

不同种源臭蒿种子萌发特性与染色体核型

罗植煜¹ 余静雅² 郑清清³ 张发起^{2,3*}

(1. 青海民族大学药学院, 西宁 810007; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 3. 西宁植物园, 西宁 810001)

摘要 该文对青海省唐古拉山镇(TGL)和约改镇(YG)2个自然居群的臭蒿(*Artemisia hedinii*)种子植物学特征及萌发特性展开研究, 测定形态特征、种子活力、吸水率和含水量等功能性状, 以发芽率、发芽势、发芽指数为测定指标, 研究恒温、变温和赤霉素(GA_3)处理对臭蒿种子萌发特性的影响。同时, 采用染色体常规压片技术和核型分析方法分析臭蒿染色体核型, 揭示2个居群间染色体核型特征差异。结果表明: 臭蒿种子扁平细长, 千粒质量分别为0.121 2 g(YG)和0.090 1 g(TGL), 吸水24 h可达到饱和; 温度是影响臭蒿种子萌发的重要因素, 在适宜的萌发温度(25 °C)下种子发芽率在85%以上, 低温(5 °C)导致种子不能萌发, 高温(35 °C)抑制种子萌发, 萌发率降至72%以下, 变温和赤霉素处理可显著提高萌发指标, 赤霉素在一定程度上可以缓解高温环境对臭蒿种子萌发的抑制效应, 但对低温抑制种子萌发没有效果; 臭蒿染色体的数目为18条, 基数为9, 核型公式为 $2n=2x=18m$, 核型类型为1A, 较为对称; 唐古拉山镇居群染色体的长度比、平均臂比和核不对称系数均大于约改镇居群。综上所述, 温度是调节臭蒿种子萌发的重要因素, 2个居群的臭蒿种子适宜萌发温度为恒温25 °C与变温25 °C/15 °C, 赤霉素能有效促进种子在高温条件下萌发; 臭蒿为二倍体植物, 具有18条染色体, 染色体较为稳定对称, 异质环境可能对臭蒿染色体的进化方向产生重要影响, 驱动染色体核型朝向特定的方向演化。

关键词 臭蒿; 种子萌发; 染色体; 核型分析

中图分类号: S645.9 文献标志码: A doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2025.06.007

Seed Germination Characteristics and Chromosome Karyotype of Different Provenances of *Artemisia hedinii*

LUO Zhiyu¹ YU Jingya² ZHENG Qingqing³ ZHANG Faqi^{2,3*}

(1. College of Pharmacy, Qinghai Minzu University, Xining 810007; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001; 3. Xining Botanical Garden, Xining 810001)

Abstract The botanical characteristics and germination traits of *Artemisia hedinii* seeds from two natural populations in Tanggula Town (TGL) and Yuegai Town (YG) of Qinghai Province were investigated, and functional traits such as morphological characteristics, seed viability, water absorption rate, and water content were determined, and the effects of constant temperature, alternating temperature, and gibberellin (GA_3) treatments on seed germination traits were studied using germination rate, germination energy, and germination index as indicators. Additionally, conventional chromosome squashing technique and karyotype analysis were employed to reveal differences in chromosome karyotype characteristics between the two populations. The results showed that *A. hedinii* seeds were flat and slender, with 1 000-seed mass of 0.121 2 g (YG) and 0.090 1 g (TGL), respectively, and seeds reached water saturation after 24 hours of imbibition. Temperature was a critical factor affecting seed germination, under the optimum germination temperature (25 °C), the germination rate exceeded 85%; a low temperature (5 °C) led to no seed germination, while a high temperature (35 °C) reduced the germination rate.

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK05020102)。

第一作者简介: 罗植煜(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事药物分析与质量标准制订研究。

* 通信作者: E-mail: fqzhang@nwipb.cas.cn。

收稿日期: 2025年7月21日。

nation rate to the values less than 72%, the appropriate temperature and GA₃ treatments significantly improved germination indices. GA₃ could alleviate the inhibitory effect of high temperature on germination to a certain extent but had no effect on inhibition of low temperature. The chromosome number of *A. hedinii* was 18, with a basic chromosome number of 9, and the karyotype formula was $2n=2x=18m$, karyotype type was 1A, and chromosome was symmetrical. The chromosome length ratio, average arm ratio, and karyotype asymmetry index of the Tanggula Town population were all higher than those of the Yuegai Town population. In conclusion, temperature was an important factor regulating *A. hedinii* seed germination. The optimal germination temperatures for both populations were constant 25 °C and variable temperature 25 °C/15 °C, and GA₃ could effectively promote seed germination under high-temperature conditions. *A. hedinii* was a diploid plant with 18 stable and symmetric chromosomes, and heterogeneous environment might play a significant role in the chromosomes evolutionary direction of *A. hedinii*, driving the chromosome karyotype evolution in specific directions.

Key words *Artemisia hedinii*; seed germination; chromosome; karyotype analysis

植物种子萌发特性和染色体核型与自然分布区域的气候条件及生态环境紧密相关,不仅体现了植物对生境的适应与进化策略,还关系到幼苗建成、种群扩张、生物多样性保护及开发利用^[1]。因此,系统开展种子植物学特征及萌发特性研究具有重要意义。蒿属(*Artemisia*)植物种类繁多、生态适应性广泛,在维持生态系统稳定及药用植物资源开发中具有重要价值^[2]。国内外诸多学者对蒿属植物的种子萌发及染色体核型进行了研究。李雪华等^[3]比较了7种蒿属植物种子质量、形状及萌发特性,发现蒿属植物存在3种萌发生态规律,即前期快后期缓、全程平缓及中间快前后缓。乔有明等^[4]利用根尖压片法研究20种蒿属植物的染色体数目、形态和核型,结果显示:蒿属植物有2个染色体基数($x=8$ 和 $x=9$),存在 $2n=16$ 、 $2n=18$ 的二倍体和 $2n=36$ 的四倍体及 $2n=50$ 的混倍体;Zarifi等^[5]观察到分裂前期和分裂期染色体端粒发生融合,认为在蒿属的进化过程中,染色体的基本数目 $x=8$ 是由 $x=9$ 演化而来,同属植物的染色体数量与核型可能存在差异。

臭蒿(*A. hedinii*)是蒿属1年生草本植物,又名牛尾蒿、海定蒿^[6],主要分布于青海、四川和西藏等省区海拔2 000~4 800 m区域,常见于湖边草地、河滩、砾质坡地、田边、路旁、林缘。臭蒿的挥发油具有杀菌抑菌、防治蚊虫、消灭害虫的功效^[7]。作为民间中草药,臭蒿被《晶珠本草》^[8]、《中华本草》^[9]、《青海植物志》^[10]等记载,其性味微苦、辛,微寒,有清热、消炎和止泻之效,可用于治疗“赤巴”症、烧伤、出血及化脓性疮疡等。目前,对于臭蒿的研究多集中在抗炎抗菌活性及其质量控制等方面,而关于种子生物学基础与萌发特性研究资料较少,

臭蒿的染色体数目尚未确定。海拔是影响植物生长发育的重要环境因子,伴随的温度、光照等条件差异可能导致植物形成不同的种子特性与萌发策略^[11]。基于此,本研究选取2个海拔下的臭蒿居群种子,测定臭蒿种子的基本植物学特征指标与赤霉素处理后种子在不同温度梯度下的萌发表现,确定臭蒿种子适宜萌发温度,同时采用常规根尖压片技术和核型分析方法,研究不同居群的染色体数目及核型,探讨居群间染色体核型特征差异。本研究可丰富臭蒿开发与利用的理论基础,为今后臭蒿野生资源保护和基因组学研究提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

于青海省曲麻莱县约改镇(YG)和格尔木市唐古拉山镇(TGL)采集臭蒿成熟种子(表1),放置在实验室(25 °C)风干15 d备用,试验于中国科学院西北高原生物研究所高原生物适应与进化重点实验室进行,凭证标本存放于中国科学院西北高原生物研究所青藏高原生物标本馆。

1.2 臭蒿种子基本植物学特征研究

1.2.1 种子大小、千粒质量测定

从纯净种子中随机取1 000粒为1组,共3组,用分析电子天平(LS120A,瑞士)称量质量,计算平均质量和标准误差。

随机选择饱满种子30颗观察种子形状、颜色等特征,并测定形状。衡量种子形状参考Thompson等^[12]的方法,用球体形状对比种子形状,臭蒿种子去冠毛后,用游标卡尺(DL91150,中国)测量种子的三维(长、宽、高)尺寸,计算三维方差(σ^2):

表 1 臭蒿种子信息
Table 1 Seed collection information of *Artemisia hedinii*

居群编号 Population code	凭证标本号 Voucher specimen number	材料名称 Material name	采集地点 Collection site	生境 Habitat	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Elevation/m
YG	QTPGB507	臭蒿 <i>A. hedinii</i>	曲麻莱县约改镇	路边碎石	34.131 18°N	95.811 27°E	4 376
TGL	YF2024566	臭蒿 <i>A. hedinii</i>	格尔木市唐古拉山镇	路边碎石	34.231 82°N	92.447 97°E	4 547

$$\sigma^2 = \left[3(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) - (x_1 + x_2 + x_3)^2 \right] / 3^2 \quad (1)$$

式中: x_1 为种子长度; x_2 为种子宽度; x_3 为种子高度。参照长度数据对长、宽和高数据进行转换, 即将长度设置为 1, 宽和高转换为长度的比值, 然后使用转换后的数据计算种子的三维方差, 最后利用种子三维总体方差来衡量种子形状。方差越小, 种子形状越接近球形; 方差越大, 种子形状越扁平或细长。

1.2.2 种子水分活度测定

选取纯净、大小匀称的臭蒿种子, 使用控温型水分活度仪 (Labmaster-awneo, 瑞士) 在 15 °C 条件下测定臭蒿种子的水分活度, 3 次重复。

1.2.3 种子吸水率测定

在 15 °C 条件下, 随机选取 1 000 粒臭蒿种子, 用分析天平称量质量后放置于 2 mL 离心管, 加纯化水反复振荡后静置, 用吸水纸擦干种子表面水分并称量。每 2 h 测定 1 次质量, 24 h 内种子可吸水饱和。吸水率 (R) 计算公式为

$$R = \left[\frac{m_t - m_0}{m_0} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_t 为种子吸水 t 时间段后的质量; m_0 为种子吸水前的起始质量。

1.2.4 种子生活力测定

在进行种子萌发试验之前, 测定种子的生活力, 参考李合生^[13]的方法加以改进, 采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法测定种子活力。从 2 个臭蒿种源中挑选饱满的种子, 每个重复 50 粒种子, 3 次重复。浸泡 24 h 后放滤纸吸干表面水分, 用刀片纵向切开, 使胚的主要构造露出来, 其中 1/2 用于试验处理, 另 1/2 作为对照, 然后浸泡在 35 °C 的 0.1% TTC 溶液中保温 6 h, 胚根染成粉红色的记为有活力。结束后统计染色与未染色种子数量, 并计算种子的生活力:

$$\text{种子生活力} = \frac{\text{胚部被染色的种子数量}}{\text{供试种子总数}} \times 100\% \quad (3)$$

1.3 臭蒿种子萌发特性研究

1.3.1 试验方法

将臭蒿种子用无菌水浸泡 12 h 后, 使用 75% 乙醇对种子表面消毒 1 min, 再用无菌水漂洗 3 次, 将其均匀放置于底部铺有 2 层滤纸的无菌培养皿 ($d=90$ mm) 中, 并向培养皿中注入 2 mL 无菌水, 置于相应培养条件下培养。每个重复 50 粒种子, 3 次重复。以胚根露出种皮 2 mm 作为种子萌发标准, 每天定时记录种子萌发情况, 连续记录 14 d。

1.3.2 培养温度对臭蒿种子萌发的影响

将臭蒿种子置于人工气候箱中 (RDN-160D, 中国), 在 24 h 光照条件下 (光照强度 5 600 lx, 相对湿度 50%), 设置 5、15、25、35 °C 4 种温度分别进行恒温培养; 在 12 h 光照 (光照强度 5 600 lx, 相对湿度 50%) 与 12 h 黑暗 (相对湿度 50%) 条件下, 设置 3 个温度梯度进行变温培养, 分别是 35 °C/5 °C、25 °C/15 °C 和 25 °C/5 °C。

1.3.3 赤霉素对臭蒿种子萌发的影响

参考张绍山等^[14]的方法将臭蒿种子分别用 100、200、800 mg·L⁻¹ 的 GA₃ 浸泡 12 h 后, 置于人工气候箱中, 设置 5、15、25、35 °C 4 种温度进行恒温培养 (光照强度 5 600 lx, 相对湿度 50%), 以无菌水恒温培养的种子作为对照组 (CK)。

1.3.4 数据处理

参考王朔楠等^[15]的方法计算种子发芽率 (germination percentage, GP)、发芽势 (germination energy, GE) 和发芽指数 (germination index, GI)。试验过程中每天记录种子发芽数量, 最终计算如下指标:

$$G_P = \frac{\sum n_i}{N} \times 100\% \quad (4)$$

$$G_E = \frac{\sum n_{\max}}{N} \times 100\% \quad (5)$$

$$G_t = \sum \frac{G_i}{D_i} \quad (6)$$

式中: G_p 为发芽率; G_E 为发芽势; G_i 为发芽指数; $\sum n_i$ 为发芽种子总数量; N 为参试种子数量; $\sum n_{max}$ 为每日新增发芽数量达到最大值的发芽种子数量; G_t 为在时间 t 的发芽数量; D_i 为相应的发芽时间。

1.4 臭蒿染色体核型分析

1.4.1 预处理

从2个臭蒿居群中选择完整饱满且无虫孔的成熟种子,分别选取50粒种子于人工气候箱中进行萌发试验;待臭蒿种子根长生长至0.5~1.0 cm时切取根尖置于装有纯化水的2.0 mL EP管中,放置冰箱中4 °C冷藏预处理24 h。

1.4.2 固定和解离

预处理好的臭蒿根尖立即放入含有卡诺氏固定液($V(95\%$ 乙醇) $:V(冰醋酸)=3:1$,现配现用)的2.0 mL EP管中,保证根尖充分浸入固定液,固定30 min后用45%乙酸解离5 min,待用。

1.4.3 制片、染色和观察

取解离完成的臭蒿根尖置于载玻片中央,切除顶端分生组织以外部分,然后滴加改良苯酚品红染液,室温染色5 min后加盖盖玻片;用镊子钝端敲击使细胞初步分散,随后迅速将载玻片掠过酒精灯外焰蒸干染液,用滤纸垂直按压盖玻片让染色体均匀分散;使用正置显微镜(Leica DM6 B,德国)观察染色体形态。

1.5 数据统计分析

采用SPSS 27.0软件对臭蒿种子各项萌发数

据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和独立样本 t 检验,并采用Duncan法分析各组间的差异性($P<0.05$),数据为3个重复的平均值 \pm 标准误差。

从臭蒿的2个参试居群中分别选择50个处于分裂中期的细胞,利用显微镜确定染色体数目和倍性,依据着丝粒位置、染色体相对长度及臂比等参数进行同源染色体配对,然后从中挑选20个分散良好、数目完整、形态清晰的染色体进行核型分析。采用MATO 4.3软件测量臭蒿每个染色体的长臂长和短臂长,依据李懋学和陈瑞阳^[16]的标准进行核型分析,并参照Stebbins^[17]的标准划分核型类型;采用Levan等^[18]的方法计算染色体相对长度(relative length, RL)、长度比(chromosome length ratio, CLR)和臂比(arm ratio, AR)等参数,根据Perruzzi和Eroglu^[19]、Kuo等^[20]的方法计算核型不对称系数(the karyotype asymmetry index, As.K%)和染色体的相对长度系数(index of relative length, IRL)并分类。其他相关参数的计算参考文献[21-22]。

2 结果与分析

2.1 基本植物学特征

臭蒿种子由种皮、胚乳和胚3部分构成,结构完整,种皮为黑褐色、质地较硬,表面具有纵条纹(图1)。臭蒿种子千粒质量较轻,种子籽粒较小,形状偏扁平,且2个种源的种子质量差异较大,千粒质量分别为0.121 2 g(YG)和0.090 1 g(TGL),唐古拉山镇种源的臭蒿种子的种子活力和含水量均大于约改镇种源(表2)。

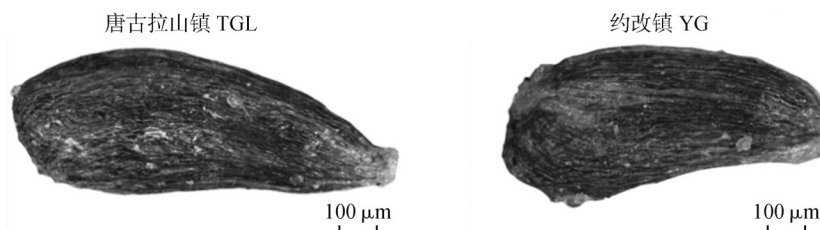


图1 臭蒿2个居群种子形态

Fig.1 Seed morphology of *A. hedinii* in two populations

表2 臭蒿种子质量及形状

Table 2 Seed mass and shape of *A. hedinii*

居群编号 Population code	千粒质量 1000-seed mass/g	三维方差 Three-dimensional variance	种子生活力 Seed viability/%	水分活度 Water activity/%
YG	0.121 2 \pm 0.003 9**	0.119 6 \pm 0.002 7**	86.00 \pm 4.00	40.12 \pm 1.22*
TGL	0.090 1 \pm 0.001 6**	0.106 7 \pm 0.002 2**	88.00 \pm 2.00	44.42 \pm 4.76*

注: * 显著性相关($P<0.05$), ** 极显著相关($P<0.01$)。

Note: * represented significant correlation ($P<0.05$); ** represented extremely significant correlation ($P<0.01$).

随着种子吸水时间的延长,2个地区臭蒿种子的吸水曲线趋势相似。吸水过程呈现3个阶段(图2),第1阶段为快速吸水期(0~4 h),吸水率从0分别上升至13.89%(TGL)和24.35%(YG),平均每h吸水速率为3.47%和6.09%;第2阶段为稳定吸水期(4~16 h),吸水率分别从13.89%和24.35%上升到41.02%和36.58%;第3阶段为吸水饱和期(16~48 h),24 h内该种子可吸水饱和,吸水率维持动态恒定。可见,臭蒿种子的吸水过程符合种子的吸水规律,在种子萌发过程中,前24 h可为种子提供充足的水分。

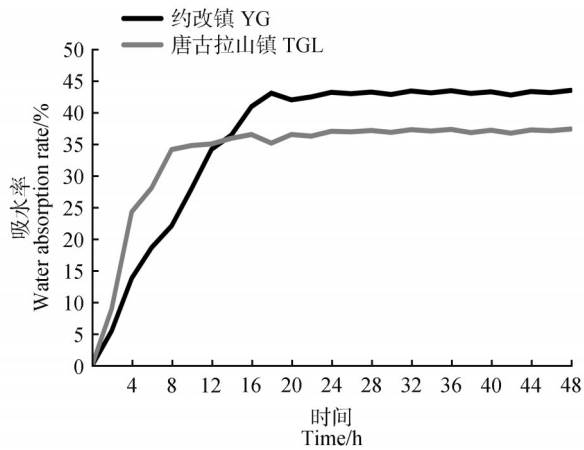


图2 臭蒿种子吸水率随吸水时间变化

Fig.2 Changes of water absorption rate of *A. hedinii* with water absorption time

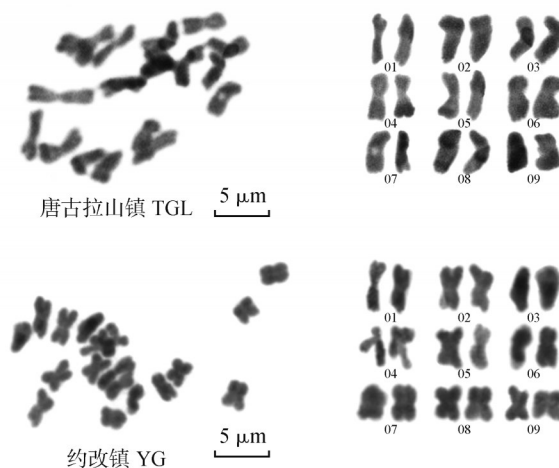
2.2 温度和激素对臭蒿种子萌发的影响

臭蒿种子在不同温度条件下的萌发情况不同,在15~25 °C条件下臭蒿种子萌发情况较好,高温和低温条件下萌发均会受到抑制(表3)。低温条件下(5 °C)臭蒿种子不能萌发,随着温度升高,发芽率、发芽势和发芽指数呈先升高后下降的趋势。当温度为25 °C时,2个居群的臭蒿种子萌发指标均最大,发芽率为89.33%(TGL)和86.67%(YG),35 °C条件下萌发指标显著低于15 °C和25 °C($P < 0.05$)。

不同质量浓度赤霉素溶液处理对臭蒿种子的萌发有明显影响(表3)。5 °C条件下不同质量浓度赤霉素处理的臭蒿种子均不萌发,15 °C条件下种子发芽率和发芽势与对照组(CK1、CK4)差异不显著($P > 0.05$),200 mg·L⁻¹ GA₃、25 °C处理为最优促发芽条件,发芽率分别达到97.33%(TGL)和93.33%(YG),与对照组(CK2、CK5)差异显著($P < 0.05$),在35 °C的高温条件下,经赤霉素处理的臭蒿种子萌发率显著高于对照组(CK4、CK6)($P < 0.05$)。由此表明,GA₃对5 °C与15 °C条件下的种子萌发促进作用不明显,但能在一定程度上缓解高温环境对臭蒿种子萌发的抑制效应。

2.3 不同居群臭蒿的染色体数目与倍性

2个居群的臭蒿染色体均为二倍体,基数为9,且染色体数目恒定,为 $2n=2x=18$,均为中部着丝粒染色体(m),未见染色体数目变异或形态异常(图3,表4)。



01. 1号染色体;02. 2号染色体;03. 3号染色体;04. 4号染色体;05. 5号染色体;06. 6号染色体;07. 7号染色体;08. 8号染色体;09. 9号染色体。
01. Chromosome 1; 02. Chromosome 2; 03. Chromosome 3; 04. Chromosome 4; 05. Chromosome 5; 06. Chromosome 6; 07. Chromosome 7; 08. Chromosome 8; 09. Chromosome 9.

图3 2个居群的臭蒿有丝分裂中期染色体

Fig.3 Metaphase chromosomes of *A. hedinii* from two populations

表3 2个居群臭蒿种子萌发特征
Table 3 Characterization of germination of *A. hedinii* seeds in two populations

居群编号 Population code	温度 Temperature/°C	处理方式 Treatment method	平均发芽率 Average germination rate/%	平均发芽势 Average germination potential/%	发芽指数 Germination index
TGL	5	—	—	—	—
	15	CK1	86.00±1.15 ^{cd}	66.67±6.36 ^c	8.54±0.38 ^f
		100 mg·L ⁻¹ GA ₃	86.67±2.67 ^{bcd}	69.33±5.81 ^{bc}	8.81±0.44 ^{ef}
		200 mg·L ⁻¹ GA ₃	91.33±1.76 ^{abc}	81.33±4.67 ^{ab}	9.76±0.23 ^{de}
	25	800 mg·L ⁻¹ GA ₃	86.67±1.76 ^{bcd}	72.00±2.31 ^{bc}	8.89±0.23 ^{ef}
		CK2	89.33±3.06 ^{bcd}	68.67±8.33 ^{bc}	9.31±0.14 ^{ef}
		100 mg·L ⁻¹ GA ₃	92.67±1.76 ^{ab}	72.00±4.16 ^{bc}	10.58±0.39 ^{cd}
	35	200 mg·L ⁻¹ GA ₃	97.33±1.33 ^a	86.67±1.76 ^a	12.91±0.10 ^a
		800 mg·L ⁻¹ GA ₃	91.33±0.67 ^{abc}	74.00±3.46 ^{abc}	11.35±0.23 ^{bc}
		CK3	71.33±1.76 ^e	48.00±5.29 ^d	6.38±0.36 ^g
	35	100 mg·L ⁻¹ GA ₃	86.00±2.00 ^{cd}	62.00±1.15 ^c	10.42±0.24 ^{cd}
		200 mg·L ⁻¹ GA ₃	89.33±1.76 ^{bcd}	70.00±5.77 ^{bc}	11.65±0.48 ^b
		800 mg·L ⁻¹ GA ₃	84.67±4.06 ^d	68.00±6.11 ^{bc}	11.29±0.56 ^{bc}
	25/5	—	89.33±0.67 ^{bcd}	67.32±2.40 ^c	8.68±0.20 ^f
	25/15	—	90.00±2.31 ^{bcd}	71.33±1.76 ^{bc}	10.58±0.78 ^{cd}
35/15	—	84.00±4.16 ^d	64.67±4.37 ^c	8.59±0.38 ^f	
YG	5	—	—	—	—
	15	CK4	85.33±2.40 ^{bc}	65.33±5.46 ^{bc}	7.35±0.33 ^g
		100 mg·L ⁻¹ GA ₃	86.67±2.40 ^{bc}	66.00±2.00 ^{bc}	9.08±0.35 ^{cd}
		200 mg·L ⁻¹ GA ₃	88.00±2.31 ^{abc}	72.00±4.00 ^{ab}	9.71±0.61 ^{cd}
	25	800 mg·L ⁻¹ GA ₃	87.33±1.33 ^{abc}	70.00±5.77 ^{abc}	9.18±0.65 ^{de}
		CK5	86.67±1.76 ^{bc}	66.67±3.53 ^{bc}	8.66±0.25 ^{de}
		100 mg·L ⁻¹ GA ₃	90.67±0.67 ^{ab}	68.67±2.40 ^{bc}	10.55±0.16 ^{bcd}
	35	200 mg·L ⁻¹ GA ₃	93.33±1.76 ^a	80.67±2.91 ^a	11.78±0.49 ^a
		800 mg·L ⁻¹ GA ₃	89.33±1.76 ^{abc}	71.33±3.71 ^{ab}	11.28±0.42 ^{ab}
		CK6	69.33±5.46 ^d	49.33±4.06 ^d	6.57±0.75 ^g
	35	100 mg·L ⁻¹ GA ₃	84.00±1.15 ^c	62.67±3.71 ^{bc}	10.73±0.17 ^{abcd}
		200 mg·L ⁻¹ GA ₃	86.67±1.76 ^{bc}	68.67±4.67 ^{bc}	11.39±0.49 ^{ab}
		800 mg·L ⁻¹ GA ₃	85.33±0.67 ^{bc}	67.33±3.71 ^{bc}	11.12±0.27 ^{abc}
	25/5	—	86.00±1.15 ^{bc}	67.33±1.76 ^{bc}	8.88±0.06 ^{de}
	25/15	—	88.67±1.76 ^{abc}	68.67±0.67 ^{bc}	9.74±0.63 ^{cde}
35/15	—	81.33±0.67 ^c	59.33±1.76 ^{cd}	8.41±0.09 ^{ef}	

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。CK1. 15 °C下唐古拉山镇种子水处理;CK2. 25 °C下唐古拉山镇种子水处理;CK3. 35 °C下唐古拉山镇种子水处理;CK4. 15 °C下约改镇种子水处理;CK5. 25 °C下约改镇种子水处理;CK6. 35 °C下约改镇种子水处理。

Note: Different lower case letters within the same column indicated significant difference among different treatments ($P<0.05$). CK1. Water treatment of seeds from Tanggula Town at 15 °C; CK2. Water treatment of seeds from Tanggula Town at 25 °C; CK3. Water treatment of seeds from Tanggula Town at 35 °C; CK4. Water treatment of seeds from Yuegai Town at 15 °C; CK5. Water treatment of seeds from Yuegai Town at 25 °C; CK6. Water treatment of seeds from Yuegai Town at 35 °C.

表 4 2 个居群臭蒿染色体参数
Table 4 Chromosomal parameters of *A. hedinii* from two populations

居群编号 Population code	染色体序号 Code of chromosome	长度 Length/ μm	标准偏差 Standard deviation/ μm	臂比 Arm ratio	类型 Type	相对长度 Relative length	相对长度系数 Relative length coefficient	长度分类 Length classification
YG	1	2.21+2.05=4.26	0.35	1.09	m	14.49	1.30	L
	2	2.01+1.84=3.85	0.32	1.10	m	13.08	1.17	M2
	3	1.86+1.74=3.60	0.31	1.07	m	12.18	1.10	M2
	4	1.77+1.64=3.41	0.29	1.08	m	11.49	1.04	M2
	5	1.70+1.55=3.25	0.28	1.09	m	10.97	0.99	M1
	6	1.61+1.49=3.10	0.26	1.08	m	10.49	0.95	M1
	7	1.52+1.39=2.91	0.24	1.10	m	9.86	0.89	M1
	8	1.40+1.32=2.72	0.23	1.07	m	9.22	0.83	M1
	9	1.29+1.12=2.41	0.20	1.14	m	8.22	0.74	S
TGL	1	2.49+2.15=4.18	0.35	1.16	m	14.35	1.29	L
	2	2.26+2.04=3.81	0.34	1.11	m	13.21	1.19	M2
	3	2.15+1.89=3.53	0.30	1.15	m	12.50	1.13	M2
	4	1.99+1.78=3.32	0.28	1.13	m	11.68	1.05	M2
	5	1.89+1.65=3.14	0.27	1.16	m	10.99	0.99	M1
	6	1.79+1.58=2.95	0.25	1.12	m	10.45	0.94	M1
	7	1.69+1.47=2.85	0.23	1.16	m	9.83	0.88	M1
	8	1.54+1.36=2.62	0.22	1.13	m	8.94	0.80	M1
	9	1.38+1.20=2.40	0.19	1.17	m	8.05	0.72	S

注:长臂+短臂=全长;m.中部着丝粒染色体;L.长染色体;M2.中长染色体;M1.中短染色体;S.短染色体。

Note: Long arm+Short arm=Total length; m. Central mitotic chromosome; L. Long chromosome; M2. Medium-length chromosome; M1. Short-middle chromosome; S. Short chromosome.

2.4 染色体形态特征与差异

依据染色体相对长度系数,臭蒿染色体可划分为长染色体(L型, >1.25)、中长染色体(M2型, (1.00~1.25])、中短染色体(M1型, (0.75~1.00])和短

染色体(S型, ≤ 0.75)4种类型(表4)。臭蒿染色体核型类型为1A,较为对称,均不存在臂比大于2的染色体。同时,唐古拉山镇居群的长度比、平均臂比和核不对称系数均大于约改镇居群(图4、表5)。

表 5 2 个居群的臭蒿染色体核型比较
Table 5 Chromosomes karyotype comparison of *A. hedinii* from two populations

居群编号 Population code	核型公式 Karyotype formula	长度比 Length ratio	臂比>2的染色体比例 Chromosomes proportion of arm ratio excess to 2%	核型类型 Karyotype type	平均臂比 Average arm ratio	平均着丝粒 不对称系数 MCA	核型不 对称系数 As.K/%	核型不 称程度 A	核型对 称指数 Syi	着丝粒指数 变异系数 CVCI	染色体长度 变异系数 CVCL
YG	2n=2x=18m	1.83	0	1A	1.09	4.33	52.15	0.04	91.79	2.64	18.10
TGL	2n=2x=18m	1.91	0	1A	1.14	6.65	53.31	0.07	87.64	3.84	18.89

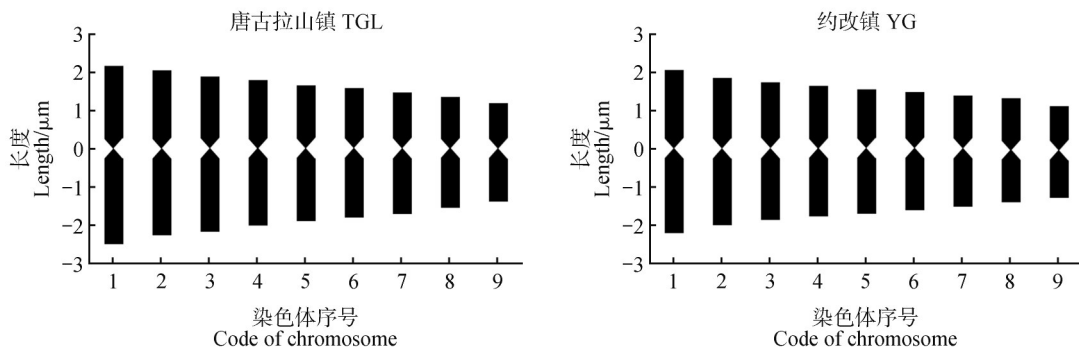


图4 2个居群臭蒿染色体核型模式

Fig.4 Chromosomes karyotype pattern diagrams of *A. hedinii* from two populations

3 讨论

3.1 臭蒿种子植物学特征对种子萌发的影响

植物种子生理和表型性状是物种遗传多样性的重要基础,与种子萌发关系密切^[23-24]。因此,探究种子生物学特征与萌发关系能够更好地理解植物整个生长发育过程。本研究中,臭蒿种子采自海拔4 000 m以上的高海拔地区,2个种源的种子生活力均超过80%,种子扁平细长,千粒质量较小。其中,唐古拉山镇种源种子生活力高于约改镇种源,具有更好的萌发潜力,这与后续开展的种子萌发试验结果一致。蒿属^[25]植物通常采用“产生大量小粒种子、借风力扩散”的传播策略,以争夺和占据更多生存空间。本研究中,唐古拉山镇种源的臭蒿种子比约改镇的三维平均方差和体积更小,这一形态特征与青藏高原高寒草甸植物的生存策略相符,即体积较小、形状扁平的种子通常具有更高发芽率^[26]。这种形态可能使唐古拉山镇种源的臭蒿种子在高原强风环境中更易传播,同时扁平结构能降低土壤覆盖阻力,便于种子接触湿润土层,进而提升发芽率。同时,高活力的种子使该物种即便在恶劣条件下仍有一部分个体能够成功萌发,以保证物种延续;而当环境条件较为适宜时,又能凭借这一特性迅速占据生态位,进而实现物种的快速扩散。

种子的水分活度和吸水率与种子萌发密切相关:一方面,高水活度能够保证种子顺利萌发,能够为萌发过程中的生理生化反应提供基础;另一方面,若种子存在吸水障碍、无法正常吸收水分,则会抑制萌发^[27-28]。吸水试验结果显示,2个种源的臭蒿种子均能在24 h内达到吸水饱和状态,表明该物种种子无吸水阻碍,这种特性有助于种子

在高海拔地区湿润土壤中快速获取足够水分,保障萌发顺利进行。其中,唐古拉山镇种源的种子水分活度高于约改镇,能够更高效地完成吸水过程,进而提升萌发效率。

3.2 温度和激素对臭蒿种子萌发的影响

温度是种子萌发的关键因素之一,温度过低会降低酶的活性,抑制呼吸作用和物质转化,最终导致发芽缓慢;温度过高会加快种子内水分蒸发速度,导致种子失水,所含蛋白质在高温下变性,造成高温胁迫^[29-30]。试验结果显示,25 °C为臭蒿种子萌发的最适温度,不同温度梯度条件下种子的萌发能力呈先上升后下降的规律,这与白沙蒿^[31](*A. stelleriana*)和山蒿^[32](*A. brachyloba*)种子的萌发特性研究结果基本一致。此外,与大多数高寒草甸植物种子一样,臭蒿对变温环境响应积极^[33],这可能是为了适应昼夜温差大、气候条件复杂的高原环境而形成的生存策略^[34]。

种子萌发过程受到内源和外源信号的调节,赤霉素作为主要的内源性植物激素,适量浓度处理后有助于加速植物种子细胞分裂,促进成熟细胞生长^[35-36]。在25 °C条件下,经200 mg·L⁻¹赤霉素处理后种子萌发能力达到峰值,这与中等浓度赤霉素促进冷蒿(*A. frigida*)^[37]种子萌发的结果一致。此外,在35 °C高温条件下经过赤霉素处理后的种子萌发率显著高于对照组(CK4、CK6),赤霉素可能通过调节种子内部的生理代谢过程,在一定程度上缓解高温环境对臭蒿种子萌发的抑制效应。

3.3 臭蒿染色体核型特征

染色体作为生物细胞核中的重要组成成分,其数目、形态、结构和核型通常具有较高稳定性,可作为物种分类及系统演化关系研究的重要细胞学依据^[38-39]。本研究发现,2个臭蒿居群的染色体

数目为18条,基数为9($2n=2x=18$),所有染色体均为中部着丝粒染色体(m),具有较高的遗传稳定性;染色体长度为2.40~4.26 μm ,核型属于1A型,隶属小型染色体,这与乌云格日勒^[40]对同属植物白沙蒿和黑沙蒿(*A. ordosica*)的染色体核型分析研究结果一致。

染色体形态作为核型分析的重要指标,可用于探讨不同居群间核型特征与差异^[41]。植物的核型进化通常呈现向不对称型演变的趋势^[42],进化程度越高,核型不对称性系数越大,对环境适应性越强^[43],且受环境和海拔的影响^[44],其中,着丝粒位置和染色体长度差异决定了植物染色体的核不对称性^[17]。本研究发现,唐古拉山镇居群染色体的长度比和平均臂比均大于约改镇居群,核型更不对称。从地理上看,唐古拉山镇居群分布海拔更高,受低温和高温胁迫更强烈,同时面临生长季短和昼夜温差大等环境,使其表达出更多的适应性基因,以提升遗传多样性,进而增强对复杂环境的适应能力,导致臂比和核不对称系数较高。约改镇居群地处海拔较低,面临的非生物胁迫相对较小,更倾向于保留对称核型以维持种群的遗传一致性。由此表明,环境可能对臭蒿染色体的进化方向具有重要影响,不同生境会驱动染色体核型朝向特定的方向演化。

4 结 论

臭蒿种子扁平细长,千粒质量较小,吸水24 h可达到饱和。2个居群的臭蒿种子适宜萌发温度为恒温25 $^{\circ}\text{C}$ 与变温25 $^{\circ}\text{C}/15$ $^{\circ}\text{C}$,高温(35 $^{\circ}\text{C}$)和低温(5 $^{\circ}\text{C}$)均不利于种子萌发,赤霉素能在一定程度上缓解高温环境对臭蒿种子萌发的抑制效应。臭蒿为二倍体植物,具有18条染色体,核型类型为1A,染色体较为稳定对称,唐古拉山镇居群的染色体长度比和平均臂比均大于约改镇居群,核型更不对称。异质环境可能对臭蒿染色体的进化方向具有重要影响,驱动染色体核型朝向特定的方向演化。

参 考 文 献

- [1] 李拓径,王雨华. 青藏高原植物种质资源数据库及应用平台建设[J]. 植物分类与资源学报, 2013, 35(3): 234-240.
LI T J, WANG Y H. The plant germplasm database and platform of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Plant Diversity and Resources, 2013, 35(3): 234-240.
- [2] YANG X J, HUANG Z Y, VENABLE D L, et al. Linking performance trait stability with species distribution: the case of *Artemisia* and its close relatives in northern China [J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 27(1): 123-132.
- [3] 李雪华,刘志民,蒋德明,等. 七种蒿属植物种子重量形状及萌发特性的比较研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 57-60.
LI X H, LIU Z M, JIANG D M, et al. A comparative study on seed weight, shape and germination characteristics of 7 *Artemisia* species [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 57-60.
- [4] 乔有明,富象乾,阎贵兴,等. 20种蒿属植物的染色体核型研究[J]. 中国草地, 1990(6): 24-31.
QIAO Y M, FU X Q, YAN G X, et al. A study on chromosomes of 20 species in genus *Artemisia* [J]. Grassland of China, 1990(6): 24-31.
- [5] ZARIFI E, AGHYEV Y M, GHANAVATI F, et al. Cytogenetics and evolution of karyotype in wormwood, *Artemisia vulgaris* L. [J]. Seed and Plant, 2006, 22(1): 1-12.
- [6] 中国科学院西北高原生物研究所. 藏药志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2019: 344-345.
Northwest Institute of Plateau Biology. Pharmacopoeia of Tibetan medicine [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2019: 344-345.
- [7] 余静雅,夏铭泽,徐浩,等. 青藏高原地区3种蒿属植物转录组比较分析[J]. 植物研究, 2022, 42(2): 200-210.
YU J Y, XIA M Z, XU H, et al. Comparative transcriptome analysis of three *Artemisia* species in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Botanical Research, 2022, 42(2): 200-210.
- [8] 帝玛尔·丹增彭措. 晶珠本草[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 128-129.
TEMARTH T P. Crystal materia medica [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1986: 128-129.
- [9] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草: 第7卷[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999: 679-680.
Editorial Board of "Chinese Materia Medica", State Administration of Traditional Chinese Medicine. Chinese Materia Medica: Vol. 7 [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1999: 679-680.
- [10] 刘尚武. 青海植物志: 第3卷[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1996: 385-388.
LIU S W. Flora of Qinghai: Vol. 3 [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 1996: 385-388.
- [11] 许静,李文龙,吴鑫悦,等. 青藏高原高寒草甸种子萌发行为沿海拔梯度的分异特征[J]. 草地学报, 2021, 29(增刊1): 10-18.

- XU J, LI W L, WU X Y, *et al.* Differentiation of seed germination behavior in alpine meadow on the Tibetan Plateau along the elevation gradient[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(Sup.1): 10-18.
- [12] THOMPSON K, BAND S R, HODGSON J G. Seed size and shape predict persistence in soil[J]. *Functional Ecology*, 1993, 7(2): 236-241.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 260-265.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 260-265.
- [14] 张绍山, 刘璇, 王景富, 等. 多因素处理对云南重楼及其多芽品系种子萌发的影响[J]. *中草药*, 2017, 48(10): 2111-2115.
- ZHANG S S, LIU X, WANG J F, *et al.* Effect of multiple factors on seeds germination of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* and polygerm varieties[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2017, 48(10): 2111-2115.
- [15] 王朔楠, 孙静, 郭嘉莹, 等. 种子发芽指标及其测算方法[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(2): 190-196.
- WANG S N, SUN J, GUO J Y, *et al.* Overview of seed germination indices and their determination methods[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(2): 190-196.
- [16] 李懋学, 陈瑞阳. 关于植物核型分析的标准化问题[J]. *植物科学学报*, 1985, 3(4): 297-302.
- LI M X, CHEN R Y. A suggestion on the standardization of karyotype analysis in plants[J]. *Plant Science Journal*, 1985, 3(4): 297-302.
- [17] STEBBINS G L. Chromosomal evolution in higher plants[M]. London: Edward Arnold Ltd., 1971: 87-93.
- [18] LEVAN A, FREDGA K, SANDBERG A A. Nomenclature for centromeric position on chromosomes[J]. *Hereditas*, 1964, 51(2): 201-202.
- [19] PERUZZI L, EROČLU H E. Karyotype asymmetry: again, how to measure and what to measure?[J]. *Comparative Cytogenetics*, 2013, 7(1): 1-9.
- [20] KUO S R, WANG T T, HUANG T C. Karyotype analysis of some Formosan gymnosperms[J]. *Taiwania*, 1972, 17(1): 66-80.
- [21] GREILHUBER J, SPETA F. C-banded karyotypes in the *Scilla hohenackeri* group, *S. persica*, and *Puschkinia* (Liliaceae)[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 1976, 126(2): 149-188.
- [22] PASZKO B. A critical review and a new proposal of karyotype asymmetry indices[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2006, 258(1): 39-48.
- [23] HARPER J L, WILLIAMS J T, SAGAR G R. The behaviour of seeds in soil: I. The heterogeneity of soil surfaces and its role in determining the establishment of plants from seed[J]. *Journal of Ecology*, 1965, 53(2): 273-286.
- [24] 李文良, 张小平, 郝朝运, 等. 珍稀植物连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)的种子萌发特性[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5445-5453.
- LI W L, ZHANG X P, HAO C Y, *et al.* Characteristics of seed germination of the rare plant *Cercidiphyllum japonicum* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5445-5453.
- [25] 马君玲, 吴世杰, 张晓妮, 等. 铁路沿线4种蒿属植物植冠储藏种子的重量形状及萌发特性[J]. *农学学报*, 2019, 9(6): 28-33.
- MA J L, WU S J, ZHANG X N, *et al.* Canopy-stored seeds of 4 *Artemisia* species along the railway: weight, shape and germination characteristics[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(6): 28-33.
- [26] 王学经, 卜海燕, 周显辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸常见植物种子形状对萌发的影响[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(3): 391-396.
- WANG X J, BU H Y, ZHOU X H, *et al.* Effect of seed shape on germination in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(3): 391-396.
- [27] 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.
- [28] 刘佳哲, 余小红, 陈乃健, 等. 濒危植物藤柄木果实特征和种子萌发特性[J]. *种子*, 2024, 43(3): 90-95.
- LIU J Z, YU X H, CHEN N J, *et al.* Fruit characters and seed germination characteristics of endangered plant *Bhesa robusta* [J]. *Seed*, 2024, 43(3): 90-95.
- [29] 吴晓艳. 浅谈发芽试验在种子室内检验中存在的问题及对策[J]. *特种经济动植物*, 2024, 27(7): 142-144.
- WU X Y. Discussion on problems and countermeasures of germination test in indoor seed inspection[J]. *Special Economic Animal and Plants*, 2024, 27(7): 142-144.
- [30] MURDOCH A J. Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination [J]. *Crop Science*, 2000, 40(2): 564-565.
- [31] 黄振英, GUTTERMAN Y, 胡正海, 等. 白沙蒿种子萌发特性的研究 II. 环境因素的影响[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 240-246.
- HUANG Z Y, GUTTERMAN Y, HU Z H, *et al.* Seed germination in *Artemisia sphaerocephala* II. the influence of environmental factors[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*

- gy, 2001, 25(2): 240-246.
- [32] 魏建兵, 孙晓倩, 侯永侠, 等. 山蒿生物学特征及其生态保护应用价值潜力初探[J]. 环境生态学, 2019, 1(3): 10-14.
WEI J B, SUN X Q, HOU Y X, *et al.* Preliminary study on biological features of *Artemisia brachyloba* Franch. and its application potential in ecological conservation[J]. Environmental Ecology, 2019, 1(3): 10-14.
- [33] 卢晓宁, 海志霞, 张雁明, 等. 典型草原和高寒草甸种子萌发性状差异及其对群落物种共存的影响[J]. 科学通报, 2025, 70(11): 1537-1550.
LU X N, HAI Z X, ZHANG Y M, *et al.* Differences in seed germination traits between typical steppe and alpine meadow and their effects on species coexistence in community[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(11): 1537-1550.
- [34] 许静, 杜国祯, 李文龙, 等. 温度和海拔对高寒草甸植物种子萌发进化特性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(3): 377-383.
XU J, DU G Z, LI W L, *et al.* Effects of temperature and altitude on the evolutionary characteristics of seed germination in an alpine meadow[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(3): 377-383.
- [35] 刘玥辰, 金昆, 薛焱. 外源激素对盐碱胁迫下蒙药材阿给(冷蒿)种子萌发的影响[J]. 种子, 2024, 43(2): 60-65.
LIU Y C, JIN K, XUE Y. Effects of exogenous hormones on seed germination of Inner Mongolia medicine Agi (*Artemisia frigida* Willd.) under saline-alkali stress [J]. Seed, 2024, 43(2): 60-65.
- [36] 罗建民, 刘欢, 王敬龙, 等. 打破野生藏沙蒿种子休眠方法的筛选与评价[J]. 草地学报, 2022, 30(6): 1603-1612.
LUO J M, LIU H, WANG J L, *et al.* Screening and evaluation of methods for breaking seed dormancy of wild *Artemisia wellbyi* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(6): 1603-1612.
- [37] 李林娜, 李敏, 吴双英, 等. 不同处理条件对野生蒙药材小白蒿种子萌发的影响[J]. 特种经济动植物, 2024, 27(5): 18-20.
LI L N, LI M, WU S Y, *et al.* Effects of different treatments on seed germination of wild Mongolian medicinal material *Artemisia frigida* [J]. Special Economic Animal and Plants, 2024, 27(5): 18-20.
- [38] 王亚男, 刘玉萍, 刘雪利, 等. 沙鞭不同居群染色体数目及核型分析[J]. 西北植物学报, 2021, 41(9): 1489-1499.
WANG Y N, LIU Y P, LIU X L, *et al.* Chromosome number and karyotype analysis from different populations of *Psammochloa villosa* (Poaceae) [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(9): 1489-1499.
- [39] 雷海英, 侯沁文, 白凤麟, 等. 八种不同产地苦参的染色体数目及核型分析[J]. 植物生理学报, 2019, 55(7): 967-974.
LEI H Y, HOU Q W, BAI F L, *et al.* Chromosome number and karyotype analysis of *Sophora flavescens* Ait. from eight different habitats [J]. Plant Physiology Journal, 2019, 55(7): 967-974.
- [40] 乌云格日勒. 白沙蒿和油蒿的染色体核型分析研究[J]. 内蒙古草业, 2010, 22(2): 33-36.
WUYUN G. Karyotype analysis of *Artemisia sphaerocephala* and *Artemisia ordosica* [J]. Inner Mongolia Prataculture, 2010, 22(2): 33-36.
- [41] 曲荣举, 刘玉萍, 陈金元, 等. 苦马豆(*Sphaerophysa salsula*) 6个不同居群的染色体核型分析[J]. 草地学报, 2024, 32(8): 2469-2477.
QU R J, LIU Y P, CHEN J Y, *et al.* Chromosome karyotype analysis from six different populations of *Sphaerophysa salsula* (Fabaceae) [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(8): 2469-2477.
- [42] 宁伟, 吴杰, 赵婷, 等. 东北地区7种蒲公英核型研究[J]. 中国中药杂志, 2012, 37(6): 771-776.
NING W, WU J, ZHAO T, *et al.* Karyomorphology research in seven kinds of dandelion in Northeast [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2012, 37(6): 771-776.
- [43] 靳佳瑞, 刘玉萍, 苏旭, 等. 青藏高原特有种—黄缨菊不同居群的染色体核型研究[J]. 草地学报, 2025, 33(1): 53-61.
JIN J R, LIU Y P, SU X, *et al.* Chromosome karyotype studies on different populations of *Xanthopappus subcaulis* (Asteraceae), an endemic species from the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 53-61.
- [44] DU Y P, BI Y, ZHANG M F, *et al.* Genome size diversity in *Lilium* (Liliaceae) is correlated with karyotype and environmental traits [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1303.