ with water content of 12.87% and 15.65%, white millet with water content of 15.26% and red millet with water content of 15.22%, grain amaranth-1 stored at 30℃ 和 40℃ with water content of 16.84%, grain amaranth-2 stored at 40℃ with water content of 16.07%, were not getting enough data for calculation

2.1.3 甜荞麦 模型 1 拟合的贮藏 5 个环境中的甜荞麦种子批 Kyushu Zairai Hanadaka Saba 的 5 个概率回归方程的 χ^2 值均不显著($P>0.05$,表 3),而除 15℃和含水量 11.98%的贮藏环境外,模型 2 拟合的存活比线性回归方程均达到显著或极显著水平, R^2 值均大于 0.900。这说明,对于甜荞麦种子

批,两种模型预测到的 $p50$ 和 σ 都具有统计学意义,用存活比估算甜荞麦种子批的 $p50$ 和 σ 也是可行的。因此,两者估算的 $p50$ 非常接近,相差 $-2.9\sim 28.9$ d。这也可能与观察的种子批、贮藏环境和贮藏时间次数的多少有一定关系。因为 N. Yoshiaki 等^[17]只检测了贮藏后 35 d、60 d、90 d 和 120 d 的发芽率。

表 3 由模型 1 和模型 2 估算出的荞麦种子批 Kyushu Zairai Hanadaka Saba 的截距、标准差和平均寿命
Table 3 Intercept, standard deviation, and mean longevity of buckwheat by model 1 and model 2 estimated

t (℃)	m (%)	模型 1 Model 1						模型 2 Model 2							
		K_i	$1/\sigma_1$	方程 Equation		σ_1	$p50_1$	方程 Equation		常数 Constant		$1/\sigma_2$		σ_2	$p50_2$
				χ^2	P			R^2	P	A	P	Estimate	P		
15	11.98	0.782	0.003	0.645	0.724	395.683	309.601	0.706	0.159	0.967	0.002	0.001	0.159	962.127	338.500
25	11.98	0.851	0.005	0.606	0.739	199.415	169.781	0.920	0.041	1.001	0.001	0.002	0.041	455.848	176.200
35	11.98	0.762	0.008	0.120	0.942	118.195	90.080	0.995	0.003	0.979	0.000	0.004	0.003	247.076	89.300
15	17.89	0.707	0.005	0.429	0.934	191.716	135.615	0.946	0.005	0.972	0.000	0.002	0.005	401.006	136.900
25	17.89	0.455	0.013	0.192	0.979	75.099	34.146	0.996	0.000	0.802	0.000	0.005	0.000	182.346	31.280

2.1.4 莠苣 贮藏 22 个环境中的莠苣种子批 Black seeded simp son(表 4),只有 20℃种子含水量 4.8%、5.3%、5.6% 和 6.4%,35℃种子含水量 4.2% 和 7.6%,50℃种子含水量 3.1% 和 4.0% 等 8 个贮藏环境的概率回归方程的 χ^2 值不显著,而存活比线性回归方程只有 20℃种子含水量 5.3%、5.8% 和 6.4%,35℃种子含水量 4.2%、5.8%、6.1% 和 7.6%,50℃种子含水量 5.5% 和 5.7% 等 9 个不显著。这说明,对于莠苣种子批,模型 2 预测的 $p50$ 和 σ 也较模型 1 有统计学意义,以存活比估算莠苣种子批的 $p50$ 和 σ 也是可行的。与高粱一样,模型 2 估算的标准差 σ_2 均大于 σ_1 ,最大者多 369215 d;估算的 $p50_2$ 有 6 个与 $p50_1$ 相差在 ± 10 d 以内,1 个较 $p50_1$ 少 91.4 d,其余均大于 $p50_1$,最大者多 172249.7 d;估算的截距变化在 0.941~1.590 之间,较模型 1 的 1.379~4.565 小。另外,模型 2 拟合的方程的 R^2 变化在 0.002~0.938,其中大于 0.600 的有 11 个方程。

2.2 影响 4 类作物种子 $p50$ 和 σ 的主要贮藏环境因子及其与 $p50$ 和 σ 的逐步回归方程的参数比较

综合表 1~表 4 可见,在不同贮藏温度和种子含水量组合的贮藏环境中,当贮藏温度相同时,模型 1 和模型 2 预测到的种子批的 σ 和 $p50$ 值随种子含水量的增加而减少,而当种子含水量相同时, σ 和 $p50$ 值又随贮藏温度的升高而减少,贮藏在高温中

等水分和中温高水分的种子批(如表 1 中,贮藏 40℃含水量 11.79% 和 30℃含水量 13.92% 的红甜高粱)的 σ 和 $p50$ 明显较低温低水分和低温中等水分(如贮藏 20℃含水量 6.75% 和 11.79% 的红甜高粱)的小。这揭示了贮藏温度、种子含水量及其交互作用都对贮藏中的 4 类作物种子的死亡产生了促进作用,具体表现为 $p50$ 和 σ 的缩短或减少。为确定导致 $p50$ 和 σ 值缩短的主要因素,以及能否利用其来预测 $p50$ 和 σ ,将模型 1 和 2 预测到的表 1~表 4 的 $p50_1$ 和 $p50_2$ 、 σ_1 和 σ_2 取常用对数($\log p50$ 和 $\log \sigma$)作因变量,分别与 t 、 m 、 $t\times m$ 和 $t\times \log m$,及 t 、 t^2 、 m 、 $t\times m$ 、 $\log m$ 和 $t\times \log m$ 作逐步回归分析。

2.2.1 平均寿命 从表 5 可知,4 类作物 8 个种子批的逐步回归方程及其常数、自变量的回归系数均显著或极显著。无论以 $\log p50_1$ 还是 $\log p50_2$ 为因变量,高粱和苋属种子批的逐步回归方程都只保留有自变量 $t\times m$;甜荞麦种子则有首先引入并只保留变量 $t\times m$ 和先引入 $t\times m$ 后再引入变量 $t\times \log m$ 的两个方程。以 $\log p50_1$ 为因变量时,莠苣种子批的方程有 3 种形式,第 1 种是首先引入并只保留 $t\times m$ 变量,第 2 种是在先引入变量 $t\times m$ 后再引入 $t\times \log m$ 变量,第 3 种是在第 2 种基础上再引入变量 m 。以 $\log p50_2$ 为因变量时,则只引入并保留了变量 $t\times m$ 。在甜荞麦种子批的第 2 个方程和以 $\log p50_1$ 为因变量的莠苣的第 2、3 个方程中,变量 $t\times \log m$ 的系数均为正向效应而不应被考虑。尽管不同作物和不同

因变量的方程保留的自变量有所不同,但都共同首先选择并保留了 $t \times m$ 变量。因此,是 $t \times m$ 而不是 $t \times \log m$,更不是单独的 t 、 m 和 $\log m$,加速了 4 类作物种子在贮藏过程的死亡,并缩短了贮藏寿命 $p50$,即影响 4 类作物种子 $p50$ 的主要贮藏环境因子,与小麦一样,也是 $t \times m$ 。所以, $\log p50 = K_v - C_{tm}(t \times m)$ 也是 4 类作物种子 $p50$ 与 $t \times m$ 的关系通式。

表 4 由模型 1 和模型 2 估算出的莴苣种子批 Black seeded simp son 的截距、标准差和平均寿命
Table 4 Intercept, standard deviation and mean longevity of lettuce by model 1 and model 2 estimated

t ($^{\circ}\text{C}$)	m (%)	模型 1 Model 1								模型 2 Model 2							
		K_i	$1/\sigma_1$	方程 Equation		σ_1	$p50_1$	方程 Equation		常数 Constant		$1/\sigma_2$		σ_2	$p50_2$		
				χ^2	P			R^2	P	A	P	Estimate	P				
20	4.8	1.924	0.000	6.475	0.166	2369.472	4559.371	0.717	0.033	1.042	0.000	0.000	0.033	15536.585	5451.489		
20	5.3	1.772	0.000	8.816	0.066	3077.083	5451.489	0.446	0.147	1.056	0.000	0.000	0.147	17943.662	9196.520		
20	5.6	1.926	0.000	3.086	0.544	2014.932	3880.866	0.938	0.001	1.054	0.000	0.000	0.001	11175.439	6077.000		
20	5.8	1.865	0.000	13.098	0.011	2898.176	5406.184	0.348	0.218	1.011	0.000	0.000	0.218	20222.222	10134.000		
20	6.4	1.885	0.000	6.582	0.160	2732.030	5149.447	0.573	0.082	1.025	0.000	0.000	0.082	18735.294	9639.000		
20	7.4	2.297	0.001	19.534	0.001	1006.542	2312.259	0.666	0.048	1.157	0.001	0.000	0.048	4057.325	2582.000		
20	7.8	3.782	0.003	21.733	0.000	299.482	1132.548	0.903	0.013	1.398	0.004	0.001	0.013	1281.690	1138.000		
35	4.2	1.542	0.000	9.986	0.617	3373.301	5200.986	0.002	0.885	0.992	0.000	0.000	0.885	372588.764	177450.680		
35	5.0	2.543	0.002	135.860	0.000	622.179	1581.977	0.358	0.031	1.190	0.000	0.000	0.031	2958.672	2010.800		
35	5.5	3.141	0.003	127.903	0.000	299.925	942.066	0.536	0.016	1.281	0.000	0.001	0.016	1367.876	1017.290		
35	5.8	3.311	0.005	116.450	0.000	204.467	676.945	0.706	0.094	1.367	0.000	0.001	0.094	706.306	585.551		
35	6.1	3.723	0.006	193.054	0.000	155.603	579.238	0.544	0.094	1.367	0.008	0.001	0.094	706.306	585.551		
35	6.7	4.034	0.011	161.582	0.000	91.064	367.382	0.838	0.029	1.482	0.009	0.003	0.029	380.952	361.940		
35	7.6	4.702	0.029	0.000	0.995	34.713	163.229	0.781	0.310	1.320	0.256	0.004	0.310	228.571	181.410		
50	1.6	1.379	0.002	17.599	0.024	556.270	766.939	0.535	0.010	0.990	0.000	0.001	0.010	1974.447	916.000		
50	3.1	1.404	0.001	6.676	0.572	873.493	1226.144	0.527	0.011	0.942	0.000	0.000	0.011	3805.525	1663.870		
50	4.0	1.454	0.001	4.182	0.980	974.707	1417.242	0.607	0.001	0.941	0.000	0.000	0.001	5242.798	2284.390		
50	4.1	1.672	0.003	40.311	0.000	355.756	594.678	0.496	0.005	1.024	0.000	0.001	0.005	1495.159	752.890		
50	4.2	2.183	0.007	131.372	0.000	151.997	331.874	0.534	0.011	1.189	0.000	0.002	0.011	528.279	347.180		
50	5.1	3.298	0.030	95.823	0.000	33.847	111.627	0.791	0.018	1.346	0.003	0.008	0.018	131.367	110.470		
50	5.5	3.549	0.041	88.817	0.000	24.423	86.677	0.724	0.149	1.410	0.058	0.011	0.149	94.276	85.320		
50	5.7	4.565	0.071	86.665	0.000	14.051	64.141	0.773	0.316	1.590	0.216	0.017	0.316	58.333	62.990		

对于来自模型 1 的 $\log p50_1$ 和模型 2 的 $\log p50_2$, 4 类不同作物的 K_v 分别为高粱 4.017 和 4.143、苋属 3.974 和 4.044、甜荞麦 3.029 和 3.107、莴苣 4.541 和 5.031, C_{tm} 分别为高粱 0.004937 和 0.005299、苋属 0.003737 和 0.003841、甜荞麦 0.002977 和 0.003208、莴苣 0.008762 和 0.010572 (表 5)。由两种模型获得的同一作物的 K_v 、 C_{tm} 之间似乎无明显的差异。在同一模型和物种内,不同种子批的 K_v 、 C_{tm} 的差异也无统计学意义。如高粱种的 3 个种子批的 K_v 为 3.872 ~ 4.314 和 3.951 ~ 4.586,虽然相差达 0.442 和 0.635,但 K_v 值较小的红甜高粱和甜高粱的平均值与高红高粱的 4.314 ($t = -5.697, P = 0.111 > 0.05$) 和 4.586 ($t = -10.239, P = 0.062 > 0.05$) 的差异却无统计学意义, C_{tm} 在 0.005318 ~ 0.004633 和 0.005992 ~ 0.004766 之间,相差 0.000685 和 0.001226, C_{tm} 较大的红甜高粱和红高粱的平均值与甜高粱的 0.004633 ($t = 10.322, P = 0.061 > 0.05$) 和 0.004766 ($t = 4.307, P =$

表 5 平均寿命与贮藏温度和种子含水量的交互作用的逐步回归方程及其参数

Table 5 Stepwise regression equations and their parameters of mean vitality period interaction of storage temperature and water content of seeds

材料 Materials	$\log p50_1$							$\log p50_2$						
	常数		系数		方程		保留 变量 Variable remained	常数		系数		方程 Equation		保留 变量 Variable remained
	Constant		Coefficient		Equation			Constant		Coefficient				
	Estimate	P	Estimate	P	R^2	P		Estimate	P	Estimate	P	R^2	P	
红甜高粱 Red sweet sorghum	4.004	0.000	-0.005197	0.006	0.808	0.006	$t \times m$	4.064	0.000	-0.005530	0.008	0.787	0.008	$t \times m$
高红高粱 High red sorghum	4.314	0.000	-0.005318	0.005	0.884	0.005	$t \times m$	4.586	0.000	-0.005992	0.005	0.889	0.005	$t \times m$
甜高粱 Sweet sorghum	3.872	0.000	-0.004633	0.007	0.796	0.007	$t \times m$	3.951	0.000	-0.004766	0.005	0.820	0.005	$t \times m$
合并计算的高粱种 Combined sorghum	4.017	0.000	-0.004937	0.000	0.795	0.000	$t \times m$	4.143	0.000	-0.005299	0.000	0.780	0.000	$t \times m$
玉米子 Maize	3.544	0.000	-0.002234	0.046	0.582	0.046	$t \times m$	3.825	0.000	-0.002829	0.035	0.621	0.035	$t \times m$
白粟米 White millet	4.117	0.000	-0.004059	0.012	0.681	0.012	$t \times m$	4.268	0.000	-0.004391	0.007	0.731	0.007	$t \times m$
红粟米 Red millet	3.810	0.000	-0.003296	0.010	0.700	0.010	$t \times m$	3.971	0.000	-0.003616	0.007	0.729	0.007	$t \times m$
籽粒苋-1 Grain amaranth-1	4.114	0.001	-0.004280	0.042	0.597	0.042	$t \times m$	4.402	0.001	-0.004948	0.042	0.596	0.042	$t \times m$
籽粒苋-2 Grain amaranth-2	4.069	0.000	-0.004092	0.015	0.656	0.015	$t \times m$	4.319	0.000	-0.004621	0.014	0.661	0.014	$t \times m$
合并计算的苋属 Combined amaranth	3.974	0.000	-0.003737	0.000	0.632	0.000	$t \times m$	4.044	0.000	-0.003841	0.000	0.534	0.000	$t \times m$
甜荞麦 Buck wheat(model 1)	3.029	0.001	-0.002977	0.025	0.852	0.025	$t \times m$	3.107	0.001	-0.003208	0.026	0.849	0.026	$t \times m$
甜荞麦 Buck wheat(model 2)	2.934	0.000	-0.005681	0.003	0.997	0.003	$t \times m$	3.004	0.000	-0.0061530	0.002	0.997	0.003	$t \times m$
莴苣 Lettuce(model 1)	4.541	0.000	-0.008762	0.000	0.768	0.000	$t \times m$	5.031	0.000	-0.010572	0.000	0.615	0.000	$t \times m$
莴苣 Lettuce(model 2)	3.857	0.000	-0.009810	0.000	0.850	0.000	$t \times m$							
莴苣 Lettuce(model 3)	3.337	0.000	-0.010284	0.000	0.958	0.000	$t \times m$							
			5.210237	0.000			$t \times \log m$							
			-0.412949	0.001			m							

0.145>0.05)之间的差异也无统计学意义。苋属 5 个种子批的 K_v 在 3.544 ~ 4.117 和 3.825 ~ 4.402 之间,相差达 0.573 和 0.577,白粟米、籽粒苋-1 和籽粒苋-2 的平均 K_v 值与玉米子的 3.544($t=35.815, P=0.001<0.01$) 和 3.825($t=12.924, P=0.006<0.01$)、红粟米的 3.810($t=18.681, P=0.003<0.01$) 和 3.971($t=9.185, P=0.012<0.05$) 之间的差异有统计学

意义, C_{lm} 在 0.004280 ~ 0.002234 和 0.004948 ~ 0.002829 之间,相差 0.002046 和 0.002119,白粟米、籽粒苋-1 和籽粒苋-2 的平均 C_{lm} 值也与玉米子的 0.002234($t=27.745, P=0.001<0.01$) 和 0.002829($t=11.289, P=0.008<0.01$)、红宿米的 0.003296($t=12.316, P=0.007<0.01$) 和 0.003616($t=6.419, P=0.023<0.05$) 之间的差异也有统计学意义。

2.2.2 种子死亡时间分布的标准差 从表 6 可知, 4 类作物 8 个种子批的逐步回归方程及其常数、自变量的回归系数均显著或极显著, 无论是对于 $\log\sigma_1$, 还是 $\log\sigma_2$, 高粱、苋属和莴苣种子批的方程都只保留了 $t \times m$ 变量。虽然, 以 $\log\sigma_1$ 为因变量时, 甜荞麦种子批的方程有 2 个, 但是最先被引入方程的自变

量是 $t \times m$ 。所以是 $t \times m$, 不是 $t \times \log m$, 也不是独立的 t 、 t^2 和 $\log m$, 是影响 4 类作物种子死亡时间分布批标准差的主要贮藏环境因子。因此, 与小麦一样, $\log\sigma = K - C_{WT}(t \times m)$ 也是 4 类作物种子在贮藏过程中死亡时间分布的标准差与贮藏温度和种子含水量交互作用 $t \times m$ 的关系通式。

表 6 标准差与贮藏温度和种子含水量的交互作用的逐步回归方程及其参数
Table 6 Stepwise regression equations and their parameters of mean standard deviation interaction of storage temperature and water content of seeds

	$\log p50_1$							$\log p50_2$						
材料 Materials	常数 Constant		系数 Coefficient		方程 Equation		保留 变量 Variable remained	常数 Constant		系数 Coefficient		方程 Equation		保留 变量 Variable remained
	Estimate	P	Estimate	P	R^2	P		Estimate	P	Estimate	P	R^2	P	
红甜高粱 Red sweet sorghum	4.096	0.000	-0.005514	0.006	0.801	0.006	$t \times m$	4.273	0.000	-0.004877	0.008	0.786	0.008	$t \times m$
高红高粱 High red sorghum	4.194	0.000	-0.005627	0.008	0.861	0.008	$t \times m$	4.953	0.000	-0.006263	0.004	0.894	0.004	$t \times m$
甜高粱 Sweet sorghum	3.830	0.000	-0.004939	0.009	0.771	0.009	$t \times m$	4.333	0.000	-0.005002	0.006	0.813	0.006	$t \times m$
高粱种合并计算 Combined sorghum	4.014	0.000	-0.005300	0.000	0.802	0.000	$t \times m$	4.467	0.000	-0.005259	0.000	0.802	0.000	$t \times m$
玉米子 Maize	3.321	0.000	-0.002853	0.049	0.574	0.049	$t \times m$	3.975	0.000	-0.003903	0.048	0.576	0.048	$t \times m$
白粟米 White millet	3.827	0.000	-0.004133	0.014	0.660	0.014	$t \times m$	4.243	0.000	-0.004300	0.018	0.631	0.018	$t \times m$
红粟米 Red millet	3.360	0.000	-0.003158	0.012	0.680	0.012	$t \times m$	4.132	0.000	-0.003669	0.009	0.702	0.009	$t \times m$
籽粒苋-1 Grain amaranth-1	3.665	0.000	-0.004000	0.012	0.752	0.012	$t \times m$	4.068	0.000	-0.003363	0.049	0.573	0.049	$t \times m$
籽粒苋-2 Grain amaranth-2	3.378	0.000	-0.002934	0.025	0.597	0.025	$t \times m$	4.233	0.000	-0.003644	0.019	0.629	0.019	$t \times m$
合并计算的苋属 Combined amaranth	3.878	0.000	-0.003641	0.000	0.511	0.000	$t \times m$	4.411	0.000	-0.003987	0.000	0.525	0.000	$t \times m$
甜荞麦 Buck wheat(model1)	2.996	0.000	-0.002385	0.005	0.948	0.005	$t \times m$	3.364	0.000	-0.002431	0.006	0.941	0.006	$t \times m$
甜菲麦 Buck wheat(model2)	3.221	0.000	-0.002221	0.002	0.997	0.003	$t \times m$							
			-0.019396	0.030			m							
莴苣 Lettuce	4.526	0.000	-0.010833	0.000	0.800	0.000	$t \times m$	5.497	0.000	-0.012098	0.000	0.649	0.000	$t \times m$

对于 $\log\sigma_1$ 和 $\log\sigma_2$, 4 类作物的 K 值分别为高粱 4.014 和 4.467、苋属 3.878 和 4.411、甜荞麦 2.996 和 3.364 及莴苣 4.526 和 5.497, C_{WT} 分别为高粱 0.005300 和 0.005259、苋属 0.003614 和 0.003987、甜荞麦 0.002385 和 0.002431、莴苣 0.010833 和 0.012098。同一作物的两个 K 、 C_{WT} 值之间的差异也似乎不明显。高粱种不同种子批的 K 值为 3.830~4.194 和 4.273~4.953, 相差 0.364 和 0.680。对于来自模型 1 的 $\log\sigma_1$ 而言, K 值较大的

红甜高粱和高红高粱的平均值与甜高粱的 3.830 之间无显著差异 ($t = 6.429, P = 0.098 > 0.05$), 而对于来自模型 2 的 $\log\sigma_2$, 红甜高粱和甜高粱的平均 K 值与高红高粱之间的差异则有统计学意义 ($t = -21.567, P = 0.029 < 0.05$); C_{WT} 在 0.005627~0.004939 和 0.006263~0.004877 之间, 相差 0.000688 和 0.001386。同样, 对于 $\log\sigma_1$, 红甜高粱和高红高粱的平均 C_{WT} 与甜高粱之间的差异无统计学意义 ($t = 11.177, P = 0.057 > 0.05$), 但是对于

$\log\sigma_2$,红甜高粱和甜高粱的平均 C_{WT} 值则与高红高粱之间有显著差异($t = -21.176, P = 0.03 < 0.05$)。苋属 5 个种子批的 K 值在 3.321 ~ 3.827 和 3.975 ~ 4.243 之间,相差 0.506 和 0.268;对于 $\log\sigma_1$,玉米子、红粟米和籽粒苋-2 的平均 K 值与籽粒苋-1、白粟米之间的差异有统计学意义($t = -18.546, P = 0.003 < 0.01; t = -28.176, P = 0.001 < 0.01$);对于 $\log\sigma_2$,玉米子与另外 4 个值的平均数之间也有显著差异($t = 4.622, P = 0.019 < 0.05$)。5 个种子批的 C_{WT} 在 0.002853 ~ 0.004133 和 0.003363 ~ 0.004300 之间,相差 0.001280 和 0.000937;对于 $\log\sigma_1$,玉米子、红粟米和籽粒苋-2 的平均 C_{WT} 值与白粟米和籽粒苋-1 的平均 C_{WT} 值之间有极显著差异($t = -11.899, P = 0.007 < 0.01$)。对于 $\log\sigma_2$,红粟米、籽粒苋-2 的平均 C_{WT} 与籽粒苋-1 之间有显著差异($t = 23.480, P = 0.027 < 0.05$),与玉米子和白粟米的平均 C_{WT} 之间也有显著差异($t = -35.616, P = 0.018 < 0.05$)。

2.3 方程(1)和(2)的预测准确性比较(以甜荞麦为例)

以测得的甜荞麦种子批 Kyushu Zairai Hanadaka Saba 的 $K = 2.996$ 、 $C_{WT} = 0.002385$ (对于方程 1)和

$K = 3.364$ 、 $C_{WT} = 0.002431$ (对于方程 2),比较了方程(1)和(2)预测到的贮藏 120 d 后的种子发芽率、种子发芽率从初始值 81.33% 降至 120 d 时的观察值的贮藏时间,与发芽率、贮藏时间观察值的差值及其分布在“观察值 \pm 观察值 $\times 10\%$ ”范围的频率。结果表明,方程(1)预测到的发芽率百分数的概率为 $-0.9574 \sim 0.4575$,约等于 7.1% ~ 67.8%,与种子贮藏 120 d 后的发芽率观察值相差 0.87% ~ 7.30%,其中 3 个预测值分布在“观察值 \pm 观察值 $\times 10\%$ ”的范围(表 7),占 3/5;预测的贮藏时间在 100.61 ~ 145.36 d 之间,与实际贮藏时间 120 d 相差 5.6 ~ 25.36 d,同样有 3 个预测值在“观察值 \pm 观察值 $\times 10\%$ ”的范围。方程(2)预测的发芽率在 13.61% ~ 67.07% 之间,与观察值相差 1.13% ~ 7.40%,其中 4 个值在“观察值 \pm 观察值 $\times 10\%$ ”的范围,占 4/5;预测的贮藏寿命在 103.38 ~ 166.86 d 之间,与实际寿命 120 d 相差 3.74 ~ 46.86 d,也有 3 个值在“观察值 \pm 观察值 $\times 10\%$ ”的范围。这说明包含存活比的方程(2)不仅能预测甜荞麦种子的贮藏寿命和生活力,而且其预测生活力的准确性,也和预测贮藏在低温种质库的普通小麦种子的生活力一样,较方程(1)的高。

表 7 由方程(1)和(2)预测的含水量 11.98% 和 17.98% 贮藏在 15℃、25℃ 和 35℃ 120 d 后的甜荞麦种子批的发芽率和寿命
Table 7 Germination percent and longevity of sweet buckwheat seed lot stored at 15℃, 25℃ and 35℃ after 120d with water content of 11.98% and 17.98% by equation(1) and (2) predicted

<i>t</i> (℃)	<i>m</i> (%)	<i>T</i> × <i>m</i>	OV		方程 1 Equation 1				方程 2 Equation 2			
					PV		PV-OV		PV		PV-OV	
			GP'	<i>V_i</i>	<i>K_i</i>	GP(%)	ST	GP	ST	<i>A</i>	GP	ST
			(%)			<i>V_i</i>	AE	(%)	(d)		(%)	(d)
15	11.98	179.7	68.67	0.4865	0.782	0.4575	67.8*	109.30*	-0.87	-10.7	0.967	67.07*
25	11.98	299.5	60.00	0.2533	0.851	0.2241	58.8*	114.40*	-1.20	-5.6	1.001	113.99*
35	11.98	419.3	40.00	-0.2533	0.762	-0.4491	32.7	100.61*	-7.30	-19.39	0.979	107.68*
15	17.89	268.35	52.67	0.0670	0.707	0.1787	57.2*	145.36	4.53	25.36	0.972	166.86
25	17.89	447.25	12.00	-1.1750	0.455	-0.9574	7.1	138.49	-4.90	18.49	0.802	123.74*

OV:观察值,GP:发芽率,GP':种子被贮藏 120 d 后的发芽率,AE:约等于,PV:预测值,ST:贮藏时间,* :该值分布在“观察值 \pm 观察值 $\times 10\%$ ”的范围
OV:Observed value,GP:Germination percent,GP':Germination percent of seeds after 120d stored,AE:Approximately equal,PV:Value predicted by equation (1) and (2),ST:Storage time,* :Asterisk showed that the level were distributed at a range of “observed value \pm observed value $\times 10\%$ ”

3 讨论

W. R. Schroeder 等^[12]、喻方圆等^[13]、D. V. S. S. R. Sastry 等^[14]和 A. M. Alhamdan 等^[15]虽然在贮藏

过程不同物种的种子生活力变化研究中发现了贮藏温度和种子含量的交互作用对加速降低种子的生活力有显著影响,而减少了贮藏寿命,但并未将这个交互作用与预测种子寿命和生活力的数学模型联系

起来。本研究在前期分析小麦种子老化试验的发芽率对贮藏时间的关系中,发现存活比能较概率更好地将种子存活曲线转化成直线,以及贮藏温度和种子含水量的交互作用是使种子快速死亡的主要贮藏环境因子,因此将这个因子同预测种子寿命和生活力的 ELLIS 和 ROBERTS^[2]模型联系了起来,在将改进的活力方程修改成方程(1)和(2)的基础上,证明包含存活比的模型2(方程4,方程2的变形)也能较好地预测高粱、苋属、甜荞麦和莠苣4类作物种子的平均寿命($p50$)和种子死亡时间分布的标准差(σ),而且预测的 $p50$ 和 σ 值较模型1(方程3,方程1的变形)的有统计学意义;而贮藏温度和种子含水量的交互 $t \times m$,也与在小麦中的发现一样,是影响这4类作物种子 $p50$ 和 σ 的主要贮藏环境因素。所以为3种小麦建立的 $p50$ 、 σ 与这个交互作用的数学表达式: $\log p50 = K_V - C_{tm}(t \times m)$ 和 $\log \sigma = K - C_{WT}(t \times m)$,也适用于估算这4类作物种子的 $p50$ 和 σ 。与前人建立的 $\log p50 = K_V - c_1 t - c_2 m$ ^[1] 和 $\log \sigma = K_E - C_W \log m - C_H t - C_Q t^2$ ^[2] 比较,这2个表达式只含有 $t \times m$ 一个变量,而不是前人建议的独立的 t 、 m 和 t 、 t^2 、 $\log m$,因而更突显了贮藏温度和种子含水量的相互作用对预测种子寿命和生活力的重要性。

本研究由来自模型1的 $\log \sigma_I$ 为高粱、甜荞麦和莠苣种子批测得的 K 和 C_{WT} 值可能与前人定义的改进活力方程的 K_E 、 C_W 、 C_H 和 C_Q 一样,是物种常数^[2]。因为,高粱不同种子批的 K 、 C_{WT} 之间没有显著差异。但是,苋属不同种子批测得的 K 、 C_{WT} ,可能因为这些种子批为不同的物种而产生了具有统计学意义的差异。其中,玉米子、红粟米和籽粒苋-2 可能为同一物种,而籽粒苋-1 和白粟米则可能各自为一个物种。而由来自模型2的 $\log \sigma_2$ 测得的 K 、 C_{WT} 则可能与 K_E 、 C_W 、 C_H 和 C_Q 的性质不同。因为这些 K 、 C_{WT} 在高粱种的不同种子批之间的差异有统计学意义。

以贮藏3个温度梯度2种含水量水平的甜荞麦种子批 Kyushu Zairai Hanadaka Saba 为例,对方程(1)和(2)预测种子贮藏寿命和生活力的准确性比较,证明方程(2)预测发芽率的准确性也较方程(1)高,这与利用贮藏在 -2 ± 2 °C 的低温种质库的普通小麦种子的实际发芽率和贮藏时间对其有效性的验证结果一致。所以,对于贮藏开始时初始发芽率未

被测定的种子寿命和生活力的预测,本研究认为方程(1)也许是合适的,而对于初始发芽率是已知的,尤其是贮藏在低温种质库的种子寿命和生活力的预测,则强烈推荐使用方法(2)。

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] 卢新雄,陈晓玲,陈叔平. 低温库种质安全保存理论的研究进展[J]. 植物遗传资源科学, 2000, 1(2): 54-58
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Maciej N, Christina W, Wieslaw L, et al. Assessment of variation in seed longevity within rye, wheat and the intergeneric hybrid triticales[J]. Seed Sci Res, 2009, 19: 213-224
- [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] Wilson D O, McDonald M B, Martin S K S. A probit planes method for analyzing seed deterioration data[J]. Crop Sci, 1989, 29: 471-476
- [12] 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
- [13] 喻方圆,邵岚,沈永宝. 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
- [14] 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
- [15] Alhamdan A M, Alsadon A A, Khalil S O, 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
- [16] Walters C, Lisa M H, Lana J W. Dying while Dry: Kinetics and mechanisms of deterioration in desiccated organisms [J]. Int Comparative Biol, 2005, 45: 751-758
- [17] Yoshiaki N, Pauline M M. Longevity of buckwheat seeds and their tolerance to desiccation[J]. Fagopyrum, 1989, 9: 4-9
- [18] 胡小荣,陶梅,卢新雄,等. 莠苣种子贮存最适含水量与贮藏寿命研究[J]. 江西农业学报, 2008, 20(4): 1-5
- [19] 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