

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.031

引用格式:马祥, 琚泽亮, 贾志锋, 等. 贮藏前含水量及贮藏方式对燕麦种子活力的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(2):687-701
MA Xiang, JU Ze-liang, JIA Zhi-feng, et al. Effects of Storage Methods and Water Contents Before Storage on Oat Seed Vitality[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):687-701

贮藏前含水量及贮藏方式对燕麦种子活力的影响

马祥, 琚泽亮, 贾志锋*, 刘凯强, 王小军

(青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016)

摘要:本研究以15个燕麦品种为材料,探讨不同种子含水量[12%(T1)、14%(T2)、16%(T3)]与贮藏方式(常规贮藏、密闭贮藏)对发芽特性的影响。结果表明,品种对水分胁迫的响应存在显著基因型差异($P<0.05$),且该响应受贮藏时间和方式的显著调控(‘白燕7号’在16%含水量下萌发初期表现最佳,而‘青海甜燕麦’等品种在低水分(T1)条件下发芽率更高)。此外,贮藏方式显著改变品种水分敏感性:常规贮藏使部分品种适宜含水量阈值升高至T3,密闭贮藏则使多数品种对水分的需求降低。胚胎发育分析显示,不同品种胚根与胚芽生物量对水分响应模式各异,密闭贮藏可诱导线性响应转为峰值曲线。胚根与胚芽对水分敏感性存在器官差异,表明资源分配策略具基因型特异性,同时,密闭贮藏对燕麦种子发芽特性产生极显著影响($P<0.01$)。TOPSIS综合评价表明‘青燕1号’稳定性最优。此外,胚胎指标与萌发参数高度相关,表明其可作为种子活力评估的可靠依据。

关键词:燕麦;种子含水量;种子活力;贮藏方式

中图分类号:S813.24

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0687-15

Effects of Storage Methods and Water Contents Before Storage on Oat Seed Vitality

MA Xiang, JU Ze-liang, JIA Zhi-feng*, LIU Kai-qiang, WANG Xiao-jun

(Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: In this study, 15 oat varieties were used to investigate the effects of different seed moisture content [12% (T1), 14% (T2), and 16% (T3)] and storage methods (conventional and hermetic storage) on the germination characteristics. The results revealed that there were significant genotypic differences ($P<0.05$) in response to moisture stress among the varieties, which were further influenced by storage duration and method. For example, ‘Baiyan 7’ exhibited the best performance during the initial germination stage at 16% moisture treatment (T3), whereas varieties such as ‘Qinghai Sweet Oat’ showed higher germination rates under low moisture conditions (T1). In addition, storage methods significantly altered moisture sensitivity of varieties: conventional storage increased the suitable moisture threshold to T3 for certain varieties, while hermetic storage reduced the moisture requirement of most varieties. Embryo development analysis revealed that distinct patterns in radicle and plumule biomass responses to moisture levels among varieties. Hermetic storage induced a shift from linear to peak-curve responses in these traits. Differential sensitivity to moisture between radicles and plumules was also observed, indicating genotype-specific resource allocation strategies. Hermetic storage had a highly significant effect ($P<0.01$) on oat seed germination characteristics. Based on TOPSIS comprehensive evaluation, ‘Qingyan 1’ was identified as the best stability. Furthermore, strong correlations were observed between embryo indicators and germination parameters, suggesting that they could be used as a reliable predictor of seed vigor.

收稿日期:2024-10-26;修回日期:2025-06-24

基金项目:青海省基础科学研究计划项目“青海主栽燕麦品种苗期耐盐性评价与耐盐机制研究”(2023-ZJ-750);现代农业产业技术体系建设专项“国家燕麦荞麦产业技术体系海东综合试验站”(CARS-07);青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目资助

作者简介:马祥(1987-),男,回族,青海民和人,副研究员,主要从事牧草育种与栽培方向研究, E-mail: 373536152@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: 78936178@qq.com

Key words: Oats; Seed moisture content; Seed vigor; Storage method

燕麦是禾本科燕麦属的一年生草本植物,按其遗传特征一般分为裸燕麦(*Avena nuda* L.)和皮燕麦(*Avena sativa* L.)两大类^[1]。燕麦是一种优良的粮饲兼用的禾谷类作物,其总产量仅次于小麦、水稻、玉米和大麦^[2]。全世界燕麦属的物种约30个,其中栽培种5个,野生种25个,中国现拥有燕麦物种27种^[3-4]。燕麦具有适应性强,耐寒、耐旱、喜日照的特点,能适应复杂多变和恶劣的气候条件^[5],已成为青藏高原及其周边地区冬春季节家畜补饲的重要饲草来源^[6]。因此,青藏高原大力推广燕麦种植在国家“粮改饲”“草牧业”等相关政策实施中发挥着重要作用,是解决青藏高原及周边地区草畜季节性供需矛盾、保护生态环境和促进草地畜牧业可持续发展的关键措施之一^[7-9]。

在燕麦种植过程中,适宜的燕麦种子贮藏条件可以保证其具备较强的种子活力,提高燕麦产量^[6]。种子活力是受遗传因素和环境条件共同影响的复杂农艺性状,是综合评价种子质量优劣和耐贮藏性的重要指标^[10]。种子活力是在其发育过程中逐渐形成的,而物质的积累是形成的基础,在贮藏过程中贮藏温度、贮藏方式、贮藏时间以及种子含水量等均能引起种子的活力、生理特性等变化,加速种子的老化过程^[11-14]。目前关于种子活力的测定方法常用的为标准发芽试验,主要测定种子发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长、胚芽长、胚根重、胚芽重以及幼苗的逆境抗性测定等^[15]。其中种子的含水量显著影响种子活力,是衡量其品质的关键指标^[16]。贮藏前期降低种子含水量达到适宜含水量能够延长种子的贮藏期并长久保持其生命力^[17-18]。种子含水量较高将导致种子内部温度较高,新陈代谢加速,加速了种子的老化过程,最终导致种子活力下降甚至坏死^[19-20]。林程等^[21]发现低含水量的水稻种子活力和生活力显著高于高含水量的水稻种子。Tahir等^[22]发现低水分贮藏是保持水稻种子质量的最好方法。蹇黎等^[23]通过对燕麦种子进行室温和高温高湿处理保存,发现室温处理下种子的发芽率、发芽指数及活力指数均高于高温高湿处理种子。

综上所述,适宜贮藏方式和贮藏前含水量对种子贮藏十分重要,决定贮藏种子的寿命和发芽能力^[24]。然而,现有关于种子贮藏条件的研究多关注小麦水稻等作物,对于燕麦的最适贮藏条件的研究相对较少^[20, 25-26]。因此,本试验以青藏高原广泛种

植的15个燕麦品种为试验材料,研究贮藏方式和种子含水量对不同燕麦品种种子活力的影响,为妥善保存青藏高原燕麦种质资源提供理论依据,也为培育新的燕麦品种提供优质材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选取燕麦品种种子均来源于青海省畜牧兽医科学院草原研究所土门关乡加汝尔村试验地,共选取15个燕麦品种(系)('青永久255' '青永久199' '青永久268' '青永久149' '青永久246' '青永久264' '白燕7号' '青海甜燕麦' '加燕2号' '青引1号' '青引2号' '林纳' '青海444' '青燕1号'和'青燕2号')作为供试材料。

1.2 试验方法

1.2.1 燕麦种子初始含水量测定 参照国际种子检验协会种子检验规程测定15个供试燕麦品种种子初始含水量^[25]。先称取烘前铝盒重量,并将样品燕麦种子装入铝盒称重,然后将测定样品放入提前预热到(40℃±2℃)的烘箱中加热。在该温度下烘干种子,每隔1个小时测定铝盒和种子重量直至恒重。试验设置3个重复,计算得出燕麦种子初始含水量(表1),计算公式如下:

$$\text{种子含水量}(\%) = \frac{(M_2 - M_3) / (M_2 - M_1) \times 100\%}{1}$$

式中 M_1 : 铝盒和盖的重量(g); M_2 : 烘前铝盒、盖和样品的重量(g); M_3 : 烘后铝盒、盖和样品的重量(g)。

1.2.2 燕麦种子含水量调整 本试验设置燕麦种子含水量梯度为12%、14%和16%,分别标记为T1、T2和T3。称取各品种燕麦种子,根据初始含水量计算并通过复水得到15个品种不同梯度含水量的试验材料,最后密封保存在真空锡箔袋^[27]。复水计算公式如下:

$$\text{需要加入水的重量(g)} = \frac{[(100 - M_{C0}) / (100 - M_{Cr})] - W_0}{1}$$

式中, M_{C0} 为初始含水量(%); M_{Cr} 为需要达到的含水(%); W_0 为种子质量(g)。

1.2.3 贮藏前不同含水量处理下燕麦种子活力测定 在各品种复水供试燕麦种子中选取大小均匀

一致的种子 35 粒,将其放入铺有 3 层滤纸的直径为 11 cm 的带盖培养皿中,置于恒温 20℃,光照:黑暗=8 h:16 h 的人工气候培养箱(MGC-350BP-2L,上海一恒科学仪器有限公司)中培养。在第 5 天统计种子发芽率;第 10 天测定发芽率、胚芽重、胚根重。最后计算种子活力指标,试验设置 3 个生物学重复。

$$\begin{aligned} \text{发芽势}(\%) &= \\ &(\text{规定时间内种子发芽数}/\text{供试种子数}) \times 100\% \\ \text{发芽率}(G) &= (G_{10}/N) \times 100\% \\ \text{发芽指数}(GD) &= \sum(G_t/D_t) \end{aligned}$$

式中: G_{10} 为前 10 天全部正常种苗数, N 为供试种子总数, G_t 为第 t 天的发芽数, D_t 为发芽天数。

1.2.4 不同贮藏方式下燕麦种子活力测定 各称取复水品种种子 30 g,进行常规贮藏和密闭贮藏试验。密闭贮藏试验采用加厚 PE-PA 材质包装袋包装,然后通过密封机封口(320 型,高禄禧,厦门市福多宝商贸有限公司)进行避光真空贮藏,贮藏满 1 年后进行燕麦种子活力测定。在各品种复水供试燕麦种子中选取大小均匀一致的种子 35 粒,将其放入铺有 3 层滤纸的 11 cm×11 cm 盖培养皿中,置于恒

温 20℃,光照:黑暗=8 h:16 h 的人工气候培养箱(MGC-350 BP-2L,上海一恒科学仪器有限公司)中培养。在第 5 天统计种子发芽率;第 10 天统计测定发芽率、胚芽重、胚根重。最后计算种子活力指标,试验设置 3 个生物学重复。

1.2.5 数据分析 试验数据采用 SPSS 20.0 软件统计分析,不同燕麦品种不同贮藏条件下不同含水量种子的种子活力指标发芽率、发芽势、发芽指数和胚芽胚根重的差异采用单因素方差分析(one way ANOVA,Duncan's, $\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 燕麦 15 个品种初始含水量测定

测定‘青永久 255’‘青永久 199’和‘白燕 7 号’等 15 个供试燕麦品种种子初始含水量发现,初始含水率在 8.35%~11.52% 之间,不同品种燕麦种子之间初始含水量差异较小。其中‘青海 444’含水量最低为 8.35%,‘青引 1 号’含水量最高为 11.52%(表 1)。

表 1 15 个品种燕麦初始含水量
Table 1 Initial moisture content of 15 oat varieties

编号 Number	品种 Varieties	初始含水率 Initial moisture content / %	编号 Number	品种 Varieties	初始含水率 Initial moisture content / %
1	青永久 255	9.29	9	青燕 2 号	9.77
2	青永久 199	10.43	10	青永久 149	8.66
3	白燕 7 号	9.52	11	青海 444	8.35
4	青海甜燕麦	10.77	12	青燕 1 号	8.84
5	加燕 2 号	11.02	13	青引 2 号	9.80
6	青引 1 号	11.52	14	青永久 246	9.11
7	青永久 268	10.75	15	青永久 264	9.55
8	林纳	11.27			

2.2 贮藏前期不同梯度含水量处理对燕麦种子的影响

2.2.1 贮藏前期不同梯度含水量对燕麦种子发芽指标的影响 贮藏前期不同含水量梯度对燕麦种子萌发特性具有显著影响,但不同品种间的响应模式存在明显差异(表 2)。“青海甜燕麦”“青引 1 号”和“林纳”的发芽势、发芽率以及 5 d 与 10 d 发芽指数均随含水量升高而逐渐下降;除“青引 1 号”在 T2 处理下的发芽势和 5 d 发芽指数外,T1 处理的各项指标均显著高于 T2 与 T3 处理($P<0.05$)。相比之下,“白燕 7 号”的上述指标随含水量增加呈上升趋势,T3 处理显著优于 T1 和 T2($P<0.05$)。

“加燕 2 号”和“青海 444”各萌发指标呈现先降后升的变化趋势,T1 处理下多数指标显著高于 T2 和 T3(T3 处理下的发芽势、发芽率及 5 d 发芽指数除外)。“青永久 268”“青永久 149”和“青永久 246”亦表现出先降后升的变化模式。其中,“青永久 268”在 T3 处理下萌发指标显著高于 T2;“青永久 149”和“青永久 246”在 T1 处理下发芽势和 5 d 发芽指数较高,而在 T3 处理下发芽率与 10 d 发芽指数显著优于 T2。“青燕 2 号”“青燕 1 号”和“青引 2 号”的各指标则随含水量增加呈先升后降趋势,T2 处理普遍显著高于 T1 和 T3(“青燕 1 号”在 T3 处理下的发芽势和 5 d 发芽指数除外)。此外,“青永久

255’的发芽势和5 d发芽指数随含水量上升而下降,而发芽率与10 d发芽指数则呈上升趋势;‘青永久199’的发芽势和5 d发芽指数表现为先升后降,

T2处理显著较高。值得注意的是,‘青永久264’的各项萌发指标受含水量变化的影响均不显著($P<0.05$)。

表 2 贮藏前期不同梯度含水量对燕麦种子发芽指标的影响

Table 2 Effects of different gradients of water content on germination indexes of oat seeds in the pre-storage period

品种 Variety	处理 Treatments	发芽势 Germination potential %	发芽率 Germination rate/%	5天发芽指数 Germination index at 5 days	10天发芽指数 Germination index at 10 days	品种 Variety	处理 Treatments	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	5天发芽指数 Germination index at 5 days	10天发芽指数 Germination index at 10 days
青永久 255	T1	64.76±3.30 ^a	72.38±4.36 ^c	4.53±0.23 ^a	2.53±0.15 ^c	青燕 2号	T1	53.33±4.36 ^b	77.14±5.71 ^b	3.73±0.31 ^b	2.70±0.20 ^b
	T2	57.14±2.86 ^b	81.90±1.65 ^b	4.00±0.20 ^b	2.87±0.06 ^b		T2	65.71±4.95 ^a	91.43±4.95 ^a	4.60±0.35 ^a	3.20±0.17 ^a
	T3	49.52±1.65 ^c	91.43±4.95 ^a	3.47±0.12 ^c	3.20±0.17 ^a		T3	20.95±4.36 ^c	67.62±5.95 ^b	1.47±0.31 ^c	2.37±0.21 ^b
青永久 199	T1	38.10±1.65 ^b	48.57±2.86 ^a	2.67±0.12 ^b	1.70±0.10 ^a	青永久 149	T1	64.76±7.19 ^a	78.10±3.30 ^{ab}	4.53±0.50 ^a	2.73±0.12 ^{ab}
	T2	53.33±5.95 ^a	61.90±11.55 ^a	3.73±0.42 ^a	2.17±0.40 ^a		T2	28.57±2.86 ^c	68.57±8.57 ^b	2.00±0.20 ^c	2.40±0.30 ^b
	T3	33.33±1.65 ^b	47.62±1.65 ^a	2.33±0.12 ^b	1.67±0.06 ^a		T3	46.67±1.65 ^b	85.71±5.71 ^a	3.27±0.12 ^b	3.00±0.20 ^a
白燕 7号	T1	25.71±2.86 ^c	45.71±4.95 ^c	1.80±0.20 ^c	1.60±0.17 ^c	青海 444	T1	76.19±4.36 ^a	92.38±3.30 ^a	5.33±0.31 ^a	3.23±0.12 ^a
	T2	46.67±4.36 ^b	58.10±7.19 ^b	3.27±0.31 ^b	2.03±0.25 ^b		T2	57.14±7.56 ^b	71.43±2.86 ^c	4.00±0.53 ^b	2.50±0.10 ^c
	T3	62.86±2.86 ^a	70.48±3.30 ^a	4.40±0.20 ^a	2.47±0.12 ^a		T3	67.62±3.30 ^{ab}	85.71±2.86 ^b	4.73±0.23 ^{ab}	3.00±0.10 ^b
青海甜燕 麦	T1	23.81±4.36 ^a	54.29±5.71 ^a	1.67±0.31 ^a	1.90±0.20 ^a	青燕 1号	T1	61.90±5.95 ^b	72.38±7.19 ^b	4.33±0.42 ^b	2.53±0.25 ^b
	T2	15.24±1.65 ^b	44.76±1.65 ^b	1.07±0.12 ^b	1.57±0.06 ^b		T2	73.33±4.36 ^a	86.67±7.19 ^a	5.13±0.31 ^a	3.03±0.25 ^a
	T3	4.76±1.65 ^c	40.95±1.65 ^b	0.33±0.12 ^c	1.43±0.06 ^b		T3	67.62±1.65 ^{ab}	73.33±1.65 ^b	4.73±0.12 ^{ab}	2.57±0.06 ^b
加燕 2号	T1	64.76±4.36 ^a	80.95±3.30 ^a	4.53±0.31 ^a	2.83±0.12 ^a	青引 2号	T1	47.62±5.95 ^c	69.52±3.30 ^b	3.33±0.42 ^c	2.43±0.12 ^b
	T2	52.38±5.95 ^b	60.00±4.95 ^c	3.67±0.42 ^b	2.10±0.17 ^c		T2	80.00±5.71 ^a	84.76±4.36 ^a	5.60±0.40 ^a	2.97±0.15 ^a
	T3	56.19±1.65 ^{ab}	70.48±4.36 ^b	3.93±0.12 ^{ab}	2.47±0.15 ^b		T3	63.81±3.30 ^b	69.62±3.13 ^b	4.60±0.00 ^b	2.37±0.23 ^b
青引 1号	T1	58.10±4.36 ^a	90.48±3.30 ^a	4.07±0.31 ^a	3.17±0.12 ^a	青永久 246	T1	64.38±2.56 ^a	69.52±4.36 ^b	4.87±0.31 ^a	2.37±0.12 ^b
	T2	54.29±2.86 ^{ab}	69.52±5.95 ^b	3.80±0.20 ^{ab}	2.43±0.21 ^b		T2	41.90±4.36 ^b	60.95±5.95 ^b	2.93±0.31 ^c	2.13±0.21 ^b
	T3	47.62±4.36 ^b	59.05±4.36 ^c	3.33±0.31 ^b	2.07±0.15 ^c		T3	58.10±4.36 ^a	80.95±4.36 ^a	4.07±0.31 ^b	2.83±0.15 ^a
青永久 268	T1	32.38±4.36 ^a	42.86±2.86 ^{ab}	2.27±0.31 ^a	1.50±0.10 ^{ab}	青永久 264	T1	50.48±4.36 ^a	63.81±1.65 ^a	3.53±0.31 ^a	2.23±0.06 ^a
	T2	14.29±7.56 ^b	35.24±3.30 ^b	1.00±0.53 ^b	1.23±0.12 ^b		T2	58.10±7.19 ^a	69.52±5.95 ^a	4.07±0.50 ^a	2.43±0.21 ^a
	T3	38.10±7.19 ^a	54.29±11.43 ^a	2.67±0.50 ^a	1.90±0.40 ^a		T3	58.10±1.65 ^a	62.86±2.86 ^a	4.07±0.12 ^a	2.33±0.15 ^a
林纳	T1	26.67±1.65 ^a	47.62±1.65 ^a	1.87±0.12 ^a	1.67±0.06 ^a						
	T2	18.10±1.65 ^b	40.00±0.00 ^b	1.27±0.12 ^b	1.40±0.00 ^b						
	T3	7.62±3.30 ^c	40.00±4.95 ^b	0.53±0.23 ^c	1.40±0.17 ^b						

注:不同小写字母表示每个品种的种子在不同含水量间的差异显著性($P<0.05$)。下同

Note: Different lower case letters indicate significant differences between seeds with different moisture contents at $P<0.05$ level. The same as follows

2.2.2 贮藏前期不同梯度含水量对不同品种燕麦种子胚根和胚芽重量的影响 贮藏前期不同含水量处理对燕麦种子的胚根与胚芽生物量均产生了显著影响(表3、表4)。就胚根生物量而言,‘青引1号’在T3处理下达到最高值(0.0921 g),显著高于T1与T2处理;‘加燕2号’在T1处理中胚根重量为0.0869 g,显著高于T2处理;‘青引2号’在T2处理中数值最低(0.0323 g),显著低于T1和T3($P<0.05$)。胚芽生物量方面,‘青引1号’在T3处理下最高(0.1013 g),显著高于T1处理,其T2处理值(0.0999 g)也显著高于T1;‘白燕7号’在T2处理中最低(0.0346 g),显著低于T1与T3。

不同品种胚根与胚芽生物量对含水量变化的

响应存在显著基因型差异。胚根重量随含水量升高呈递增趋势的品种包括‘青永久255’‘青引1号’和‘青永久268’;‘林纳’和‘青海444’则呈递减趋势;‘白燕7号’‘加燕2号’‘青燕2号’‘青燕1号’及‘青引2号’表现为先降后升;‘青永久199’和‘青永久246’呈先升后降。胚芽生物量方面,‘青永久255’‘青引1号’和‘青永久268’随含水量增加而递增;‘青永久149’‘青引2号’‘青永久246’和‘青永久264’呈递减趋势;‘林纳’和‘青海444’为先升后降;‘白燕7号’则表现为先降后升。

2.3 常规贮藏对不同梯度含水量处理下燕麦种子的影响

2.3.1 常规贮藏对不同梯度含水量燕麦种子发芽

指标的影响 常规贮藏不同梯度含水量对燕麦种子萌发有显著影响(表5)。“青永久199”和“青燕2号”的发芽势、发芽率、发芽指数5 d和发芽指数10 d随含水量的增加呈逐渐增高趋势,T3处理下各指数达到峰值且差异显著($P<0.05$),“青永久199”依次分别为73.33%,83.81%,5.13和2.13,“青燕2号”依次分别为66.67%,80.95%,4.67,2.83。“白燕7号”“青引1号”和“青永久264”的发芽势、发芽率、发芽指数5 d和发芽指数10 d随含水量的增加呈现持续降低的趋势,T1处理下各指数最高且差异显著($P<0.05$),“白燕7号”的发芽势、发芽率、发芽指数5 d和发芽指数10 d依次分别为60.00%,81.90%,4.20和2.87,“青引1号”依次分别为57.14%,87.62%,4.00和3.07,“青永久264”依次分别为70.48%,87.62%,4.93和3.07。“青永久268”“青海444”和“青永久246”的发芽势、发芽率、发芽指数5 d和发芽指数10 d随含水量的增加呈现先降后增的趋势,“青永久268”和“青海444”在T3处理下最高,“青永久246”在T1处理下最高,“青永久268”的发芽势、发芽率、发芽指数5 d和发芽指数10 d依次分别为26.67%,76.19%,1.87和2.67,“青海444”依次分别为75.24%,92.38%,5.27和3.23,“青永久246”依次分别为56.19%,92.38%,3.93和3.23。“青海甜燕麦”的发芽势、发芽率、发芽指数5 d和发芽指数10 d随含水量的增加呈现先增后降的趋势,T2处理下各指数最高且差异显著($P<0.05$),依次分别为41.90%,73.33%,2.93和2.57。

2.3.2 常规贮藏不同梯度含水量对不同品种燕麦种子胚根和胚芽重量的影响 如表3和表4所示,常规贮藏下,“加燕2号”在T3处理下胚根重量最高,为0.0840 g,显著高于T1处理($P<0.05$),其次是T2处理下的“青引1号”,为0.0811 g,显著高于T3处理($P<0.05$),T3处理下的“青引2号”最低,为0.0328 g,显著低于T2处理($P<0.05$);常规贮藏下,加燕2号在T3处理下胚芽重量最高,为0.1045 g,显著高于T1和T2处理($P<0.05$),“林纳”在T2处理下最低,为0.0630 g,显著低于T1和T3处理($P<0.05$)。

常规贮藏下,“青永久255”“白燕7号”“青海甜燕麦”“加燕2号”“青永久268”“青燕2号”和“青永久149”的胚根重量随含水量的增加呈逐渐递增的趋势,“青永久199”“青引1号”“青海444”和“青永久246”呈逐渐递减的趋势,“青燕1号”和“青引2

号”呈先增后降的趋势,“林纳”和“青永久264”呈先降后增的趋势。“青永久199”“白燕7号”“青海甜燕麦”“加燕2号”“青永久268”和“青永久264”的胚芽重量随含水量的增加呈逐渐递增的趋势,“青引1号”“青永久149”和“青永久246”呈逐渐递减的趋势,“青燕1号”和“青引2号”呈先增后减的趋势,“青永久255”“林纳”和“青海444”呈先降后增的趋势。

2.4 密闭贮藏对不同梯度含水量处理下燕麦种子的影响

2.4.1 密闭贮藏对不同梯度含水量燕麦种子发芽指标的影响 在密闭贮藏条件下,不同种子含水量对燕麦种子的萌发特性具有显著影响(表6)。“白燕7号”“青海甜燕麦”“青永久149”和“青引2号”的发芽势、发芽率、5 d发芽指数及10 d发芽指数均随含水量增加呈持续下降趋势。其中,“白燕7号”“青海甜燕麦”和“青引2号”在T1处理下各指标均达到峰值且显著高于其他处理($P<0.05$),其发芽势分别为53.33%、46.67%和73.33%,发芽率分别为70.48%、73.33%和87.62%,5 d发芽指数分别为3.73、3.27和5.13,10 d发芽指数分别为2.47、2.57和3.07。“青永久149”则在T2处理下表现最优,发芽势、发芽率、5 d及10 d发芽指数分别为66.67%、79.05%、4.67和2.77。“林纳”“青燕2号”和“青永久264”的各萌发指标均呈先升后降趋势,并于T2处理下达到峰值($P<0.05$)。其发芽势分别为47.62%,80.95%和79.05%,发芽率分别为63.81%,92.38%和92.38%,5 d发芽指数分别为3.33、5.67和5.53,10 d发芽指数分别为2.23、3.23和3.23。“青海444”和“青永久246”则呈先降后升趋势,峰值出现于T3处理($P<0.05$),发芽势分别为72.38%和76.19%,发芽率分别为80.95%和89.52%,5 d发芽指数分别为5.07和5.33,10 d发芽指数分别为2.83和3.13。此外,在密闭贮藏条件下,发芽势与5 d发芽指数的变化模式相似,发芽率与10 d发芽指数的变化亦趋于一致。

2.4.2 密闭贮藏不同梯度含水量对不同品种燕麦种子胚根和胚芽重量的影响 密闭贮藏下,“加燕2号”在T2处理下胚根重量最高,为0.891 g,显著高于T3处理($P<0.05$),其次是T2处理下的“青永久246”,为0.857 g,显著高于T1和T3处理($P<0.05$),T3处理下的“白燕7号”最低,为0.274 g,显

表 3 不同贮藏条件下梯度含水量对不同品种燕麦种子胚根重量的影响

Table 3 Effects of gradient water content on radicle weight of different varieties of oat seeds under different storage conditions 单位:g

品种	处理	贮藏前期	常规贮藏	密闭贮藏	品种	处理	贮藏前期	常规贮藏	密闭贮藏
Variety	Treatments	Pre-storage period	Conventional storage	Airtight storage	Variety	Treatments	Pre-storage period	Conventional storage	Airtight storage
青永久 255	T1	0.0494±0.0028 ^b	0.0520±0.0064 ^c	0.696±0.0069 ^a	青燕 2 号	T1	0.0601±0.0068 ^a	0.0602±0.0040 ^b	0.596±0.0040 ^a
	T2	0.0496±0.0034 ^b	0.0614±0.0010 ^b	0.774±0.0042 ^a		T2	0.0445±0.0005 ^b	0.0516±0.0071 ^b	0.636±0.0067 ^a
	T3	0.0740±0.0067 ^a	0.0727±0.0045 ^a	0.692±0.0017 ^a		T3	0.0693±0.0046 ^a	0.0742±0.0087 ^a	0.390±0.0030 ^b
青永久 199	T1	0.0606±0.0058 ^b	0.0674±0.0016 ^a	0.372±0.0020 ^b	青永久 149	T1	0.0551±0.0090 ^a	0.0568±0.0051 ^a	0.661±0.0052 ^a
	T2	0.0808±0.0009 ^a	0.0606±0.0029 ^b	0.498±0.0035 ^a		T2	0.0590±0.0078 ^a	0.0398±0.0011 ^b	0.756±0.0028 ^a
	T3	0.0576±0.0037 ^b	0.0538±0.0036 ^c	0.404±0.0078 ^{ab}		T3	0.0673±0.0038 ^a	0.0427±0.0023 ^b	0.402±0.0108 ^b
白燕 7 号	T1	0.0331±0.0017 ^b	0.0529±0.0013 ^b	0.520±0.0035 ^b	青海 444	T1	0.0692±0.0060 ^a	0.0708±0.0008 ^a	0.601±0.0034 ^b
	T2	0.0510±0.0064 ^a	0.0718±0.0017 ^a	0.663±0.0003 ^a		T2	0.0553±0.0012 ^b	0.0627±0.0007 ^b	0.679±0.0035 ^a
	T3	0.0432±0.0071 ^{ab}	0.0737±0.0049 ^a	0.274±0.0020 ^c		T3	0.0449±0.0033 ^c	0.0526±0.0005 ^c	0.370±0.0035 ^c
青海甜燕麦	T1	0.0573±0.0061 ^a	0.0350±0.0024 ^b	0.601±0.0025 ^a	青燕 1 号	T1	0.0519±0.0073 ^b	0.0452±0.0032 ^b	0.547±0.0055 ^a
	T2	0.0540±0.0074 ^a	0.0444±0.0030 ^a	0.717±0.0072 ^a		T2	0.0403±0.0015 ^c	0.0642±0.0028 ^a	0.384±0.0017 ^b
	T3	0.0654±0.0052 ^a	0.0438±0.0021 ^a	0.371±0.0090 ^b		T3	0.0679±0.0050 ^a	0.0481±0.0051 ^b	0.423±0.0023 ^b
加燕 2 号	T1	0.0869±0.0033 ^a	0.0704±0.0044 ^b	0.788±0.0087 ^a	青引 2 号	T1	0.0596±0.0044 ^a	0.0399±0.0029 ^{ab}	0.534±0.0028 ^a
	T2	0.0622±0.0043 ^b	0.0802±0.0030 ^{ab}	0.891±0.0032 ^a		T2	0.0323±0.0053 ^b	0.0441±0.0055 ^a	0.428±0.0050 ^b
	T3	0.0820±0.0043 ^a	0.0840±0.0073 ^a	0.618±0.0054 ^b		T3	0.0558±0.0039 ^a	0.0328±0.0040 ^b	0.367±0.0025 ^b
青引 1 号	T1	0.0647±0.0066 ^b	0.0772±0.0005 ^a	0.583±0.0125 ^b	青永久 246	T1	0.0461±0.0098 ^b	0.0673±0.0055 ^a	0.657±0.0012 ^b
	T2	0.0659±0.0057 ^b	0.0811±0.0010 ^a	0.738±0.0013 ^a		T2	0.0673±0.0072 ^a	0.0642±0.0020 ^a	0.857±0.0031 ^a
	T3	0.0921±0.0047 ^a	0.0591±0.0064 ^b	0.446±0.0034 ^b		T3	0.0578±0.0005 ^{ab}	0.0491±0.0021 ^b	0.416±0.0062 ^c
青永久 268	T1	0.0380±0.0067 ^b	0.0491±0.0051 ^b	0.486±0.0047 ^a	青永久 264	T1	0.0536±0.0039 ^a	0.0687±0.0050 ^a	0.656±0.0075 ^a
	T2	0.0718±0.0049 ^a	0.0592±0.0036 ^a	0.596±0.0083 ^a		T2	0.0511±0.0052 ^a	0.0522±0.0022 ^b	0.666±0.0093 ^a
	T3	0.0702±0.0016 ^a	0.0590±0.0020 ^a	0.553±0.0029 ^a		T3	0.0557±0.0048 ^a	0.0727±0.0038 ^a	0.482±0.0018 ^b
林纳	T1	0.0538±0.0111 ^a	0.0493±0.0027 ^a	0.499±0.0025 ^b					
	T2	0.0467±0.0024 ^b	0.0363±0.0026 ^b	0.623±0.0029 ^a					
	T3	0.0404±0.0031 ^c	0.0491±0.0005 ^a	0.530±0.0067 ^b					

表 4 不同梯度含水量贮藏条件下对不同品种燕麦种子胚芽重量的影响

Table 4 Effects of different gradient water content storage conditions on the germ weight of different varieties of oat seeds 单位:g

品种	含水量	贮藏前期	常规贮藏	密闭贮藏	品种	含水量	贮藏前期	常规贮藏	密闭贮藏
Variety	Moisture content	Pre-storage period	Conventional storage	Airtight storage	Variety	Moisture content	Pre-storage period	Conventional storage	Airtight storage
青永久 255	T1	0.0761±0.0033 ^b	0.0990±0.0085 ^a	0.0985±0.0103 ^b	青燕 2 号	T1	0.0833±0.0052 ^a	0.0991±0.0052 ^a	0.0978±0.0048 ^a
	T2	0.0800±0.0029 ^{ab}	0.0848±0.0010 ^b	0.0921±0.0050 ^b		T2	0.0832±0.0032 ^a	0.0994±0.0070 ^a	0.1348±0.0612 ^a
	T3	0.0873±0.0058 ^a	0.1001±0.0041 ^a	0.1154±0.0080 ^a		T3	0.0817±0.0121 ^a	0.1108±0.0076 ^a	0.0827±0.0029 ^a
青永久 199	T1	0.0713±0.0031 ^a	0.0732±0.0039 ^b	0.0568±0.0057 ^b	青永久 149	T1	0.0911±0.0053 ^a	0.0784±0.0023 ^a	0.1034±0.0067 ^a
	T2	0.0683±0.0076 ^a	0.0728±0.0020 ^b	0.0704±0.0027 ^a		T2	0.0850±0.0048 ^{ab}	0.0819±0.0024 ^a	0.1072±0.0023 ^a
	T3	0.0716±0.0019 ^a	0.0830±0.0009 ^a	0.0504±0.0099 ^b		T3	0.0752±0.0095 ^b	0.0703±0.0026 ^b	0.0613±0.0077 ^b
白燕 7 号	T1	0.0704±0.0045 ^a	0.0722±0.0033 ^b	0.0807±0.0039 ^a	青海 444	T1	0.0909±0.0025 ^b	0.1009±0.0034 ^a	0.1059±0.0055 ^a
	T2	0.0346±0.0037 ^b	0.0858±0.0015 ^a	0.0746±0.0057 ^a		T2	0.0970±0.0009 ^a	0.0860±0.0020 ^c	0.0998±0.0120 ^{ab}
	T3	0.0731±0.0077 ^a	0.0903±0.0052 ^a	0.0427±0.0018 ^b		T3	0.0858±0.0034 ^b	0.0939±0.0010 ^b	0.0870±0.0026 ^b
青海甜燕麦	T1	0.0664±0.0085 ^a	0.0810±0.0040 ^b	0.0964±0.0046 ^a	青燕 1 号	T1	0.0864±0.0021 ^a	0.0900±0.0069 ^b	0.1117±0.0081 ^a
	T2	0.0778±0.0070 ^a	0.0833±0.0026 ^b	0.0936±0.0031 ^a		T2	0.0766±0.0078 ^a	0.1029±0.0045 ^a	0.0756±0.0063 ^b
	T3	0.0742±0.0007 ^a	0.0904±0.0013 ^a	0.0654±0.0013 ^b		T3	0.0850±0.0113 ^a	0.0831±0.0015 ^b	0.0688±0.0032 ^b
加燕 2 号	T1	0.0941±0.0060 ^a	0.0808±0.0064 ^c	0.1109±0.0052 ^a	青引 2 号	T1	0.0684±0.0076 ^b	0.0763±0.0041 ^b	0.0961±0.0050 ^a
	T2	0.0916±0.0053 ^a	0.0938±0.0027 ^b	0.0978±0.0050 ^b		T2	0.0667±0.0027 ^b	0.0893±0.0049 ^a	0.0747±0.0023 ^b
	T3	0.0993±0.0017 ^a	0.1045±0.0034 ^a	0.0813±0.0035 ^c		T3	0.0869±0.0010 ^a	0.0716±0.0013 ^b	0.0708±0.0066 ^b
青引 1 号	T1	0.0786±0.0065 ^b	0.0990±0.0003 ^a	0.1049±0.0120 ^a	青永久 246	T1	0.0796±0.0057 ^b	0.1001±0.0013 ^a	0.1060±0.0038 ^a
	T2	0.0999±0.0028 ^a	0.0970±0.0015 ^a	0.1014±0.0042 ^a		T2	0.0749±0.0025 ^b	0.0878±0.0095 ^b	0.0853±0.0029 ^b
	T3	0.1013±0.0015 ^a	0.0897±0.0018 ^b	0.0749±0.0088 ^b		T3	0.0899±0.0043 ^a	0.0678±0.0037 ^c	0.0603±0.0056 ^c
青永久 268	T1	0.0584±0.0082 ^b	0.0631±0.0050 ^b	0.0858±0.0034 ^a	青永久 264	T1	0.0802±0.0010 ^a	0.0646±0.0013 ^b	0.0680±0.0043 ^b
	T2	0.0523±0.0052 ^b	0.0808±0.0012 ^a	0.0941±0.0027 ^a		T2	0.0758±0.0032 ^a	0.0619±0.0034 ^b	0.0798±0.0089 ^a
	T3	0.0769±0.0052 ^a	0.0731±0.0049 ^a	0.0628±0.0064 ^b		T3	0.0690±0.0021 ^b	0.0828±0.0022 ^a	0.0803±0.0020 ^a
林纳	T1	0.0567±0.0089 ^b	0.0790±0.0022 ^a	0.0743±0.0030 ^a					
	T2	0.0699±0.0083 ^a	0.0630±0.0039 ^b	0.0796±0.0030 ^a					
	T3	0.0569±0.0020 ^b	0.0743±0.0035 ^a	0.0620±0.0040 ^b					

表 5 常规贮藏不同梯度含水量对燕麦种子发芽指标的影响

Table 5 Effects of different gradient water content on germination index of oat seeds during conventional storage

品种 Variety	含水量 Moisture content	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	5天发芽指数 Germination index at 5 days	10天发芽指数 Germination index at 10 days	品种 Variety	含水量 Moisture content	发芽势 Germination potential %	发芽率 Germination rate/%	5天发芽指数 Germination index at 5 days	10天发芽指数 Germination index at 10 days
青永久 255	T1	62.86±4.95 ^a	85.71±2.86 ^a	4.40±0.35 ^a	3.00±0.10 ^a	青燕 2 号	T1	43.81±1.65 ^c	70.48±3.30 ^b	3.07±0.12 ^c	2.47±0.12 ^b
	T2	42.86±2.86 ^c	69.52±4.36 ^b	3.00±0.20 ^c	2.43±0.15 ^b		T2	53.33±1.65 ^b	78.10±3.30 ^{ab}	3.73±0.12 ^b	2.73±0.12 ^{ab}
	T3	52.38±4.36 ^b	62.86±5.71 ^b	3.67±0.31 ^b	2.20±0.20 ^b		T3	66.67±1.65 ^a	80.95±5.95 ^a	4.67±0.12 ^a	2.83±0.21 ^a
青永久 199	T1	32.38±1.65 ^b	65.71±2.86 ^{ab}	2.27±0.12 ^b	2.30±0.10 ^b	青永久 149	T1	56.19±5.95 ^a	83.81±1.65 ^b	3.93±0.42 ^a	2.93±0.06 ^b
	T2	40.00±4.95 ^b	61.90±1.65 ^{ab}	2.80±0.35 ^b	2.17±0.06 ^b		T2	66.67±5.95 ^a	95.24±1.65 ^a	4.67±0.42 ^a	3.33±0.06 ^a
	T3	73.33±7.19 ^a	83.81±1.65 ^a	5.13±0.50 ^a	2.93±0.06 ^a		T3	31.43±5.71 ^b	73.33±4.36 ^c	2.20±0.40 ^b	2.57±0.15 ^c
白燕 7 号	T1	60.00±5.71 ^a	81.90±4.36 ^a	4.20±0.40 ^a	2.87±0.15 ^a	青海 444	T1	62.86±2.86 ^b	90.48±3.30 ^a	4.40±0.20 ^b	3.17±0.12 ^a
	T2	50.48±4.36 ^b	63.81±1.65 ^{ab}	3.53±0.31 ^b	2.23±0.06 ^b		T2	44.76±1.65 ^c	65.71±5.71 ^b	3.13±0.12 ^c	2.30±0.20 ^b
	T3	30.48±1.65 ^c	42.86±5.71 ^c	2.13±0.12 ^c	1.50±0.20 ^c		T3	75.24±1.65 ^a	92.38±3.30 ^a	5.27±0.12 ^a	3.23±0.12 ^a
青海甜燕麦	T1	46.67±8.73 ^b	59.05±4.36 ^b	3.27±0.61 ^b	2.07±0.15 ^b	青燕 1 号	T1	63.81±1.65 ^b	72.38±3.95 ^b	4.47±0.12 ^b	2.53±0.21 ^b
	T2	41.90±3.30 ^a	73.33±3.30 ^a	2.93±0.23 ^a	2.57±0.12 ^a		T2	72.38±3.30 ^a	85.24±5.41 ^a	5.07±0.23 ^a	2.87±0.35 ^{ab}
	T3	36.19±1.65 ^b	43.81±4.36 ^c	2.53±0.12 ^b	1.53±0.15 ^c		T3	70.48±4.36 ^{ab}	89.52±5.95 ^a	4.93±0.31 ^{ab}	3.13±0.21 ^a
加燕 2 号	T1	41.90±4.36 ^b	59.05±4.36 ^{ab}	2.93±0.31 ^a	2.07±0.15 ^b	青引 2 号	T1	51.43±0.00 ^a	69.52±3.30 ^b	3.60±0.00 ^a	2.43±0.12 ^b
	T2	59.05±4.36 ^a	79.05±3.30 ^a	2.93±0.31 ^a	2.77±0.12 ^a		T2	56.19±1.65 ^a	82.86±2.86 ^a	3.93±0.12 ^a	2.90±0.10 ^a
	T3	33.33±1.65 ^c	55.24±1.65 ^{ab}	2.33±0.12 ^b	1.93±0.06 ^b		T3	36.19±5.95 ^b	56.19±1.65 ^c	2.53±0.42 ^b	1.97±0.06 ^c
青引 1 号	T1	57.14±4.95 ^a	87.62±4.36 ^a	4.00±0.35 ^a	3.07±0.15 ^a	青永久 246	T1	56.19±1.65 ^a	92.38±3.30 ^a	3.93±0.12 ^a	3.23±0.12 ^a
	T2	40.95±1.65 ^b	80.00±2.86 ^a	2.87±0.12 ^b	2.80±0.10 ^a		T2	32.38±7.19 ^c	62.86±7.56 ^c	2.27±0.50 ^c	2.20±0.26 ^c
	T3	46.67±3.30 ^b	64.76±4.36 ^{ab}	3.27±0.23 ^b	2.27±0.15 ^b		T3	43.81±3.30 ^b	77.14±2.86 ^b	3.07±0.23 ^b	2.70±0.10 ^b
青永久 268	T1	25.71±2.86 ^a	53.33±4.36 ^b	1.80±0.20 ^a	1.87±0.15 ^b	青永久 264	T1	70.48±7.19 ^a	87.62±5.95 ^a	4.93±0.50 ^a	3.07±0.21 ^a
	T2	10.48±3.30 ^b	39.05±3.30 ^c	0.73±0.23 ^b	1.37±0.12 ^c		T2	46.67±1.65 ^b	56.19±7.19 ^b	3.27±0.12 ^b	1.97±0.25 ^b
	T3	26.67±1.65 ^a	76.19±5.95 ^a	1.87±0.12 ^a	2.67±0.21 ^a		T3	31.43±5.71 ^c	58.10±4.36 ^b	2.20±0.40 ^c	2.03±0.15 ^b
林纳	T1	29.52±3.30 ^b	60.00±4.95 ^{ab}	2.07±0.23 ^b	2.10±0.17 ^{ab}						
	T2	26.67±4.36 ^b	51.43±5.71 ^b	1.87±0.31 ^b	1.80±0.20 ^b						
	T3	30.48±1.65 ^a	64.76±4.36 ^a	2.13±0.12 ^a	2.27±0.15 ^a						

表 6 密闭贮藏不同梯度含水量对燕麦种子发芽指标的影响

Table 6 Effects of different gradient water contents in sealed storage on germination indices of oat seeds

品种 Variety	处理 Treatments	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	5天发芽指数 Germination index at 5 days	10天发芽指数 Germination index at 10 days	品种 Variety	处理 Treatments	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	5天发芽指数 Germination index at 5 days	10天发芽指数 Germination index at 10 days
青永久 255	T1	53.33±4.36 ^b	73.33±3.30 ^a	3.73±0.31 ^b	2.57±0.12 ^a	青燕 2 号	T1	47.62±1.65 ^c	73.33±4.36 ^b	3.33±0.12 ^c	2.57±0.15 ^b
	T2	64.76±3.30 ^a	70.48±1.65 ^a	4.53±0.23 ^a	2.47±0.06 ^a		T2	80.95±3.30 ^a	92.38±1.65 ^a	5.67±0.23 ^a	3.23±0.06 ^a
	T3	45.71±5.71 ^b	56.19±4.36 ^b	3.20±0.40 ^b	1.97±0.15 ^b		T3	55.24±4.36 ^b	71.43±5.71 ^b	3.87±0.31 ^b	2.50±0.20 ^b
青永久 199	T1	33.33±3.30 ^b	71.43±2.86 ^b	2.33±0.23 ^b	2.50±0.10 ^b	青永久 149	T1	60.00±7.56 ^a	70.48±1.65 ^a	4.20±0.53 ^a	2.47±0.06 ^a
	T2	35.24±3.30 ^b	47.62±4.36 ^a	2.47±0.23 ^b	1.67±0.15 ^a		T2	66.67±5.95 ^a	79.05±5.95 ^a	4.67±0.42 ^a	2.77±0.21 ^a
	T3	70.48±4.36 ^a	84.76±4.36 ^a	4.93±0.31 ^a	2.97±0.15 ^c		T3	28.57±4.95 ^b	49.52±4.36 ^b	2.00±0.35 ^b	1.73±0.15 ^b
白燕 7 号	T1	53.33±7.19 ^a	70.48±4.36 ^a	3.73±0.50 ^a	2.47±0.15 ^a	青海 444	T1	51.43±8.57 ^b	60.00±5.71 ^b	3.60±0.60 ^b	2.10±0.20 ^b
	T2	45.71±4.95 ^a	59.05±5.95 ^b	3.20±0.35 ^a	2.07±0.21 ^b		T2	21.90±1.65 ^c	42.86±5.71 ^c	1.53±0.12 ^c	1.50±0.20 ^c
	T3	30.48±1.65 ^b	51.43±4.95 ^b	2.13±0.12 ^b	1.80±0.17 ^b		T3	72.38±3.30 ^a	80.95±4.36 ^a	5.07±0.23 ^a	2.83±0.15 ^a
青海甜燕麦	T1	46.67±3.30 ^a	73.33±4.36 ^a	3.27±0.23 ^a	2.57±0.15 ^a	青燕 1 号	T1	82.86±5.71 ^a	93.33±4.36 ^a	5.80±0.40 ^a	3.27±0.15 ^a
	T2	39.05±1.65 ^b	70.48±4.36 ^{ab}	2.73±0.12 ^b	2.47±0.15 ^{ab}		T2	75.24±4.36 ^{ab}	80.00±2.86 ^b	5.27±0.31 ^{ab}	2.80±0.10 ^b
	T3	33.33±1.65 ^c	63.81±4.36 ^b	2.33±0.12 ^c	2.23±0.15 ^b		T3	77.14±5.71 ^b	93.33±1.65 ^a	5.40±0.40 ^b	3.27±0.06 ^a
加燕 2 号	T1	52.38±3.30 ^a	66.67±1.65 ^b	3.67±0.23 ^a	2.33±0.06 ^b	青引 2 号	T1	73.33±1.65 ^a	87.62±3.30 ^a	5.13±0.12 ^a	3.07±0.12 ^a
	T2	60.00±4.95 ^a	72.38±1.65 ^a	4.20±0.35 ^a	2.53±0.06 ^a		T2	51.43±2.86 ^b	60.95±4.36 ^b	3.60±0.20 ^b	2.13±0.15 ^b
	T3	27.62±5.95 ^b	40.95±1.65 ^c	1.93±0.42 ^b	1.43±0.06 ^c		T3	44.76±7.19 ^b	52.38±4.36 ^b	3.13±0.50 ^b	1.83±0.15 ^c
青引 1 号	T1	55.24±5.95 ^a	70.48±1.65 ^b	3.87±0.42 ^a	2.47±0.06 ^b	青永久 246	T1	64.76±4.36 ^b	81.90±1.65 ^b	4.53±0.31 ^b	2.87±0.06 ^b
	T2	70.48±4.36 ^a	88.57±7.56 ^a	4.93±0.31 ^a	3.10±0.26 ^a		T2	41.90±3.30 ^c	55.24±1.65 ^c	2.93±0.23 ^c	1.93±0.06 ^c
	T3	32.38±15.74 ^b	53.33±4.36 ^a	2.27±1.10 ^b	1.87±0.15 ^c		T3	76.19±4.36 ^a	89.52±4.36 ^a	5.33±0.31 ^a	3.13±0.15 ^a
青永久 268	T1	30.48±1.65 ^a	60.00±2.86 ^a	2.13±0.12 ^a	2.10±0.10 ^a	青永久 264	T1	60.95±4.36 ^b	72.38±4.36 ^b	4.27±0.31 ^b	2.53±0.15 ^b
	T2	11.43±2.86 ^b	39.05±3.30 ^b	0.80±0.20 ^b	1.37±0.12 ^b		T2	79.05±4.36 ^a	92.38±5.95 ^a	5.53±0.31 ^a	3.23±0.21 ^a
	T3	27.62±11.55 ^a	41.90±1.65 ^b	1.93±0.81 ^a	1.47±0.06 ^b		T3	45.71±2.86 ^c	58.10±6.60 ^c	3.20±0.20 ^c	2.03±0.23 ^c
林纳	T1	27.62±3.30 ^b	43.81±1.65 ^b	1.93±0.23 ^b	1.53±0.06 ^b						
	T2	47.62±3.30 ^a	63.81±4.36 ^a	3.33±0.23 ^a	2.23±0.15 ^a						
	T3	29.52±4.36 ^b	39.05±1.65 ^b	2.07±0.31 ^b	1.37±0.06 ^b						

著低于 T1 和 T2 处理 ($P < 0.05$) (表 3, 4)。“加燕 2 号”在 T1 处理下胚芽重量最高, 为 0.1109 g, 显著高于 T2 和 T3 处理 ($P < 0.05$), T3 处理下的“白燕 7 号”最低, 为 0.0427 g, 显著低于 T1 和 T2 处理 ($P < 0.05$)。

密闭贮藏下, “青海甜燕麦”、“加燕 2 号”、“青燕 2 号”、“青永久 149”、“青燕 1 号”、“青引 2 号”和“青永久 26”的胚根重量随含水量的增加呈逐渐递减的趋势, “青永久 199”、“白燕 7 号”、“青引 1 号”、“林纳”、“青海 444”和“青永久 246”呈先增后降的趋势。“青永久 255”和“青永久 264”的胚芽重量随含水量的增加呈逐渐递增的趋势, “白燕 7 号”、“青海甜燕麦”、“加燕 2 号”、“青引 1 号”、“青永久 268”、“林纳”、“青永久 149”、“青海 444”、“青燕 1 号”、“青引 2 号”和“青永久 246”呈逐渐递减的趋势。

表 7 贮藏前期不同燕麦资源的品种与含水量双因素方差分析

Table 7 Two-way ANOVA of varieties and moisture content of different oat resources in the pre-storage period

指标 Index	处理 Treatments	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P	R ²
发芽势 Germination potential/%	品种 variety(V)	3.417	14.000	0.244	130.175	0.0000	0.950
	含水量 moisture content(MC)	0.049	2.000	0.025	13.093	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	1.341	28.000	0.048	25.544	0.0000	
发芽率 Germination rate/%	品种 variety(V)	2.481	14.000	0.177	72.285	0.0000	0.908
	含水量 moisture content(MC)	0.005	2.000	0.003	1.081	0.3437	
	品种×含水量 V×MC	0.850	28.000	0.030	12.381	0.0000	
发芽指数 (5 d) Germination index (5 d)	品种 variety(V)	169.519	14.000	12.108	132.682	0.0000	0.951
	含水量 moisture content(MC)	2.653	2.000	1.327	14.536	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	67.303	28.000	2.404	26.339	0.0000	
发芽指数 (10 d) Germination index (10 d)	品种 variety(V)	30.424	14.000	2.173	69.355	0.0000	0.904
	含水量 moisture content(MC)	0.054	2.000	0.027	0.861	0.4264	
	品种×含水量 V×MC	10.442	28.000	0.373	11.902	0.0000	
胚根重量 Radicle weight/g	品种 variety(V)	0.011	14.000	0.001	26.793	0.0000	0.854
	含水量 moisture content(MC)	0.002	2.000	0.001	26.974	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	0.011	28.000	0.000	14.207	0.0000	
胚芽重量 plumule weight/g	品种 variety(V)	0.092	14.000	0.007	1.315	0.2145	0.359
	含水量 moisture content(MC)	0.009	2.000	0.005	0.897	0.4114	
	品种×含水量 V×MC	0.152	28.000	0.005	1.081	0.3787	

2.6 不同燕麦资源的品种与含水量及其贮藏方式的 TOPSIS 分析

将同一含水量梯度或同一品种的发芽势、发芽率、天发芽指数 (5 d)、天发芽指数 (10 d)、胚根重量和胚芽重量数据进行 TOPSIS 综合排序分析, 结果显示, 在不同含水量下, 贮藏前期和常规贮藏下, 水分含量的 TOPSIS 综合排序无显著差异 (图 1a, c); 密闭贮藏下, T1 和 T2 水分处理显著高于 T3 处理。说明贮藏前期和常规贮藏下水分含量对燕麦

2.5 不同燕麦资源的品种与含水量双因素方差分析

双因素方差分析表明, 贮藏前期 (表 7), 品种、含水量及其交互作用对发芽势、天发芽指数 (5 d) 和胚根重量均具有极显著影响 ($P < 0.05$), 对胚芽重量无显著影响。品种及其和含水量的交互作用对发芽率具有极显著影响 ($P < 0.05$), 含水量对发芽率无显著影响。常规贮藏下 (表 8), 品种、含水量及其交互作用对发芽势、发芽率、天发芽指数 (5 d) 和天发芽指数 (10 d) 均具有极显著影响 ($P < 0.05$), 品种及其和含水量的交互作用对胚根重量和胚芽重量均具有极显著影响 ($P < 0.05$), 含水量对胚根重量和胚芽重量均无显著影响。密闭贮藏下 (表 9), 品种、含水量及其交互作用对发芽势、发芽率、天发芽指数 (5 d)、天发芽指数 (10 d)、胚根重量和胚芽重量均具有极显著影响 ($P < 0.05$)。

的发芽特性无显著影响, 而密闭贮藏下高水平含水量 (T3) 下注降低了燕麦的发芽特性 (图 1e)。在不同燕麦品种下, 贮藏前期 (图 1b), “青永久 255”、“加燕 2 号”、“青引 1 号”、“青燕 2 号”、“青永久 149”、“青海 444”、“青燕 1 号”、“青引 2 号”和“青永久 246”贴合度最高, 达 0.31~0.38; 常规贮藏下 (图 1d), “青引 1 号”、“青燕 2 号”、“青海 444”和“青燕 1 号”贴合度最高, 达 0.57~0.61; 密闭贮藏下 (图 1f), “青燕 1 号”贴合度最高, 为 0.52。不同燕麦品种的 TOPSIS 综

表 8 常规贮藏下不同燕麦资源的品种与含水量双因素方差分析

Table 8 Two-way ANOVA of varieties and moisture content of different oat resources under conventional storage

指标 Index	处理 Treatments	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P	R ²
发芽势 Germination potential/%	品种 Variety(V)	1.652	14.000	0.118	70.197	0.0000	0.932
	含水量 Moisture content(MC)	0.076	2.000	0.038	22.711	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	1.429	28.000	0.051	30.361	0.0000	
发芽率 Germination rate/%	品种 Variety(V)	1.085	14.000	0.077	41.306	0.0000	0.913
	含水量 Moisture content(MC)	0.106	2.000	0.053	28.194	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	1.525	28.000	0.054	29.039	0.0000	
发芽指数(5 d) Germination index (5 d)	品种 Variety(V)	81.243	14.000	5.803	70.451	0.0000	0.932
	含水量 Moisture content(MC)	3.793	2.000	1.896	23.022	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	69.914	28.000	2.497	30.313	0.0000	
发芽指数(10 d) Germination index (10 d)	品种 Variety(V)	13.005	14.000	0.929	37.548	0.0000	0.906
	含水量 Moisture content(MC)	1.298	2.000	0.649	26.240	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	18.704	28.000	0.668	27.000	0.0000	
胚根重量 Radicle weight/g	品种 Variety(V)	0.016	14.000	0.001	76.619	0.0000	0.919
	含水量 Moisture content(MC)	0.000	2.000	0.000	0.290	0.7486	
	品种×含水量 V×MC	0.007	28.000	0.000	17.541	0.0000	
胚芽重量 Plumule weight/g	品种 Variety(V)	0.013	14.000	0.001	56.418	0.0000	0.900
	含水量 Moisture content(MC)	0.000	2.000	0.000	2.493	0.0883	
	品种×含水量 V×MC	0.007	28.000	0.000	16.196	0.0000	

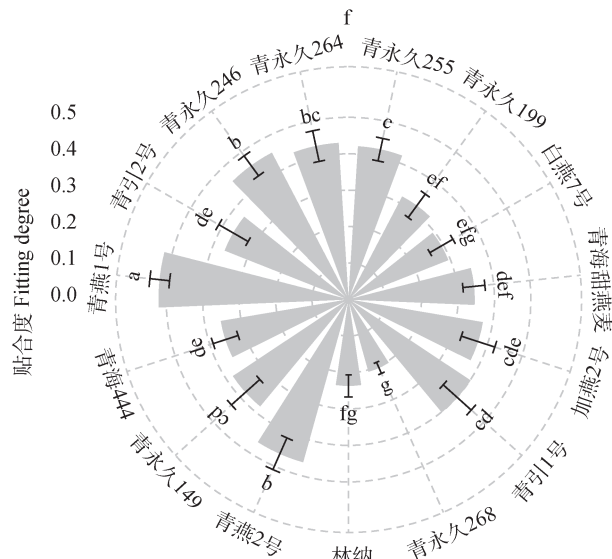
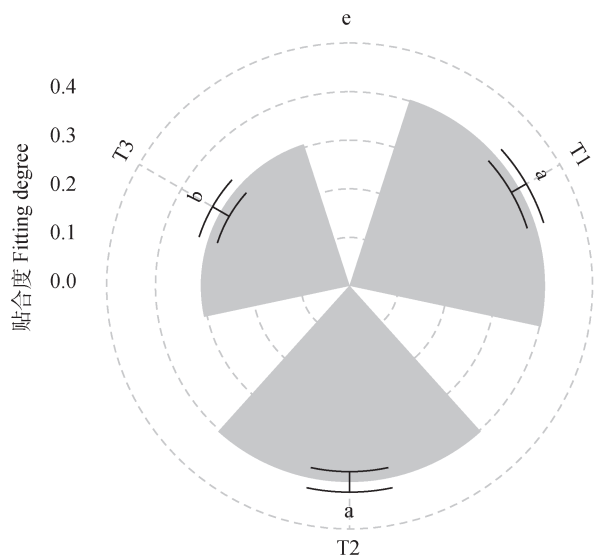
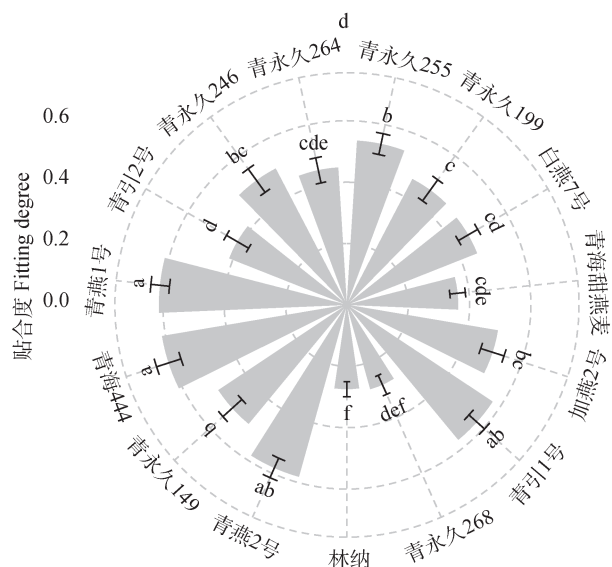
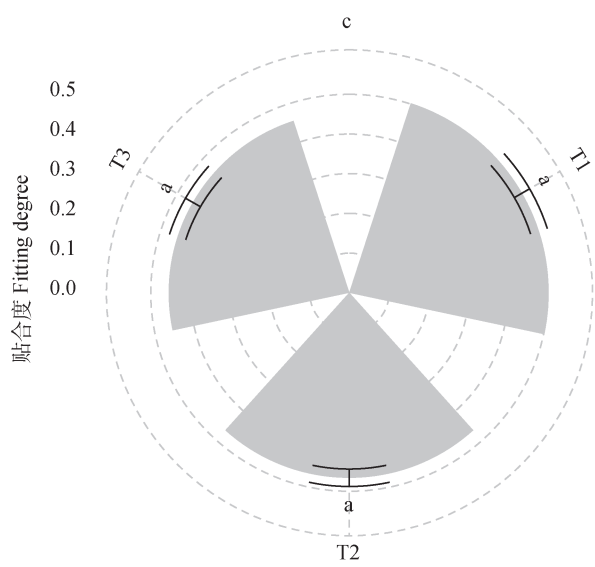
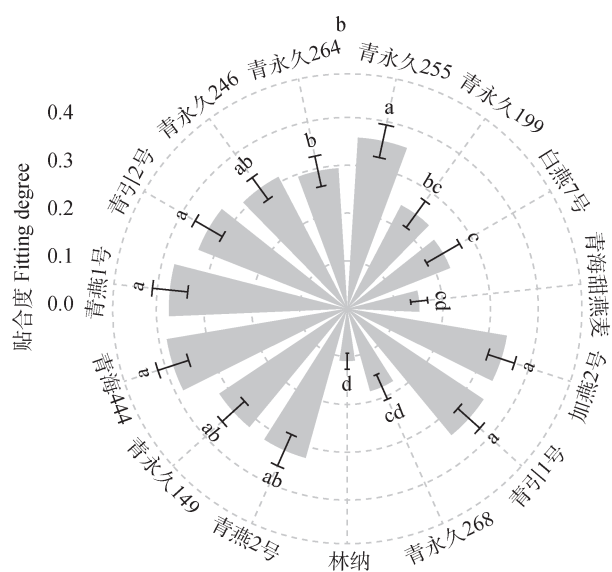
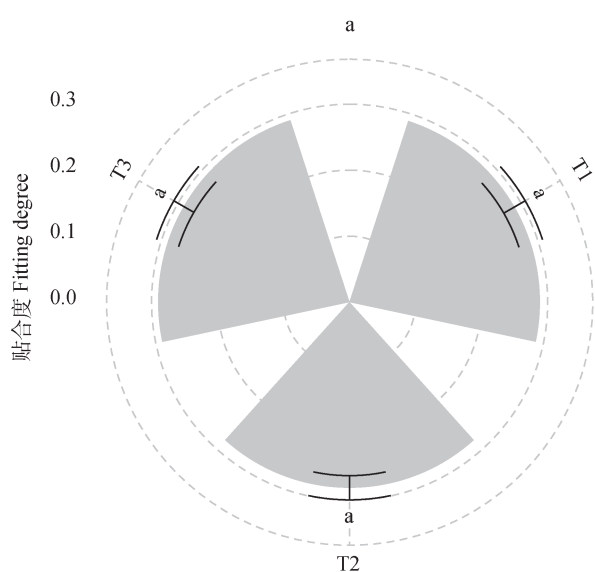
表 9 密闭贮藏下不同燕麦资源的品种与含水量双因素方差分析

Table 9 Two-way ANOVA of varieties and water content of different oat resources under confined storage

指标 Index	处理 Treatments	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P	R ²
发芽势 Germination potential/%	品种 Variety(V)	2.152	14.000	0.154	56.081	0.0000	0.921
	含水量 Moisture content(MC)	0.124	2.000	0.062	22.580	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	2.140	28.000	0.076	27.878	0.0000	
发芽率 Germination rate/%	品种 Variety(V)	1.451	14.000	0.104	63.381	0.0000	0.938
	含水量 Moisture content(MC)	0.204	2.000	0.102	62.361	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	1.708	28.000	0.061	37.320	0.0000	
发芽指数(5 d) Germination index (5 d)	品种 Variety(V)	105.346	14.000	7.525	55.938	0.0000	0.921
	含水量 Moisture content(MC)	5.928	2.000	2.964	22.033	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	105.077	28.000	3.753	27.898	0.0000	
发芽指数(10 d) Germination index (10 d)	品种 Variety(V)	17.928	14.000	1.281	63.094	0.0000	0.937
	含水量 Moisture content(MC)	2.512	2.000	1.256	61.887	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	20.959	28.000	0.749	36.880	0.0000	
胚根重量 Radicle weight/g	品种 Variety(V)	0.012	14.000	0.001	29.715	0.0000	0.878
	含水量 Moisture content(MC)	0.010	2.000	0.005	185.697	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	0.006	28.000	0.000	7.786	0.0000	
胚芽重量 Plumule weight/g	品种 Variety(V)	0.022	14.000	0.002	13.332	0.0000	0.737
	含水量 Moisture content(MC)	0.013	2.000	0.007	56.230	0.0000	
	品种×含水量 V×MC	0.014	28.000	0.001	4.319	0.0000	

合排序显示青燕 1 号在不同贮藏方式下均具有最高的贴合度,品种特性较强,不同贮藏方式下,TOPSIS 综合排序结果差异较大,说明贮藏方式对燕麦的发芽特性影响显著。然而,当我们将不同贮藏方式下所有燕麦的不同含水量梯度下的发芽势、

发芽率、天发芽指数(5 d)、天发芽指数(10 d)、胚根重量和胚芽重量数据均纳入 TOPSIS 综合排序进行分析,结果显示,不同贮藏方式下(图 1g),TOPSIS 综合排序结果无显著差异,这可能是不同燕麦品种数据的差异导致的。



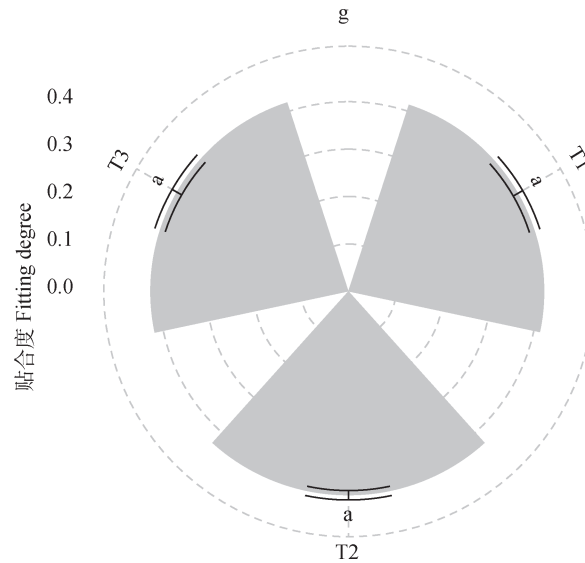


图1 不同燕麦资源的品种与含水量及其贮藏方式的TOPSIS分析

Fig. 1 TOPSIS analysis of different oat resources with respect to water content and storage methods

注:a,贮藏前期不同含水量梯度下燕麦种子发芽特性的TOPSIS综合排序;b,贮藏前期不同燕麦品种的种子发芽特性TOPSIS综合排序;c,常规贮藏下不同含水量梯度的TOPSIS综合排序;d,常规贮藏下不同燕麦品种的种子发芽特性TOPSIS综合排序;e,密闭贮藏下不同含水量梯度下燕麦种子发芽特性的TOPSIS综合排序;f,密闭贮藏下不同燕麦品种的种子发芽特性TOPSIS综合排序;g,不同贮藏方式下燕麦种子发芽特性的TOPSIS综合排序

Note: a, TOPSIS-based comprehensive ranking of oat seed germination characteristics under varying moisture content gradients during the initial storage period; b, TOPSIS-based comprehensive ranking of seed germination traits across different oat varieties in the early storage phase; c, TOPSIS comprehensive ranking under conventional storage conditions for different moisture content gradients; d, TOPSIS-based comprehensive ranking of germination characteristics among oat varieties under conventional storage; e, TOPSIS comprehensive ranking of oat seed germination traits under different moisture content gradients in hermetic storage; f, TOPSIS-based comprehensive ranking of germination characteristics across oat varieties under hermetic storage conditions; g, TOPSIS comprehensive ranking of oat seed germination characteristics under different storage methods

3 讨论

种子贮藏过程是一个自然老化过程,与种子的遗传特性和贮藏环境密不可分,其中种子含水量和温度是影响种子贮藏寿命和活力的关键因素,较高的含水量和温度都会加速种子的老化,严重时可导致种子劣变^[28-31]。因此,适宜的种子含水量是提高种子耐贮性的关键因素。本研究结果表明,本研究揭示了不同贮藏条件下含水量对燕麦种子萌发的差异化影响(表2、5、6)。在贮藏前期,品种响应呈现显著异质性($P < 0.05$):‘青海甜燕麦’‘青引1号’和‘林纳’的发芽指标随含水量增加呈逐渐下降趋势(T1最优),‘白燕7号’则相反(T3最优),‘加燕2号’‘青海444’‘青永久268’‘青永久149’和‘青永久246’呈先降后增趋势,‘青燕2号’‘青燕1号’和‘青引2号’表现为先增后降趋势(T2最优),而‘青永久264’无显著响应。常规贮藏条件下,‘青永久199’和‘青燕2号’呈逐渐上升趋势(T3最优),‘白燕7号’‘青引1号’和‘青永久264’种则相反(T1最优),

‘青海甜燕麦’呈现单峰曲线(T2最优)。密闭贮藏时,‘白燕7号’‘青海甜燕麦’和‘青引2号’呈逐渐降低趋势(T1最优),‘林纳’‘青燕2号’和‘青永久264’转为先增后降趋势(T2最优),‘青海444’和‘青永久246’则呈现“V”型响应(T3最优)。值得注意的是,发芽势与5 d发芽指数、发芽率与10 d发芽指数在各处理中均保持一致的协同变化规律($P < 0.05$)。这些发现表明,燕麦种子萌发对含水量的响应具有显著的品种特异性和贮藏条件依赖性,这种差异主要源于其生理结构和代谢特征的多样性。从种皮特性来看,‘青海甜燕麦’等品种在低含水量(T1)条件下表现优异,这与其较薄的种皮结构密切相关,该结构具有优良的透水性,但高含水量易导致呼吸代谢过强而消耗过多贮藏物质^[32]。相反,‘白燕7号’在高含水量(T3)条件下表现突出,这可能归因于其种子富含亲水性贮藏蛋白和可溶性糖类,需要较高水分活度才能充分激活其酶系统。特别值得注意的是,‘青永久264’表现出独特的水分稳定性,这很可能与其种皮特化的蜡质层结构有

关,该结构能有效缓冲外界水分波动的影响^[33]。从贮藏环境的影响来看,氧气供应状况显著调控种子的代谢途径^[34]。密闭条件下,‘青海444’等品种在高含水量(T3)时表现最佳,这可能是因为低氧环境促使种子转向效率更高的糖酵解途径。而在常规贮藏条件下,‘青永久199’在T3处理时表现最优,这可能是由于充足的氧气供应与高含水量协同促进了线粒体的有氧呼吸活性^[35,36]。在酶系统层面, α -淀粉酶和蛋白酶等关键萌发酶表现出特定的水分活度响应特征^[37]。‘青燕2号’在中等含水量(T2,约12-14%)时出现活性峰值,反映了其淀粉酶系统的最适水分窗口。呈现“V”型响应曲线的品种,则可能涉及不同酶系统的动态平衡:低含水量时以蛋白酶活性为主,高含水量时淀粉酶系统占主导地位。细胞膜系统的动态变化同样影响萌发过程^[38]。某些品种在中等含水量时出现的暂时性活力下降,可能与膜相变导致的电解质泄漏有关。而‘青永久246’等品种在高含水量(T3)时的活力恢复,则显示了其膜系统出色的修复能力。从能量代谢角度看,不同品种展现出差异化的动员策略。快速萌发型(5 d指数高)主要依赖糖原的快速分解,而持续萌发型(10 d指数高)则更需要脂类代谢的持续供能,这为解释品种间的时间动态差异提供了代谢基础。这些发现不仅揭示了燕麦种子复杂的水分响应机制,也为品种选育和贮藏管理提供了重要依据。在实际应用中,建议根据品种特性建立差异化的贮藏方案:对于薄皮燕麦宜采用低含水量贮藏,而富含亲水物质的品种则可适当提高含水量;同时需要结合贮藏环境的氧气状况,综合调控以维持最佳种子活力。

种子实际寿命也受贮藏条件和贮藏环境的影响,如环境温度、气体组成成分和贮藏时间等,其中贮藏条件严重影响种子活力。本研究结果表明,贮藏前期,T3处理下青引1号的胚根和胚芽重量均最高,不同梯度含水量下,‘青永久255’‘青引1号’和‘青永久268’胚根和胚芽重量随含水量增加而逐渐递增;‘林纳’和‘青海444’胚根重量逐渐递减,胚芽重量先增后减;‘白燕7号’的胚根重量先降后增,胚芽重量先降后增;‘青永久199’‘青永久246’胚根重量先增后降,胚芽重量递减。常规贮藏下,T3处理下‘加燕2号’的胚根重量最高,T3处理下‘青燕2号’的胚芽重量最高。不同梯度含水量下,‘白燕7号’‘青海甜燕麦’‘加燕2号’‘青永久268’‘青燕2

号’和‘青永久149’的胚根重量随含水量逐渐递增,‘青永久199’‘青引1号’‘青海444’和‘青永久246’递减,‘青燕1号’和‘青引2号’先增后降,‘林纳’和‘青永久264’先降后增;胚芽重量中‘青永久199’‘白燕7号’‘青海甜燕麦’‘加燕2号’‘青永久268’和‘青永久264’递增,‘青引1号’‘青永久149’和‘青永久246’递减,‘青燕1号’和‘青引2号’先增后减,‘青永久255’‘林纳’和‘青海444’先降后增。密闭贮藏下,T2处理下‘加燕2号’的胚根重量最高,2处理下‘青燕2号’的胚芽重量最高。不同梯度含水量下,‘青海甜燕麦’‘加燕2号’‘青燕2号’‘青永久149’‘青燕1号’‘青引2号’和‘青永久264’的胚根随含水量的增加逐渐递减,‘青永久199’‘白燕7号’‘青引1号’‘林纳’‘青海444’和‘青永久246’先增后降;胚芽重量中‘青永久255’和‘青永久264’递增,‘白燕7号’‘青海甜燕麦’‘加燕2号’‘青引1号’‘青永久268’‘林纳’‘青永久149’‘青海444’‘青燕1号’‘青引2号’和‘青永久246’递减。从遗传特性来看,递增型品种(如‘青永久255’‘青引1号’)可能具备更强的水分利用效率和耐储性,在适宜含水量范围内,水分增加能持续促进其代谢活动与胚器官生长^[39];而递减型品种(如‘青海444’‘青永久246’)对高水分敏感,过量水分易导致呼吸消耗加剧或霉菌滋生,抑制生长发育;峰型变化品种(如‘白燕7号’先降后增、‘林纳’先增后减)则可能存在特定的水分响应阈值,低水分时激活渗透调节等应激机制,但超过阈值后代谢失衡。水分对种子生理的影响呈现明显的剂量效应:低含水量限制代谢活性,导致生长迟缓;适宜水分促进酶活性和营养转运;而高水分则可能通过加速呼吸作用过度消耗贮藏物质(如淀粉、蛋白质),或引发无氧呼吸积累有害代谢物(如密闭贮藏下的乙醇),最终抑制胚器官发育^[40]。贮藏条件通过调控氧气供应进一步影响这一过程。常规贮藏(有氧环境)下,部分品种(如‘青永久199’)在高水分时因氧化应激加剧膜脂过氧化,导致生长衰退^[41];密闭贮藏(低氧)则通过抑制有氧呼吸改变代谢途径,使高水分更易诱发无氧呼吸毒性,导致‘青海甜燕麦’等品种胚芽显著递减。此外,种子可能通过动态资源分配适应环境变化,如‘白燕7号’的“先降后增”模式可能反映其初期优先修复细胞损伤、后期再启动生长的生存策略。种皮结构(渗透性)和胚乳成分(淀粉/脂肪比)等物理特性也通过调节水分吸收与利用效率参与品种间

差异的形成。因此,燕麦种子胚根与胚芽的重量变化规律是品种遗传背景与贮藏微环境互作的综合体现。实际生产中需根据品种特性精准调控含水量(如递增型可适度提高水分,递减型需严格控水),并匹配适宜贮藏方式(常规/密闭)以维持种子活力。

4 结论

本研究探讨了含水量与贮藏方式对燕麦种子萌发的影响,发现品种间存在显著水分响应差异。‘白燕7号’适宜较高含水量贮藏,而‘青海甜燕麦’更适低水分。贮藏方式显著调节品种水分适应策略:常规贮藏升高了部分品种适水阈值,而密闭贮藏促使多数品种向低水分需求转变。胚器官生物量响应亦具基因型特异性且与萌发指标显著相关。密闭贮藏显著影响所有测定指标,其机制可能与无氧呼吸增强及能量代谢调整有关,导致部分品种水分响应由线性转为峰值模式。胚根与胚芽对水分胁迫的差异响应提示器官间存在资源再分配策略。TOPSIS综合评价显示‘青燕1号’稳定性最高,适于多样化贮藏条件。胚器官指标与萌发参数高度一致,可作为种子活力的可靠评价依据。

参考文献

- [1] 杨海鹏. 中国燕麦[M]. 北京: 中国农业出版社, 1982: 5-12
YANG H P. Oats in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1982: 5-12
- [2] 王雅聪. 外源 H_2O_2 引发对燕麦种胚细胞及线粒体 AsA-GSH 循环抗氧化功能的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020: 25-30
WANG Y C. Effects of exogenous H_2O_2 on antioxidant function of AsA-GSH cycle in oat embryo cells and mitochondria [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020: 25-30
- [3] 刘迎春, 周青平. 燕麦研究最新进展[J]. 青海科技, 2011, 18(6): 20-23
LIU Y C, ZHOU Q P. The latest progress in oat research[J]. Qinghai Science and Technology, 2011, 18(6): 20-23
- [4] 郑殿升. 中国燕麦的多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(3): 249-252
ZHENG D S. Diversity of oat in China[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(3): 249-252
- [5] 董嘉莉, 何建龙, 杜建民, 等. 宁夏银北地区不同饲用燕麦品种适应性评价[J]. 草地学报, 2025, 33(7): 2299-2308
DONG J L, HE J L, DU J M, et al. Adaptability evaluation of different forage oat varieties in Yinbei area of Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2299-2308
- [6] 崔雄雄, 侯扶江, 常生华, 等. 高寒牧区两个燕麦品种的产量与品质比较[J]. 草业科学, 2018, 35(6): 1489-1495
CUI X X, HOU F J, CHANG S H, et al. Comparison of yield and nutritional quality of two oat (*Avena sativa*) varieties grown in the alpine pastoral region of China[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(6): 1489-1495
- [7] 徐丽君. 北方饲用燕麦栽培技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021: 4-8
XU L J. Cultivation Techniques for Forage Oats in Northern Regions[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2021: 4-8
- [8] 白生贵. 青海燕麦种子产业化生产的思考[J]. 农业与技术, 2018, 38(6): 52
BAI S G. Thoughts on industrialized production of oat seeds in Qinghai[J]. Agriculture & Technology, 2018, 38(6): 52
- [9] 贾志锋. 施氮量和播种密度对高寒区燕麦种子产量及其相关性状的影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021: 15-20
JIA Z F. Effect of nitrogen application levels and sowing densities on grain yield and related traits of oat in alpine region[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021: 15-20
- [10] 张昭, 伏莹莹, 孙浩文, 等. 不同品种燕麦种子活力鉴定与耐储藏性评价[J]. 草业学报, 2024, 33(6): 165-174
ZHANG Z, FU Y Y, SUN H W, et al. Identification of seed vigor and evaluation of seed storability in different varieties of oat[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(6): 165-174
- [11] 朱丽伟. 杂交水稻种子成熟过程活力、生理化和耐藏力的变化及脱水剂应用效果的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 8-20
ZHU L W. Changes of vigor, physiology, biochemistry and storability during hybrid rice seed maturity and the effect of dehydrating agent application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 8-20
- [12] 姚瑞瑞, 刘欢, 赵桂琴, 等. 贮藏时间对皮、裸燕麦种子萌发及细胞学结构的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(2): 154-163
YAO R R, LIU H, ZHAO G Q, et al. Effects of seed storage time on seed germination and cytological structure of covered oats and naked oats[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(2): 154-163
- [13] 陈泉竹, 毛培胜, 孔令琪, 等. 劣变时间和温度对不同含水量燕麦种子的活力影响[J]. 种子, 2016, 35(11): 31-35
CHEN Q Z, MAO P S, KONG L Q, et al. Effect of deterioration time and deterioration temperature on vigor of oat (*Avena sativa* L.) seeds with different moisture content [J]. Seed, 2016, 35(11): 31-35
- [14] 吕艳敏, 花梅, 张晓明, 等. 贮藏年限对白三叶种子萌发、幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 287-293
LYU Y M, HUA M, ZHANG X M, et al. Effects of storage years on seed germination, seedling growth and physiological characteristics of white clover[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 287-293
- [15] 李丹, 王晓玉, 杨玉, 等. 主要农作物种子质量标准体系现状

- 与展望[J]. 中国种业, 2023(2): 1-9
- LI D, WANG X Y, YANG Y, et al. The present situation and prospect of seed quality standard system of main crops[J]. China Seed Industry, 2023(2): 1-9
- [16] CAO L F, LI B W, ZHAO N, et al. Moisture migration analysis of Chinese naked oat during different storage conditions by sorption isotherm model and low-field NMR[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(3): 1729-1738
- [17] 高志昊, 李雪颖, 兰剑, 等. 干旱胁迫条件下不同饲用燕麦品种种子萌发指标比较与评价[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1210-1218
- GAO Z H, LI X Y, LAN J, et al. Comparison and evaluation of seed germination indexes of different forage-type oat cultivars under PEG-6000 stress[J]. Acta Agraria Sinica, 2022, 30(5): 1210-1218
- [18] GÜNGÖR H, ÇIKILI Y, DÜMLÜPINAR Z. Screening of oat varieties and landraces at early vegetative stage under salt stress conditions: morpho-physiological and PCA biplot analysis[J]. Cereal Research Communications, 2021, 49(4): 587-597
- [19] 陈利军, 王靖靖, 陈香来, 等. 基于水活度测定草类植物种子含水量[J]. 草业科学, 2018, 35(9): 2148-2156
- CHEN L J, WANG J J, CHEN X L, et al. Determination of seed moisture content based on seed water activity[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(9): 2148-2156
- [20] 陶奇波, 郅西虎, 张倩, 等. 牧草种子活力评价方法研究进展[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 200-225
- TAO Q B, QIE X H, ZHANG Q, et al. Research progress on vigor estimation for forage seeds [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2023, 32(10): 200-225
- [21] 林程, 沈杭琪, 关亚静, 等. 不同含水量和包装方式杂交水稻种子贮藏后生理生化及 ABA 和 GA3 相关基因表达的变化[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1077-1086
- LIN C, SHEN H Q, GUAN Y J, et al. Changes of physiological, biochemistry and gene expression related to ABA and GA3 in hybrid rice seeds stored at different moisture contents and packing methods[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(6): 1077-1086
- [22] TAHIR A, AFZAL I, KHALID E, et al. Rice seed longevity in the context of seed moisture contents and hypoxic conditions in the storage environment[J]. Seed Science Research, 2023, 33(1): 39-49
- [23] 蹇黎, 余丹凤, 秦小军. 不同含水量对喀斯特山区野生燕麦种子活力的影响[J]. 种子, 2014, 33(6): 25-27, 31
- JIAN L, YU D F, QIN X J. The effect of different water content on vigor of wild oats seeds in karst regions [J]. Seed, 2014, 33(6): 25-27, 31
- [24] SAHIL, MAHAJAN G, LOURA D, et al. Influence of soil moisture levels on the growth and reproductive behaviour of Avena fatua and Avena ludoviciana[J]. PLoS One, 2020, 15(7): e0234648
- [25] 刘月娥. 杂交水稻种子贮藏管理技术[J]. 南方农业, 2017, 11(22): 103-104
- LIU Y E. Storage and management techniques of hybrid rice seeds[J]. South China Agriculture, 2017, 11(22): 103-104
- [26] 王桃. 高寒牧区 36 种燕麦营养生态特性及其生产效能评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 15-18
- WANG T. Evaluation on nutritional and ecological characteristics and productive efficiency of 36 oat varieties in alpine meadow region. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 15-18
- [27] 胡伟民, 胡晋, 宋文坚, 等. 超干长期贮藏对不同类型水稻种子生活力和活力的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(4): 379-382
- HU W M, HU J, SONG W J, et al. Effects of long-term ultradry storage on viability and vigor of different kinds of rice seeds [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(4): 379-382
- [28] AFZAL I, JAFFAR I, ZAHID S, et al. Physiological and biochemical changes during hermetic storage of Moringa oleifera seeds [J]. South African Journal of Botany, 2020 (129): 435-441
- [29] 夏方山. 不同老化处理对燕麦种子线粒体结构及抗氧化系统的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 16-25
- XIA F S. Effect of different ageing treatments on mitochondrial structure and antioxidant systems in oat seeds [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 16-25
- [30] 张素瑜, 岳俊芹, 李向东, 等. 施氮对郑麦 366 光合速率、花后干物质积累及产量的影响[J]. 作物杂志, 2024(3): 127-132
- ZHANG S Y, YUE J Q, LI X D, et al. Effects of nitrogen application on photosynthetic rate, dry matter accumulation after anthesis and yield of Zhengmai 366 [J]. Crops, 2024 (3): 127-132
- [31] 闫蕴韬, 何兮, 张海清, 等. 水稻种子耐贮性研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(5): 1-8
- YAN Y T, HE X, ZHANG H Q, et al. Advances in research on the storability of rice seeds[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(5): 1-8
- [32] 朱萍, 孔令琪, 李高, 等. 贮藏温度对不同含水量老芒麦种子生理特性的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 101-108
- ZHU P, KONG L Q, LI G, et al. Effect of moisture content on physiological characteristics of Elymus sibiricus seed under different storage temperature conditions[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2011, 20(6): 101-108
- [33] 郭华仁. 种子学[M]. 台北: 国立台湾大学出版中心, 2015: 21-36
- GUO H R. Seed Science[M]. Taipei: National Taiwan University Press, 2015: 21-36
- [34] 郑广杰, 陶怡, 沈兴连, 等. 水稻种子萌发出苗研究及直播生产上相关难题[J]. 中国稻米, 2023, 29(6): 49-55
- ZHENG G J, TAO Y, SHEN X L, et al. Study on rice seed germination and seedling emergence and related problems in direct seeding production[J]. China Rice, 2023, 29(6): 49-55
- [35] 李婷婷, 冯钰枫, 朱安, 等. 主要节水灌溉方式对水稻根系形态生态生理的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 293-302

- LI T T, FENG Y F, ZHU A, et al. Effects of main water-saving irrigation methods on morphological and physiological traits of rice roots[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(4): 293-302
- [36] 朱梦馨, 曾佳, 夏方山, 等. 贮藏年限对不同居群白羊草种胚线粒体抗氧化性能的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 404-409
- ZHU M X, ZENG J, XIA F S, et al. Effects of storage years on antioxidant properties of embryonic mitochondria in different populations of *Bothriochloa ischaemum* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 404-409
- [37] 李振华, 王建华. 种子活力与萌发的生理与分子机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 646-660
- LI Z H, WANG J H. Advances in research of physiological and molecular mechanism in seed vigor and germination[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 646-660
- [38] 郭聪聪, 沈永宝, 史锋厚. 温度对白皮松种子萌发过程中储藏物质代谢及酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 25-34
- GUO C C, SHEN Y B, SHI F H. Effects of temperature on stored substance metabolism and enzyme activity during germination of *Pinus bungeana* seeds[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(6): 25-34
- [39] 王全九, 孙燕, 宁松瑞, 等. 活化灌溉水对土壤理化性质和作物生长影响途径剖析[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 660-670
- WANG Q J, SUN Y, NING S R, et al. Effects of activated irrigation water on soil physicochemical properties and crop growth and analysis of the probable pathway[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 660-670
- [40] 黎兆安, 韦善富, 周祖富, 等. 微波辐射对水稻种子发芽势及生理生化特性的影响[J]. 中国种业, 2010(1): 46-48
- LI Z A, WEI S F, ZHOU Z F, et al. Effects of microwave radiation on germination potential and physiological and biochemical characteristics of rice seeds[J]. China Seed Industry, 2010(1): 46-48
- [41] 张自常, 李永丰, 杨霞, 等. 干湿交替灌溉下不同稗草种对水稻产量及生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3389-3397
- ZHANG Z C, LI Y F, YANG X, et al. Effects of different barnyardgrass species on grain yield of rice and their physiological characteristics under alternate wetting and drying irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3389-3397

(责任编辑 彭露茜)