

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.018

引用格式:赵红梅,张雪梅,何杰丽,等.不同沙埋厚度下入侵植物刺苍耳种子萌发和幼苗生长[J].草地学报,2026,34(1):182—190

ZHAO Hong-mei, ZHANG Xue-mei, HE Jie-li, et al. Seed Germination and Seedling Growth of the Invasive Plant *Xanthium spinosum* under Different Sand Burial Depths[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):182—190

不同沙埋厚度下入侵植物刺苍耳种子萌发 和幼苗生长

赵红梅^{1,2,3}, 张雪梅^{1,2,3}, 何杰丽^{1,2,3}, 尚天翠^{1,2,3*}, 岳尚武^{1,2,3}, 杨允菲^{1,4}

(1. 伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学微生物资源保护与开发利用重点实验室, 新疆 伊宁 835000; 3. 新疆薰衣草资源保护与利用重点实验室, 新疆 伊宁 835000; 4. 东北师范大学植被生态学教育部重点实验室, 吉林 长春 130024)

摘要:刺苍耳(*Xanthium spinosum*)作为一种快速繁殖、广泛扩散的恶性入侵植物,严重影响了农作物的生产,导致农作物减产,品质下降,牧场退化。本研究通过设置1 cm, 2 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm和9 cm共6个沙埋深度处理,分析了刺苍耳种子萌发、幼苗生长和异速生长关系,旨在探究刺苍耳的生态防控及作物播种策略。结果显示:在7 cm和9 cm埋深处理下的发芽指数和出苗率显著低于其他处理组,株高,株重,刺数量和刺长均显著低于1 cm和2 cm埋深处理。7 cm和9 cm埋深处理的根冠比显著高于其他处理组。茎干重的异速生长指数在3 cm埋深下显著低于5 cm, 7 cm和9 cm处理组。综上所述,过深沙埋抑制了刺苍耳种子萌发和幼苗生长,建议在作物播种前进行深耕作为其防控措施,本研究为刺苍耳的科学防控和作物播种奠定了理论基础。

关键词:沙埋厚度;生物入侵;异速生长;生物量;刺苍耳

中图分类号:S451.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0182-09

Seed Germination and Seedling Growth of the Invasive Plant *Xanthium spinosum* under Different Sand Burial Depths

ZHAO Hong-mei^{1,2,3}, ZHANG Xue-mei^{1,2,3}, HE Jie-li^{1,2,3}, SHANG Tian-cui^{1,2,3*}, YUE Shang-wu^{1,2,3},
YANG Yun-fei^{1,4}

(1. College of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China; 2. Key Laboratory of Microbial Resources Protection, Development and Utilization, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Lavender Conservation and Utilization Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China; 4. Key Laboratory of Vegetation Ecology, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun, Jilin Province 130024, China)

Abstract: *Xanthium spinosum*, a highly invasive plant known for its rapid reproduction and widespread dispersal, significantly impacts the production of food and forage crops. It leads to reduced crop yields, diminished quality, and pasture degradation, making its control crucial for agricultural production. In this study, we investigated the effects of six sand burial depths (1 cm, 2 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm, and 9 cm) on seed germination, seedling growth, and allometric relationships of *X. spinosum*. The aim was to explore the ecological control of *X. spinosum* and the crop sowing strategies. The results were as follows: The germination index and emergence rate in the 7 cm and 9 cm burial depth treatments were significantly lower than those in other treatment groups. The plant height, plant weight, number of thorns, and thorn length were all significantly lower than

收稿日期:2025-01-20;修回日期:2025-04-09

基金项目:国家自然科学基金(31660144);伊犁师范大学微生物资源保护与开发利用重点实验室开放课题重点项目(YLUKLM202003)资助

作者简介:赵红梅(1999-),女,汉族,青海海东人,硕士研究生,主要从事植物生态学研究,E-mail:zhmqrx@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:shang2000_1@163.com

those in the treatments with burial depths of 1 cm and 2 cm. ($P<0.05$). The root-to-shoot ratio in the 7 cm and 9 cm burial depth treatments was significantly higher than that in other treatment groups ($P<0.05$). The allometric exponent of stem dry weight in the 3 cm burial depth was significantly lower than those in the 5 cm, 7 cm, and 9 cm treatment groups ($P<0.05$). Overall, deeper sand burial inhibited the seed germination and seedling growth of *X. spinosum*. Therefore, this study laid a theoretical foundation for the scientific prevention and control of *X. spinosum* and crop sowing. It is advisable to conduct deep plowing before crop sowing.

Key words: Sand burial depth; Biological invasion; Allometric growth; Biomass; *Xanthium spinosum*

随着全球经济一体化进程的加速以及旅游业的蓬勃发展,外来物种的传播呈现出更加频繁且广泛的特征。外来植物入侵往往会带来生物多样性降低、生态环境破坏以及经济损失等问题^[1-2]。入侵植物防控对于维护全球自然和人工生态系统平衡起着至关重要的作用。刺苍耳(*Xanthium spinosum*)是新疆地区危害性较大的一种恶性入侵杂草,该物种通过竞争资源、抢占生态位实现大范围扩散,降低了当地生态系统的稳定性,并对农业和畜牧业构成严重威胁^[3-4]。开展刺苍耳的扩散过程和防控措施研究,对于遏制其扩散、保护新疆生态系统健康具有重要意义。

研究表明,入侵植物在本地通常会经历一个较长的滞后期后才开始爆发性传播,因此,及早发现和治理入侵植物对于防止入侵植物大面积扩散具有关键意义^[5-6]。种子萌发和幼苗生长是入侵植物生命周期中的早期环节,对于入侵植物种群的壮大、分布范围的扩展和环境适应能力的提高具有重要作用^[7],也是生产上防治的关键时期。埋藏深度是影响植物种子萌发特征的重要因素^[8-9]。合适的埋藏深度可以为种子提供保护、固定作用以及适宜的土壤湿度和矿质营养等环境条件,有利于种子的萌发和幼苗的生长^[10-11]。然而,过深的埋藏深度由于土壤透气性差、光照不足以及土壤温度过低等不利因素,会抑制种子的萌发^[4,12]。以往关于埋深对经济作物发芽和幼苗生长的影响已被广泛研究,对于不同植物种类,种子在不同埋深下的发芽率呈现出不同的趋势^[13-15]。其中,种子大小是影响埋深对种子萌发能力效应的一个因素。研究表明,种子大小与幼苗发芽率无关,但这两个变量均与埋深呈负相关,大种子的幼苗会比小种子的幼苗产生更长的根系,这可能有助于幼苗的生长^[16]。作为高产种子的入侵植物,刺苍耳的种子萌发受埋深的影响程度目前并不清楚。

生物量与异速生长关系密切相关,生物量是生物体能量积累的具体表现,反映了生物体综合生物学特征和功能性状的集合^[17]。异速生长则描述了生

物体不同器官之间的生长比例关系,体现了生物体在适应环境过程中所采取的权衡策略。植物通过调整生物量分配和异速生长策略来应对不同的生存压力,尤其是在资源受限的条件下,通过优化资源分配实现生物量分配策略的调整^[18-19]。繁殖分配对植物的入侵能力具有重要作用,而光合作用产物的地上与地下资源分配以及不同功能群植物的表型可塑性,也是生物量与异速生长关系研究中的关键内容,这些特性对于揭示植物生态学和生物学特征具有重要意义^[20]。本研究以不同沙埋深度条件下盆栽的刺苍耳为研究对象,通过测定刺苍耳植株及其各器官的生物量,比较植株不同部位器官的生物量分配和比例的变化差异。采用标准化主轴回归分析(Standardized major axis regression analysis, SMA)建立植株与各组成部分之间的异速生长模型,并分析沙埋深度对其异速生长关系的影响^[21]。

刺苍耳是一种原产于南美洲的一年生菊科植物,生长于沙质地带,如河岸和沿海沙丘。其叶子不规则裂片,交替分布于茎上,果实为蒴果,表面覆盖小钩,易于附着在各种表面上进行传播^[22]。该物种已在全球多个地区广泛分布,包括欧洲、亚洲和北美洲。在中国,刺苍耳最早于河南郸城县被发现,随后逐渐扩散至辽宁、内蒙古、安徽、宁夏、甘肃、新疆等多个省区^[23]。刺苍耳具有适应性强、入侵范围广的特点。一旦适应新环境并开始入侵,它会迅速与当地原生物种争夺生存资源,并很快成为优势物种,对当地植物多样性产生负面影响。此外,刺苍耳作为一年生草本植物,其繁殖和种子传播能力极强^[22]。进入新环境后,其种群能够迅速扩张,与原有植物竞争有限的水分、养料、光照和生长空间等资源。研究表明,刺苍耳叶子中含有具植物毒性的生物活性化合物,显示出作为天然除草剂的潜力,且对特定植物具有显著的选择性除草活性^[24]。种子萌发研究对于理解外来入侵植物的生物学特性及制定防控措施具有重要意义。然而,目前关于刺苍耳种子萌发及幼苗生长方面的研究相对较少。在防控研究中,生物防治和化学防治受到

较多关注,而物理防治的研究相对不足^[5]。因此,本研究通过人工控制埋藏深度,测定刺苍耳种子的出苗率及幼苗生长的动态过程,以揭示埋深对刺苍耳种子萌发和幼苗生长的影响,为新疆地区外来恶性入侵物种的科学防控提供理论和实践支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为成熟褐色的刺苍耳种子,2022年10月中旬采集于中国新疆霍城县图开沙漠(44.05°N, 80.88°E),采集后的果实随即被带回实验室进行后续处理和试验。

1.2 试验方法

首先,准备细河沙和自来水,将两者充分混合,调节至适宜的湿度。具体标准为用手抓握河沙能够形成沙团,松开后沙团能够自然散开,以此确保培养结构最佳。精选大小均匀、成熟度适中的刺苍耳果实,去除钩刺,用1%次氯酸钠溶液消毒10 min,用蒸馏水冲洗5次,并用蒸馏水浸泡48小时以促进种子活化^[4]。将已经浸种的刺苍耳种子均匀播种于花盆中,每盆播种20粒。播种后,用湿沙土覆盖种子,并用保鲜膜封住花盆口,以防止水分蒸发。将花盆置于光照培养箱内进行出苗和培养,培养箱温度设置为白天28℃,夜晚15℃,并使用全光谱植物灯提供光照,每天光照时间为14 h。

试验设计包括6个处理梯度,每个处理梯度分别在花盆中设置底沙厚度为9,8,7,5,3,1 cm,并在底沙上再覆盖1,2,3,5,7,9 cm厚的细河沙。每个处理梯度包含20个花盆,共计120个花盆。每个花盆均进行明确标记。待刺苍耳种子发芽并出土后,每盆保留3~4棵幼苗,并进行标记。每隔4 d进行一次浇水,共浇水10次。自幼苗出土后,试验持续约40 d,随后收获刺苍耳植株30株,用直尺测量主根长、株高和刺长,并统计棘刺数和叶片数;称量根部、茎部、叶片、棘刺和生殖构件的鲜重,进行生物量鲜重比分析;将刺苍耳各部分构件(根部、茎部、叶片、棘刺和生殖构件)于105℃杀青15 min,再65℃烘至恒重,依次称量干重并进行异速生长分析。

1.3 试验数据处理

种子出苗率=(出苗种子粒数/供试种子粒

数)×100%

发芽指数(GI): $GI=\sum(G_t/D_t)$ (G_t 和 D_t 分别为时间 t 天内出苗种子数和出苗试验持续的总天数)

根冠比=地下鲜重/地上鲜重×100%;根鲜重比=根鲜重/全株鲜重×100%;茎鲜重比=茎鲜重/全株鲜重×100%;叶鲜重比=叶鲜重/全株鲜重×100%;刺鲜重比=刺鲜重/全株鲜重×100%;生殖构件鲜重比=果鲜重/全株鲜重×100%。

本研究采用Excel 2013进行数据初步统计,运用SPSS 21.0进行统计分析,设定显著性水平为 $P<0.05$ 。分析结果表明, P 值小于0.05时,差异显著;最后使用Origin 8.5进行数据可视化,绘制相关图表,以便更直观地展示研究结果。本研究采用幂函数形式的异速生长方程进行分析,方程表示为: $Y=\beta X^{[25]}$ 。通过线性转化,方程可改写为: $\lg Y=\lg \beta+\alpha \times \lg X^{[26]}$ 。

在上述方程中, X 和 Y 分别代表植物的两个相关性状,其中 Y 表示植株各器官, X 表示植株干重生生物量; β 为性状关系的截距, α 为相关性斜率,即异速生长指数。当 $\alpha=1$ 时,表示各性状之间存在等速生长关系;当 $\alpha \neq 1$ 时,表示存在异速生长关系^[25]。采用SMA^[21]对刺苍耳不同埋深程度下的生长指标与植株的异速生长方程参数进行估计,并使用SMATR 2.0进行计算。通过比较不同处理组间斜率之间的差异以及斜率与1.0之间的差异来判定生长模式。若斜率之间无显著差异,则表示各处理组间存在等速生长关系;若斜率之间存在显著差异,则表示存在异速生长关系。通过 P 值评价各方程的显著水平, $P<0.05$ 说明拟合结果显著。

2 结果与分析

2.1 种子出苗的比较

在不同埋深处理下,刺苍耳幼苗的出苗率和发芽指数如图1所示。当埋藏深度为1 cm时,刺苍耳种子的出苗率达到最高值,为72%;在埋藏深度为2,3,5 cm时,出苗率与1 cm处理组相比均无显著差异,表明在此范围内,埋藏深度对刺苍耳种子的出苗率影响不大。然而,当埋藏深度超过5 cm,特别是达到7 cm及更深时,出苗率显著降低,7 cm埋深下出苗率为44.5%($P<0.05$),而埋藏深度为9 cm时,刺苍耳种子出苗率降至12.25%,与1 cm处理组相比差异显著($P<0.05$),这说明埋藏过深会显著

抑制刺苍耳种子的出苗。发芽指数的变化趋势与出苗率相似(图 1)。随着播种深度的增加,刺苍耳幼苗的发芽指数逐渐下降。与 1 cm 处理组相比,其

余处理组的发芽指数均显著降低($P<0.05$)。这进一步表明,较深的播种深度对刺苍耳的发芽指数有显著的抑制作用。

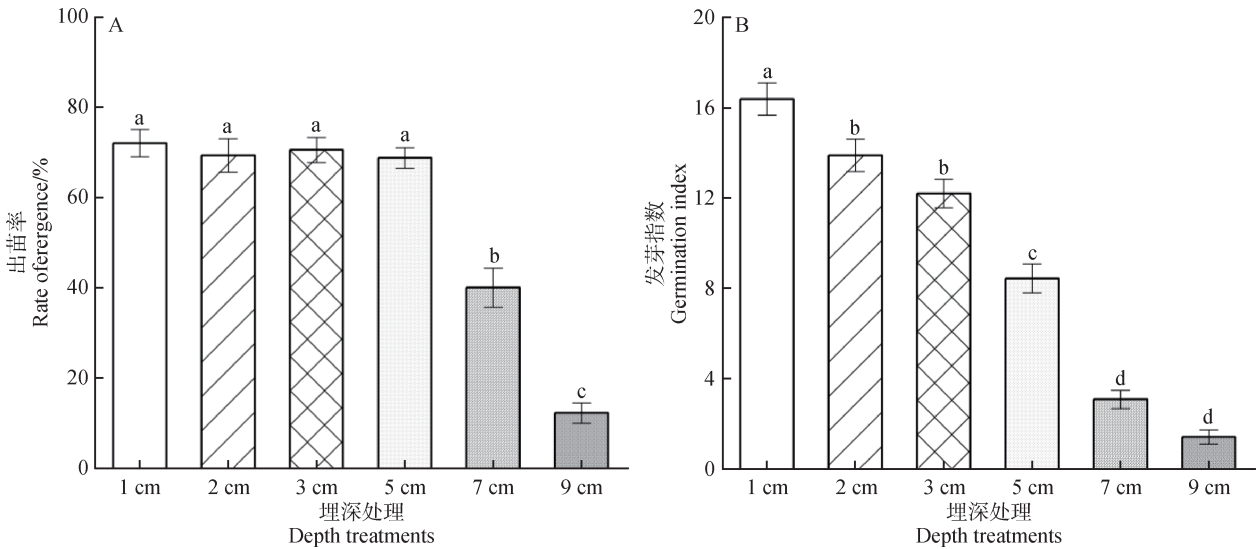


图 1 不同埋深下刺苍耳出苗分析

Fig. 1 Analysis of the emergence of *Xanthium spinosum* under different burial depths

注:不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same as below

2.2 幼苗形态特征的比较

表 1 的结果表明,刺苍耳幼苗的形态特征(株高、株重、主根长、刺数、刺长和叶片数)在不同埋深处理组之间存在显著差异($P<0.05$)。1 cm 处理组的株高和刺长显著高于其他处理组($P<0.05$),表明埋藏深度对刺苍耳的株高和刺长有显著影响。随着埋藏深度的增加,刺苍耳的株高逐渐减小,且 2 cm>3 cm>5 cm>7 cm>9 cm,说明较深的埋藏深度对

株高有抑制作用。主根长的变化趋势则与株高相反。1 cm 处理组的根长显著低于其他处理组($P<0.05$),而 2 cm 至 7 cm 处理组的主根长显著低于 9 cm 处理组($P<0.05$),这表明,埋藏深度对主根长的增长有促进作用。刺数量和叶片数在 2 cm,3 cm 和 5 cm 处理下与 1 cm 处理组相比均无显著差异,但 9 cm 处理组的刺数量和叶片数显著低于 1 cm ($P<0.05$)。

表 1 不同埋深刺苍耳幼苗形态特征的比较(平均值±标准误, $n=30$)

Table1 Comparison of the morphological characteristics of *X. spinosum* seedlings under different burial depths (mean±SE, $n=30$)

埋深处理 Burial depth treatment	株高 Plant height/cm	株重 Plant weight/g	主根长 Root length/cm	刺数量 Number of thorns	刺长 Thorns length/cm	叶片数 Number of blades
1 cm	7.34±0.22 ^a	1.05±0.03 ^a	9.38±0.18 ^c	27.7±1.39 ^a	29.63±1.8 ^a	9.33±0.16 ^{ab}
2 cm	7.14±0.17 ^{ab}	0.98±0.02 ^{ab}	10.55±0.2 ^b	25.23±0.88 ^a	23.04±1.7 ^b	9.53±0.12 ^{ab}
3 cm	6.48±0.24 ^{bc}	0.97±0.03 ^{ab}	10.77±0.16 ^b	24.6±1.09 ^{ab}	22.73±0.59 ^c	9.67±0.28 ^a
5 cm	5.88±0.16 ^c	0.89±0.04 ^{bc}	10.99±0.17 ^b	23.73±1.25 ^{ab}	21.97±1.35 ^{bc}	9.17±0.28 ^{ab}
7 cm	5.86±0.25 ^c	0.82±0.03 ^{cd}	11.26±0.27 ^b	21±1.54 ^{bc}	16.59±1.84 ^{cd}	8.83±0.24 ^{bc}
9 cm	4.7±0.15 ^d	0.74±0.02 ^d	12.24±0.33 ^a	18.5±1.76 ^c	11.54±1.68 ^d	8.33±0.25 ^c

注:不同埋深组间不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different letters among different burial depth groups indicate significant differences ($P<0.05$). The same as below

2.3 幼苗鲜重生物量的分配

根据图 2 结果显示,刺苍耳幼苗的生物量分配显著受到种子埋深的影响(根鲜重比, $F=134.3$,

$P<0.001$;茎鲜重比, $F=11.5$, $P<0.001$;叶鲜重比, $F=59.4$, $P<0.001$;刺鲜重比, $F=37.7$, $P<0.001$;根冠比, $F=22.3$, $P<0.001$)。随着沙埋深

度的增加,根鲜重比、根冠比均呈现逐渐增加的趋势,且在 7 cm 和 9 cm 沙埋深度下均显著高于 1 cm 沙埋深度 ($P < 0.05$)。

叶鲜重比在不同沙埋深度处理下变化相对较小(图 2),1 cm 埋深处理与其他埋深处理相比均无显著差异。茎鲜重比在 1~5 cm 处理下随着沙埋深度的

增加逐渐减少,在 5 cm、7 cm 和 9 cm 埋深下,茎鲜重比均显著低于 1 cm 处理组 ($P < 0.05$),表明较深的沙埋处理抑制了茎部的生长。刺鲜重比和生殖构件鲜重比在深埋条件下显著减少,特别是在 7 cm 和 9 cm 处理下,均显著低于 1 cm 处理组 ($P < 0.05$),表明较深的沙埋处理对刺生长有明显的抑制作用。

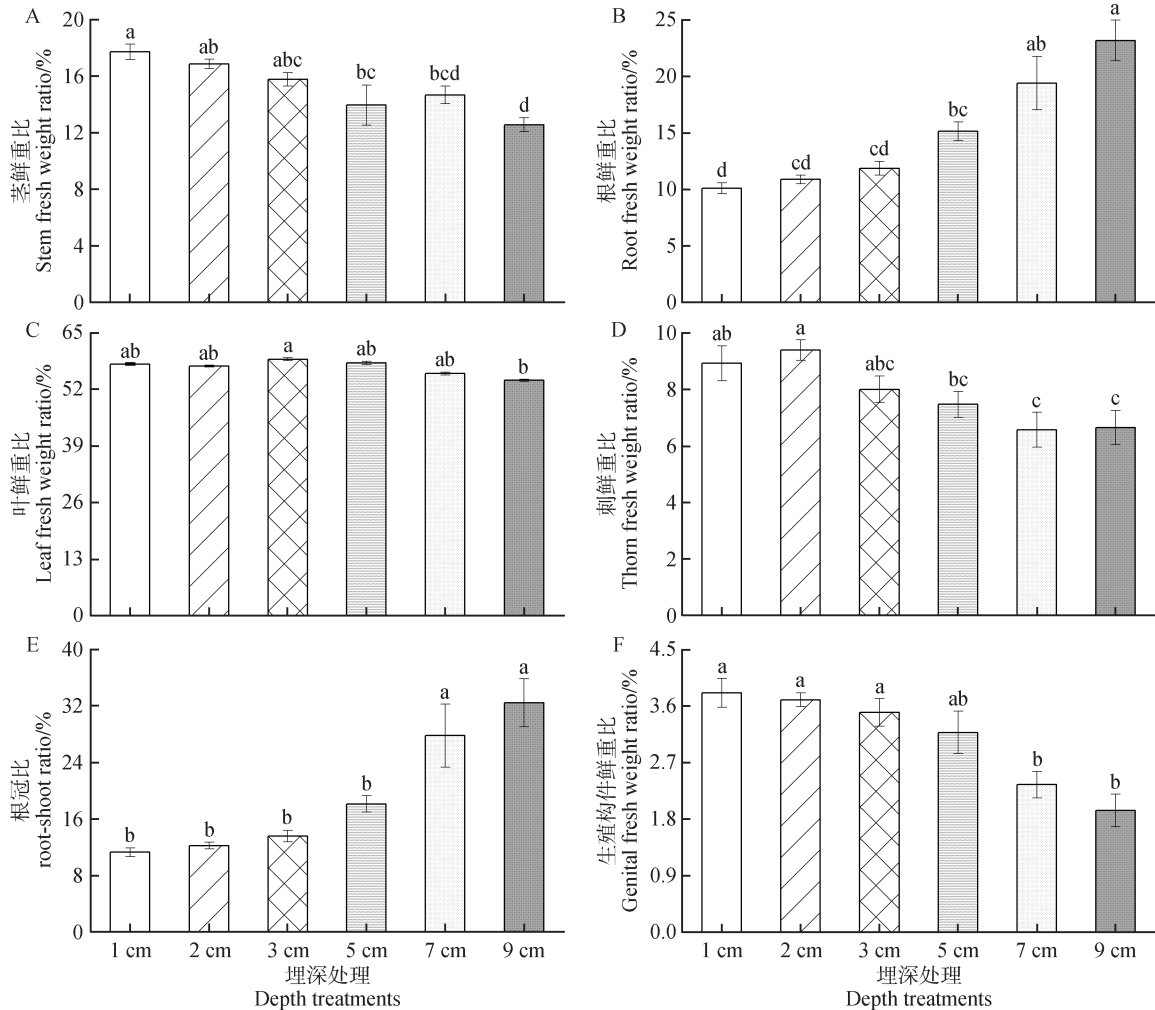


图 2 不同埋深刺苍耳幼苗鲜重生物量的分配

Fig. 2 Allocation of fresh-weight biomass of *X. spinosum* seedlings under different burial depths

2.4 幼苗各器官与株重之间的异速生长规律

不同埋深下刺苍耳幼苗的根、茎、叶、刺以及生殖构件的干重与整株植物的干重存在异速生长关系(表 2 和图 3)。在 1 cm 埋深下,生殖构件异速生长指数显著高于理论值 1.0 ($P < 0.05$),而在 2 cm 和 3 cm 埋深时则与理论值 1.0 无显著性差异。此外,在 5 cm 和 7 cm 埋深下,茎干重与植重的异速生长指数均显著高于 1.0 ($P < 0.05$),在 1 cm、2 cm、3 cm 和 9 cm 的处理下,与植株的异速生长指数与 1.0 的差异不显著。刺干重在 1 cm 和 2 cm 埋深时

与植株干重呈现等速生长关系,而其他埋藏深度下,刺干重与植株的异速生长指数显著高于 1.0 ($P < 0.05$)。叶干重与植株的异速生长指数在 1 cm、2 cm、3 cm 和 5 cm 埋深时,与植株干重呈等速生长关系,且与植株的异速生长指数与 1.0 的无显著性差异。值得注意的是,生殖构件干重与植株干重合计的斜率比值在所有处理中最高,达到 2.078,而根干重与植株干重的斜率比值最小,表明刺苍耳在资源有限的情况下,优先将资源分配给生殖结构,以确保种群的繁衍。

表 2 不同埋深刺苍耳幼苗各器官株干重生物量的异速生长参数与显著性检验(平均值±标准误, $n=30$)
Table 2 Allometric growth parameters and significance tests of the dry-weight biomass of each organ per plant of *X. spinosum* seedlings under different burial depths (mean ± SE, $n=30$)

因变量 y Dependent variable y	自变量 x Independent variable x	埋深 Depth of burial/cm	R^2	P	斜率 b(95% 置信区间) Slope b (95% confidence interval)	截距 a Intercept a	$P_{-1.0}$	异速关系 Allometric relationship
茎干重 Stem dry weight	植重 Total weight	1	0.608	<0.001	1.079 (0.849, 1.372) ^{cd}	-0.680 ^{bcd}	0.604	I
		2	0.796	<0.001	1.170 (0.983, 1.392) ^{bcd}	-0.604 ^{bcd}	0.349	I
		3	0.731	<0.001	0.828 (0.678, 1.01) ^d	-0.988 ^d	0.405	I
		5	0.624	<0.001	1.836 (1.451, 2.322) ^a	0.016 ^a	0.001	A
		7	0.900	<0.001	1.603 (1.419, 1.811) ^{ab}	-0.160 ^{ab}	0.005	A
		9	0.764	<0.001	1.155 (0.958, 1.392) ^{abc}	-0.721 ^{cd}	0.386	I
		合计 Total	0.760	<0.001	1.481 (1.377, 1.592) ^{bcd}	-0.312 ^{abc}	0.021	A
叶干重 Leaf dry weight	植重 Total weight	1	0.911	<0.001	1.031 (0.919, 1.157) ^{cd}	-0.208 ^b	0.728	I
		2	0.944	<0.001	1.145 (1.045, 1.254) ^{bcd}	-0.096 ^{ab}	0.162	I
		3	0.919	<0.001	1.105 (0.990, 1.233) ^{cd}	-0.121 ^b	0.294	I
		5	0.893	<0.001	1.020 (0.900, 1.158) ^d	-0.216 ^b	0.800	I
		7	0.953	<0.001	1.397 (1.285, 1.52) ^b	0.193 ^a	0.001	A
		9	0.923	<0.001	1.288 (1.157, 1.433) ^{bc}	0.079 ^{ab}	0.010	A
		合计 Total	0.931	<0.001	1.181 (1.136, 1.228) ^{cd}	-0.051 ^{ab}	0.595	I
生殖构件干重 Genital dry weight	植重 Total weight	1	0.338	<0.001	1.706 (1.251, 2.326) ^{bcd}	-0.599 ^{abc}	0.037	A
		2	0.470	<0.001	0.941 (0.712, 1.243) ^d	-1.328 ^c	0.919	I
		3	0.766	<0.001	1.509 (1.253, 1.818) ^{bcd}	-0.746 ^{bc}	0.136	I
		5	0.522	<0.001	1.999 (1.534, 2.604) ^{abc}	-0.229 ^{ab}	0.007	A
		7	0.645	<0.001	2.629 (2.091, 3.305) ^a	0.345 ^a	0.001	A
		9	0.686	<0.001	2.289 (1.845, 2.839) ^{ab}	0.110 ^{ab}	0.001	A
		合计 Total	0.656	<0.001	2.078 (1.906, 2.267) ^{ab}	-0.189 ^{ab}	0.001	A
根干重 Root dry weight	植重 Total weight	1	0.736	<0.001	1.346 (1.105, 1.64) ^a	-0.678 ^a	0.070	I
		2	0.616	<0.001	1.027 (0.810, 1.302) ^a	-0.956 ^a	0.808	I
		3	0.887	<0.001	1.193 (1.048, 1.358) ^a	-0.799 ^a	0.302	I
		5	0.858	<0.001	0.909 (0.786, 1.051) ^a	-1.093 ^a	0.657	I
		7	0.255	0.004	1.381 (0.995, 1.918) ^a	-0.519 ^a	0.035	A
		9	0.867	<0.001	1.032 (0.896, 1.188) ^a	-0.921 ^a	0.839	I
		合计 Total	0.573	<0.001	1.020 (0.926, 1.123) ^a	-0.955 ^a	0.904	I
刺干重 Thorns dry weight	植重 Total weight	1	0.760	<0.001	0.945 (0.783, 1.141) ^c	-1.113 ^b	0.851	I
		2	0.691	<0.001	1.120 (0.905, 1.387) ^{bc}	-0.933 ^{ab}	0.558	I
		3	0.610	<0.001	1.570 (1.236, 1.995) ^{ab}	-0.486 ^{ab}	0.019	A
		5	0.501	<0.001	1.735 (1.324, 2.274) ^a	-0.330 ^a	0.004	A
		7	0.859	<0.001	1.528 (1.322, 1.766) ^{abc}	-0.516 ^{ab}	0.032	A
		9	0.720	<0.001	1.588 (1.295, 1.946) ^{ab}	-0.440 ^{ab}	0.017	A
		合计 Total	0.729	<0.001	1.512 (1.400, 1.632) ^{abc}	-0.547 ^{ab}	0.039	A

注: R^2 为回归系数, P 表示方程拟合的显著性, 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); $P_{-1.0}$ 表示异速生长指数与理论值 1.0 比较的差异显著性, A 表示异速生长关系, I 表示等速生长关系

Note: R^2 denotes the coefficient of determination; P indicates the significance of the model fit. Different lowercase letters signify significant differences ($P < 0.05$). $P_{-1.0}$ indicates the significance of the difference between the allometric exponent and the theoretical value of 1.0; "A" denotes an allometric relationship, whereas "I" denotes an isometric relationship

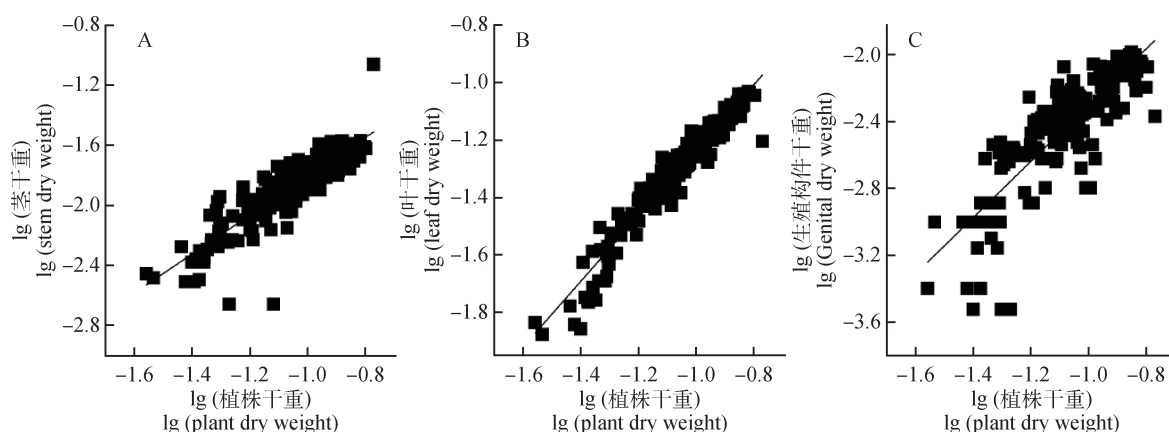


图3 不同埋深刺苍耳合计茎干重(A)、叶干重(B)和生殖构件干重(C)与植株干重异速生长的观测值和拟合直线($n=180$)

Fig. 3 Observed values and fitted lines of the allometric growth between the total stem dry weight (A), leaf dry weight (B), Genital dry weight (C) and the plant dry weight of *X. spinosum* under different burial depths ($n=180$)

3 讨论

3.1 沙埋深度的总体影响

种子出苗和幼苗生长受多种环境因素影响,栖息地干扰是重要因素之一。不同深度的沙埋能改变种子周围的微环境,包括温度、湿度和光照条件,从而显著影响种子的出苗和幼苗的生长。研究表明,沙埋可以调节种子的出苗时间^[27],并且通过维持较高的湿度环境,有效防止直接暴露于地表的种子受到高温或低温的伤害,进而提高幼苗的生长速度。然而,随着沙埋深度的增加,出苗率和幼苗高度逐渐降低。这些结果与Maun等^[28]的研究结论一致,表明沙埋深度对种子出苗和幼苗生长具有重要的调控作用。本研究进一步探讨了沙埋深度对刺苍耳种子出苗率和发芽指数的影响。结果表明,沙埋深度对刺苍耳种子的出苗率和发芽指数有显著影响。

3.2 浅层沙埋的作用

浅层沙埋能够为种子提供相对稳定的环境,保护其免受外部环境波动的影响,维持适宜的光照、温度和湿度,从而促进种子的出苗和幼苗的生长^[29]。此外,浅层沙埋更有利于种子的更新,能够提高种子的发芽率并加快幼苗的出苗速度。在适宜的沙埋深度下,种子的出苗率达到70%,显著高于7 cm和9 cm处理组;发芽指数则随着沙埋深度的增加而逐渐下降,说明浅层的沙埋深度促进了刺苍耳种子的出苗。结果表明,播种作物前实施深耕可将土壤中的刺苍耳种子翻入深层土壤,此举对作物种植有益。在一些长期受刺苍耳侵扰的农田中,通过深耕操作使刺苍耳种子处于深层土壤,减少了其在作物生长区域的出苗,从而降低了对作物生长的竞争压力。

3.3 深层沙埋的作用

深层沙埋由于缺乏氧气、光照和温暖的环境,显著抑制了种子的出苗活性,并限制了幼苗的生长^[30]。过深的沙埋会减少种子接触到的光照量,从而延迟出苗时间,直接影响种子的出苗和幼苗的出土过程^[31-32]。随着沙埋深度的增加,幼苗的株高、叶片数减少,而根长显著增加。这是因为幼苗分配给地上部分的资源比例下降,导致株高和叶片发育受限。不同沙埋深度下刺苍耳幼苗的形态特征分析显示,随着沙埋深度的增加,幼苗的株高、叶片数呈现减少的趋势,而根长则显著增加。然而,随着沙埋深度的增加,幼苗分配给地上部分的资源比例逐渐下降,导致株高和叶片发育受限。深层沙埋导致土壤透气性降低和光照减弱,从而抑制了种子的出苗,即便种子能够出苗,幼苗在出土前可能因能量耗尽而无法继续生长,甚至死亡^[33]。这是因为种子出苗和幼苗早期生长所需的养分和能量完全依赖于种子内部储存的有限资源^[34]。此外,研究还发现,随着埋深的增加,幼苗分配给茎的比例逐渐减少,而根的比例则相应增加^[31]。这些结果表明,沙埋深度对幼苗的形态特征和资源分配模式具有显著影响^[7]。

3.4 异速生长的调控机制

异速生长(Allometry)指不同器官或生物量之间生长速率存在差异的现象,在植物生长进程中,它体现了植物依据环境条件变化调整生物量分配策略的能力。研究显示,随着埋藏深度增加,刺苍耳会提高根系生物量分配比例,这是典型的异速生长响应;不同沙埋条件下的植物也呈现各异的异速生长关系,如白刺(*Nitraria sibirica*)在繁殖生长阶段增加对叶片的相对生物量分配^[35],而虎尾草(*Chloris*

virgata)在不同降水条件下,其繁殖与非繁殖器官间的异速生长指数无显著差异^[36]。这些结果表明,通过调整器官间生长速率和生物量分配以适应环境变化是植物重要的生存策略。本研究发现,埋藏深度显著影响刺苍耳茎干重、刺干重与植株干重间的异速指数和常数,改变其生物量分配策略。不同埋深下,刺苍耳各器官与植株呈现不同异速生长关系:根干重在7 cm埋深,茎干重在5 cm和7 cm埋深、刺干重在3~9 cm埋深、叶干重在7 cm和9 cm埋深时与植株呈异速生长,其中刺干重异速指数显著高于理论值1,揭示了埋藏深度对其生物量分配的复杂调控机制,表明植物可通过调整各器官生长速率实现资源最优分配。

4 结论

综上所述,埋深对刺苍耳种子的出苗和幼苗生长具有显著影响。1 cm埋深处理下种子的发芽率和发芽指数达到了最大值。在适宜的埋深处理组中,刺苍耳种子的发芽率较高,幼苗的根长、株高和刺长等生长特征显著高于其他处理组,且鲜重显著增加。因此,浅沙埋条件对于刺苍耳种子的出苗过程、幼苗的生长态势及其形态建成均具有积极的促进作用,有助于该植物在干旱地区实现成功入侵与有效扩散。相反,深沙埋环境则会对刺苍耳的入侵进程产生明显的抑制效应。在防治评估方面,可依据深耕效果,结合化学药剂或生物防治手段,制定更高效的综合防治方案。这些研究结果为刺苍耳的科学防控提供了重要的数据支持和理论依据。未来有望基于此开展更多针对性的研究,以更好地应对刺苍耳入侵所带来的生态挑战。

参考文献

- [1] RAI K P, SINGH J S. Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111(20): 106020
- [2] 江贵波, 曾任森. 外来入侵植物的危害及防治[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(2): 273-274
JIANG G B, ZENG R S. Hazards and control of invasive alien plants[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2006, 34(2): 273-274
- [3] 刘忠军. 新疆外来林业有害生物入侵现状及趋势分析[J]. *新疆林业*, 2019, 6(2): 37-48
LIU Z J. Analysis of current situation and trend of foreign forestry harmful biological invasions in xinjiang[J]. *Xinjiang Forestry*, 2019, 6(2): 37-48
- [4] TAO Y Y, SHANG T C, YAN J J, et al. Effects of sand burial depth on *xanthium spinosum* seed germination and seedling growth[J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1): 43
- [5] HOBBS R J, HUMPHRIES S E. An integrated approach to the ecology and management of plant invasions[J]. *Conservation Biology*, 1995, 9(4): 761-770
- [6] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 迈迪娜·吐尔逊, 等. 外来入侵植物意大利苍耳在新疆的潜在分布及扩散趋势[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(13): 126-130
HEMIT S, ABDUSHALIK N, TURSUN M. Potential distribution and spread trend of italian cocklebur as an alien invasive plant in xinjiang[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2019, 47(13): 126-130
- [7] WANG T T, CHU G M, JIANG P, et al. Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and seedling biomass of *anabasis aphylla*[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2017, 49(2): 391-396
- [8] 罗亚勇, 赵学勇, 黄迎新, 等. 三种一年生藜科沙生植物出苗对沙埋深度和水分条件的响应[J]. *草业学报*, 2009, 18(2): 122-129
LUO Y Y, ZHAO X Y, HUANG Y X, et al. Seedling emergence of three *Chenopodiaceae* annuals in response to different sand burial depths and irrigation regimes[J]. *Journal of Grass Industry*, 2009, 18(2): 122-129
- [9] 岳永寰, 靳瑰丽, 韩万强, 等. 埋藏深度对醉马草种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 8-13
YUE Y H, JIN G L, HAN W Q, et al. Influence of burial depth on seed germination and seedling growth of *artemisia sphaerocephala*[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(2): 8-13
- [10] 吕朝燕, 张希明, 高智席, 等. 梭梭幼苗出土及生长对沙埋深度的响应[J]. *北方园艺*, 2016, 6(3): 55-60
LV C Y, ZHANG X M, GAO Z X, et al. Response of seedling emergence and growth of *haloxylon ammodendron* to different soil burial depths[J]. *Northern Horticulture*, 2016, 6(3): 55-60
- [11] 周明冬, 秦晓辉. 有害入侵生物刺苍耳的危害与控制[J]. *新疆农业科技*, 2014, 2(3): 47-48
ZHOU M D, QIN X H. Harm and control of harmful invasive plant *xanthium strumarium*[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2014, 2(3): 47-48
- [12] 宋珍珍, 谭敦炎, 周桂玲. 入侵植物刺苍耳在新疆的分布及其群落特征[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(7): 1448-1453
SONG Z Z, TAN D Y, ZHOU G L. Distribution of the invasive plant *Xanthium strumarium* in Xinjiang and its community characteristics[J]. *Northwest Journal of Botany*, 2012, 32(7): 1448-1453
- [13] 李阳, 亓雯雯, 李绍阳, 等. 苜蓿种子萌发和幼苗生长对温度、光照和埋深的响应[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(2): 332-339
LI Y, QI W W, LI S Y, et al. Response of alfalfa seed germination and seedling growth to temperature, light and burial depth[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(2): 332-339
- [14] 任昱, 魏春光, 何志, 等. 不同因素对沙蓬种子生活力和出苗的影响[J]. *内蒙古林业科技*, 2019, 45(3): 28-31
REN Y, WEI C G, HE Z, et al. The influence of different factors on seed viability and emergence of *caragana korshinski*[J]. *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2019, 45(3): 28-31

- [15] 郑伟, 栾志慧, 张红香, 等. 光照强度与埋深对外来植物曼陀罗幼苗生长的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(5): 30-37
ZHENG W, LUAN Z H, ZHANG H X, et al. The influence of light intensity and burial depth on the growth of invasive weed *datura stramonium* seedlings [J]. Ecological Science, 2019, 38(5): 30-37
- [16] CHEN H, MAUN M A. Effects of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *cirsium pitcheri* [J]. Plant Ecology, 1999, 140(1): 53-60
- [17] 肖遥, 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 929-940
XIAO Y, TAO Y, ZHANG Y M. Biomass allocation and leaf stoichiometric characteristics in four desert herbaceous plants during different growth periods in the gurbantünggüt desert, china [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 929-940
- [18] 孙俊, 王满堂, 程林, 等. 不同海拔典型物种枝叶大小异速生长关系[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 165-172
SUN J, WANG M T, CHENG L, et al. Allometry between twig size and leaf size of typical bamboo species along an altitudinal gradient [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 165-172
- [19] 张世航, 龚莉, 戈玉莹, 等. 不同密度下入侵植物北美车前生物量分配与异速生长关系[J]. 草业科学, 2021, 38(10): 1938-1949
ZHANG S H, GONG L, GE Y Y, et al. Biomass allocation and allometric growth relationship of invasive plant *Polygonum cespitosum* under different density [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(10): 1938-1949
- [20] SUN J, NIU S L, WANG J N. Divergent biomass partitioning to aboveground and belowground across forests in china [J]. Journal of Plant Ecology, 2018, 11(3): 484-492
- [21] WARTON D I, WRIGHT I J, FALSTER D S, et al. Bivariate line-fitting methods for allometry [J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2006, 81(2): 259-291
- [22] 梁巧玲, 刘忠权, 陆平, 等. 刺苍耳在新疆伊犁河谷的分布及生长发育特性[J]. 杂草学报, 2017, 35(1): 25-29
LIANG Q L, LIU Z Q, LU P, et al. Distribution and growth characteristics of *xanthium sibiricum* in Ili river valley, xinjiang [J]. Weed Science, 2017, 35(1): 25-29
- [23] 顾威, 马森. 外来入侵植物刺苍耳的繁殖生物学特性研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(3): 332-338
GU W, MA M. Study on the reproductive biological characteristics of invasive plant *xanthium strumarium* [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, 37(3): 332-338
- [24] YUAN Z, ZHENG X, ZHAO Y, et al. Phytotoxic compounds isolated from leaves of the invasive weed *xanthium spinosum* [J]. Molecules, 2018, 23(11): 2840-2852
- [25] WEST B J, WEST D. Are allometry and macroevolution related? [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(10): 1733-1736
- [26] 韩文轩, 方精云. 幂指数异速生长机制模型综述[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 951-960
HAN W X, FANG J Y. Review on the mechanism models of allometric scaling [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2008, 32(4): 951-960
- [27] YE X, LI L, BASKIN C C, et al. Sand burial helps regulate timing of seed germination of a dominant herb in an inland dune ecosystem with a semiarid temperate climate [J]. Science of the Total Environment, 2019, 680: 44-50
- [28] MAUN M A, RIACH S. Morphology of caryopses, seedlings and seedling emergence of the grass *Calamovilfa longifolia* from various depths in sand [J]. Oecologia, 1981, 49: 137-142
- [29] 任珺, 陶玲, 赵迎迎, 等. 播种深度对青藏铁路沙区植物白刺、油蒿、沙棘存活和生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 13-17
REN J, TAO L, ZHAO Y Y, et al. Influences of sowing depth on survival and growth of *nitraria tangutorum*, *hippophae rhamnoides*, and *artemisia ordosica* in sandy lands along the qinghai-tibet railway [J]. Journal of Northwest College of Forestry, 2012, 27(2): 13-17
- [30] SOLTANI A. Seed germination response of *haloxylon persicum* (Chenopodiaceae) to different hydrothermal conditions and sand burial depths [J]. Caspian Journal of Environmental Sciences, 2011, 9(2): 211-221
- [31] 曹慧英, 王丁波, 史建国, 等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2397-2404
CAO H Y, WANG D B, SHI J G, et al. Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2397-2404
- [32] 王超, 权红, 蔡翠萍, 等. 不同播种深度对西藏桃儿七种子萌发和出苗的影响[J]. 种子, 2013, 32(9): 38-40
WANG C, QUAN H, CAI C P, et al. Effects of different sowing depths on seed germination and seedling emergence of tibetan apricot [J]. Seed, 2013, 32(9): 38-40
- [33] LI Q Y, ZHAO W Z, FANG H Y. Effects of sand burial depth and seed mass on seedling emergence and growth of *nitraria sphaerocarpa* [J]. Plant Ecology, 2006, 185(2): 191-198
- [34] SEIWA K, WATANABE A, SAITOH T, et al. Effects of burying depth and seed size on seedling establishment of japanese chestnuts, *castanea crenata* [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 164(1): 149-156
- [35] 尉秋实, 赵明, 李昌龙, 等. 不同土壤水分胁迫下沙漠蒿的生长及生物量的分配特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 7-12
YU Q S, ZHAO M, LI C L, et al. Growth and biomass allocation of *Chilopsis linearis* under different soil water stresses [J]. Journal of Ecology, 2006, 25(1): 7-12
- [36] 王昌福, 刘滨硕, 吴玉婷, 等. 降水量变化条件下虎尾草的繁殖分配研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2020, 52(2): 110-114
WANG C F, LIU B S, WU Y T, et al. Study on reproductive biomass of *chloris virga* under various precipitations [J]. Journal of Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(2): 110-114

(责任编辑 付 宸)