

DOI: 10.20103/j.stxb.202408161938

杨若琪, 马少伟, 张秀龙, 包维楷, 李芳兰, 黄龙. 土壤石砾含量增加促进了干旱河谷乡土灌木种子萌发. 生态学报, 2025, 45(13): - .
Yang R Q, Ma S W, Zhang X L, Bao W K, Li F L, Huang L. Increasing rock fragment content in soils promoted seed germination of native shrub species in dry valley. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

土壤石砾含量增加促进了干旱河谷乡土灌木种子萌发

杨若琪^{1,2}, 马少伟^{1,2}, 张秀龙¹, 包维楷¹, 李芳兰^{1,*}, 黄 龙^{1,2}

1 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 种子萌发出苗是植物生命周期中关键而脆弱的阶段之一, 对环境因子变化十分敏感。土壤结构变化如何影响乡土植物种子的萌发特性尚不清楚, 缺乏田间的定量观测数据。以干旱河谷两个代表性乡土豆科旱生灌木胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 和鞍叶羊蹄甲 (*Bauhinia brachycarpa*) 种子为试验材料, 测定其在 4 个石砾含量处理 (0%, 25%, 50% 和 75%, v/v) 下的萌发过程、出苗率和出苗势, 明确其对土壤石砾含量变化的响应特征, 探究种子萌发特性与环境因子的相关关系。结果表明, 土壤石砾含量变化影响了两种乡土灌木种子的萌发, 具体表现为出苗率和出苗势随石砾含量增加而升高。在石砾含量梯度上, 鞍叶羊蹄甲种子出苗率与表层土壤平均温度及积温显著正相关, 而胡枝子种子萌发与二者无明显相关性。土壤水分含量与两种灌木种子发芽能力之间呈显著负相关关系。总体上, 干旱河谷气候条件下, 中、高石砾含量 (50% 和 75%) 导致表层土壤温度升高和含水率降低, 从而促进乡土灌木种子萌发, 并且鞍叶羊蹄甲种子萌发对石砾含量变化反应较为敏感。研究结果加深了对干旱背景下石质土壤中种子萌发与土壤环境因子之间的关系理论认识, 为多石山区生态恢复和耕作实践提供理论支持。

关键词: 石砾含量; 旱生植物; 种子萌发; 干旱河谷; 土壤温度; 土壤含水量

Increasing rock fragment content in soils promoted seed germination of native shrub species in dry valley

YANG Ruqi^{1,2}, MA Shaowei^{1,2}, ZHANG Xiulong¹, BAO Weikai¹, LI Fanglan^{1,*}, HUANG Long^{1,2}

1 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Seed germination and seedling emergence, incontrovertibly representing a critically essential and extremely vulnerable phase in the elaborate and ever changing plant life cycles, demonstrate an acutely high level of sensitivity to any minute and subtle alterations in environmental factors. Nevertheless, the effects of soil structural modifications on native plant seeds germination characteristics remain poorly understood, with the scarcity of comprehensive, detailed, and indepth quantitative observations available from field studies. This study examined the seeds of two representative native leguminous xerophytic shrubs (*Lespedeza bicolor* and *Bauhinia brachycarpa*) from dry valleys, quantifying germination processes, emergence rates, and seedling potentials across four rock fragment content (RFC) treatments (0%, 25%, 50%, and 75% v/v). The aim was to clarify the responsive patterns to changes in rock fragment content of soil and to explore the correlations nexus between seed germination characteristics and environmental factors. Results revealed significant impacts of soil rock fragment content variations on both shrub species' seed germination. Specifically, as the gradually increase of rock fragment content, both the emergence rates and seedling showed an upward trending pattern. Along the RFC gradient, *Bauhinia brachycarpa* seeds emergence rates showed a significant positive correlation with the mean topsoil temperature and

基金项目: 国家自然科学基金 (32271654); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划 (K2022Z013); 四川省科技厅项目 (2022ZYD0122)

收稿日期: 2024-08-16; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lifl@cib.ac.cn

the accumulated temperature, whereas *Lespedeza bicolor* seeds germination exhibited no significant correlations associated with temperature. Additionally, a significant negative correlation was found between soil water content and the germination abilities of both shrubs' seeds. Overall, medium to high levels of rock fragment content (50% and 75%) in the dry valley climate conditions led to an elevation in the topsoil temperature and a reduction in water content, which still promoted the germination of native shrub seeds. Moreover, it was also observed that *Bauhinia brachycarpa* seeds were more responsive to the changes in rock fragment content compared to *Lespedeza bicolor* seeds. These research findings substantially contribute to enhancing theoretical understanding of soil environment-seed germination interactions under drought conditions, providing valuable insights for ecological restoration and agricultural practices in stony mountainous regions.

Key Words: rock fragment content; xerophyte; seed germination; dry valley; soil temperature; soil water content

种子萌发和成苗是植物生活史的关键环节,它受到多层面、多维度因素调控,其成败是决定植物是否顺利定居的关键因素之一,也决定着植物更新和种群维持。除种子活力、种皮厚度、激素水平、贮藏寿命等种子内在特征外^[1-3],外界温度、光照、水分因子均对种子萌发特性产生重要影响^[4-6]。土壤物理结构和种子大小决定种子与土壤之间的实际接触面积,这对种子萌发出苗过程至关重要^[7-8],其中粗颗粒(石砾,粒径>2 mm)组分含量对土壤结构较为关键,较高的土壤颗粒可能减少种子与土壤接触面积而降低种子萌发^[9]。然而,土壤中石砾含量介导的土壤结构和环境因子变化对野生种子萌发的影响程度、过程与机制尚不清楚,这一直是土壤-植物相互作用研究领域的薄弱点,需要通过自然条件下定量研究,获取相关理论认识,为乡土植物繁育技术研发与应用提供理论依据。

石砾广泛分布于全球土壤,对土壤水文过程、理化性质、植物生长产生重要影响^[10-12],直接或间接地影响植物种子萌发出苗。一方面,土壤石砾可能通过增加土壤大孔隙度而降低种子—土壤物理接触面积^[9, 13-14],阻碍种子萌发出苗;另一方面,石砾参与调节生态系统的水热循环^[15-16],改变土壤昼夜温差^[17],通过解除休眠和生长调节间接影响种子萌发。目前研究表明,适度石砾含量可优化土壤结构^[13],加速土体水分入渗、气体交换以促进种子萌发出苗^[18-20]。在我国南方红壤区,类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)种子发芽率和发芽势随砂砾比例增加而下降,含量适中时其发芽指数和活力指数较高,并有利于幼苗生物量积累,表明土壤砂砾含量影响种子萌发出苗和生长^[21-22];增加石砾含量(60%)促进掌叶木(*Handeliidendron bodinieri*)幼苗生长^[23]。然而,目前关于典型干旱区乡土旱生植物种子萌发对石质土壤结构响应模式研究有限,环境驱动因素不明,且多数研究限于实验室条件下的观测,田间观测数据匮乏。

石砾在干旱河谷生态系统(海拔 1200 m 至 3600 m)分布广泛,最高含量达 65%(g/g),因此,研究不同石砾含量对干旱河谷区植物种子萌发的影响对认识乡土植物生态适应性以及干旱、半干旱区农林实践均具有重要意义。本研究以干旱河谷灌丛优势种,胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)作为研究对象,在干旱河谷自然气候环境下开展不同石砾体积含量(0%, 25%, 50%和 75%, v/v)的植物生长试验,提出以下科学问题:(1)干旱气候背景下石质土壤变化对两种乡土灌木种子萌发出苗有何影响?(2)乡土灌木种子萌发出苗如何响应石砾结构梯度上土壤水热环境变化?通过动态监测种子萌发出苗过程,比较不同物种种子萌发对土壤石砾含量变化的响应及差异,分析种子萌发出苗与土壤环境因子之间的关系,揭示不同物种的种子萌发过程和能力对土壤石砾含量引起的土壤结构变化的响应,以期加深理解干旱环境中乡土灌木种子萌发对石质土结构变化的响应机制,从而为生态恢复实践中多石土壤的植被恢复和耕作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地点位于中国四川省茂县静州村撮箕山(31°70' N, 103°87' E, 海拔 1637 m),是岷江干旱河谷核心区。该区域属于干旱河谷气候,年平均气温为 15.6 °C,年平均降水量 495 mm,年日照时数为 1373.8 h,年平均

潜蒸发量为 1332 mm(数据来自茂县气象站),其中 83%的降水量发生在 4—10 月的生长季期间,11 月—次年 3 月为干旱期。该地土壤类型为黏壤质褐土,其特点是质地粗糙、肥力低,土壤深度为 50—70 cm^[24]。

1.2 研究对象

以西南干旱河谷灌丛优势种,胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)种子为试验材料。胡枝子,属豆科胡枝子属灌木,花期 7—9 月,果期 9—10 月,具有固氮机制。因其耐旱、耐贫瘠,对土壤适应性和再生能力强,常作为干旱半干旱退化生态系统植被恢复材料。鞍叶羊蹄甲,属云实亚科羊蹄甲属灌木,花期 5—7 月,果期 8—10 月,种子常规发芽率达 80%以上^[24],无根瘤固氮机制,具有外生和内生菌根,冠层分支强度大,根系发达,具有较强的抗旱、耐贫瘠能力,为干旱河谷地区主要灌丛,在植被结构完整与水土的保持方面发挥着重要作用,就植被恢复方面而言具有很强的应用价值和潜力^[25—26]。种子于 2022 年成熟期采集于岷江干旱河谷原生境(茂县县城附近)。果实收集后自然条件下晾干,人工剥离果皮获得种子。所有种子在自然条件下保存至播种开始。

1.3 样地设置与试验设计

试验在半控制田间条件下进行,包括 2 个物种和 4 种石砾体积含量土壤结构处理(0%、25%、50%和 75%,v/v)的随机区组设计,共设置 8 种处理,每个处理有 4 个重复(小区),共有 32 个小区(4 个石砾体积含量×2 个物种×4 个重复)。每个小区挖出长 1 m,宽 1 m,深 0.5 m 的深坑,按试验设置的 4 个石砾体积含量将细土(直径≤2 mm)和石砾(10 mm≤粒径≤20 mm)均匀混合后,分别回填每个小区。相邻小区间距为 0.5 m。并将每个土坑除底部外周围都铺上聚乙烯薄膜,以防止小区之间的干扰。细土初始养分含量为总碳(15.3±0.09) g/kg,总氮(2.3±0.02) g/kg,总磷(0.61±0.12) g/kg^[27]。

2023 年 4 月 19 日,每个小区选取 30 粒饱满、完整的种子进行播种(共 960 粒,4 个石砾体积含量×2 个物种×4 个重复×30 粒)。在每个小区对角线方向等间距选取 3 点,每个点在 0.5—1 cm 深度播种 10 粒种子。播种前,将所有种子在 0.5%的 KMnO₄溶液中浸泡 20 min 消毒。播种后立即用气压式喷雾壶进行浇水至土壤表面湿润,每个小区浇水量相等,此后不再浇水,种子在自然气候条件下萌发出苗。

1.4 数据收集

1.4.1 种子萌发特征

播种后,每 7 天记录种子萌发出苗数量,观察周期为 4 月 19 日—5 月 24 日。每次将记录完毕的幼苗拔除,便于下次准确记录。种子出苗率和出苗势采用以下公式计算^[28—29]:

$$\text{出苗率}(\%) = (\text{观测结束时萌发出苗个数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{出苗势}(\%) = (\text{出苗高峰期萌发出苗个数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

出苗高峰期,在种子萌发出苗过程中日平均出苗数达到最高时种子出苗数。在本试验中是指播种后第 21 天种子出苗个数达到最大。

1.4.2 土壤环境因子数据

2020—2022 年分别采用 iButton 温度数据记录器(MAXIM,美国)和中子探针分析仪(CNC503DR,美国)动态监测每个小区土壤温度和土壤含水量。在此期间,当日每 4 个小时记录一次土壤温度;每 3 天采集一次土壤中子水势,水势换算成土壤含水量^[16]。由于种子播种在土壤表面,受表土层土壤环境的影响较大,因此本文统计 0—10 cm 土层土壤温度、含水量数据。土壤水分和温度采用三年 4 月 19 日—5 月 24 日的平均值,积温通过以下公式计算^[30]:积温(℃)=Σ 生长期逐日平均温度,进一步探讨温度对种子萌发的影响。

1.5 统计分析

用 Shapiro-Wilk 检验数据的正态性,Levene's test 检验数据的方差齐性。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析各物种出苗率和出苗势在不同石砾含量之间的差异,并采用最小显著差异(LSD)法进行多重比较($\alpha < 0.05$)。采用线性回归方法分析植物种子萌发方面与 3 年土壤温度、含水量均值以及积温之间的关系。统计分析和作图主要在软件 Excel 2020、SPSS 25、Origin 2024 下进行。

2 结果

2.1 表层土壤环境数据

2020—2022 年 4 月 19 日—5 月 24 日土壤温度 (Soil temperature, ST) 和土壤含水量 (Soil water content, SWC) 统计如下 (图 1)。土壤温度受土壤石砾调控并不明显, 三年平均温度分别为: 16.2 °C (0% RFC)、16.6 °C (25% RFC)、16.7 °C (50% RFC) 和 16.8 °C (75% RFC)。土壤水分在土壤结构梯度间响应明显, 随着石砾含量增加, 平均含水量相应降低: 32.5% (0% RFC)、25.8% (25% RFC)、20.3% (50% RFC) 和 14.1% (75% RFC), 在不同石砾含量土壤中, 当月土壤含水量变化趋势相似。

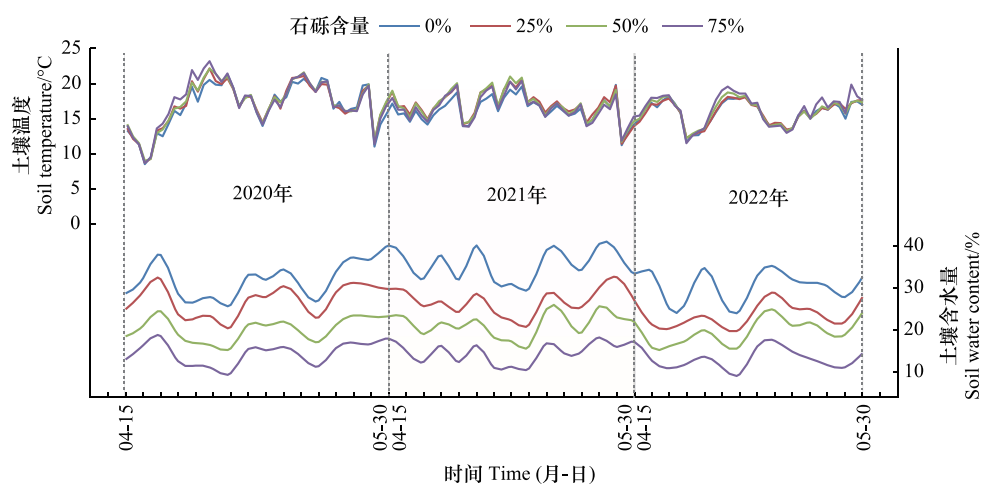


图 1 2020—2022 年当月表层土壤温度和含水量

Fig.1 Monthly topsoil temperature and water content in 2020—2022

2.2 石砾含量梯度上种子出苗动态变化及种间差异

在所有土壤石砾含量条件下, 两种植物的种子在播种后第 3 周开始萌发出苗, 且出苗数量最高, 一个月内出苗基本结束。种子出苗高峰期, 无石土中种子出苗数量很低, 随着土壤中石砾含量增加, 出苗数量呈增加趋势 (图 2)。第 21 天, 胡枝子总出苗数量随石砾含量递减分别为 14 株、12 株、11 株、2 株, 随后在第 28 天时, 石砾含量为 0% 和 25% 的土壤上未观察到新种子出苗, 35 天后 4 个土壤结构水平上种子均停止出苗 (图 2)。鞍

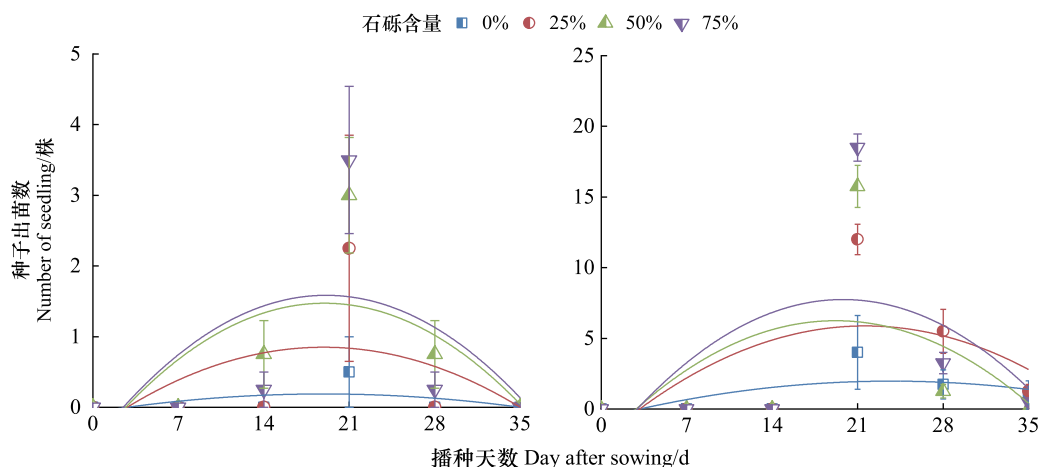


图 2 不同石砾含量土壤下胡枝子和鞍叶羊蹄甲的出苗动态 (平均值±标准误, $n=4$)

Fig.2 Seedling dynamics of *Lespedeza bicolor* and *Bauhinia brachycarpa* under different RFC (mean±SE, $n=4$)

叶羊蹄甲在播种 21 天时,种子总出苗个数分别为 74 株、63 株、48 株和 16 株,直至最后一次观测,除 50% RFC 土壤,其他石质土壤中种子仍有萌发出苗(图 2)。

2.3 石砾含量梯度上种子出苗率的变化及种间差异

干旱河谷土壤石砾含量梯度上,胡枝子种子出苗率在 1%—13%之间(总体上低于常规条件出苗率),鞍叶羊蹄甲种子出苗率为 22%—75%。两个物种的出苗率在不同石砾含量处理之间均存在显著差异($P<0.05$; 表 1),出苗率随着土壤石砾含量的增加呈增长趋势,在 75% RFC 条件下平均出苗率分别达到 12.5% 和 74.12%(表 1)。

表 1 不同石砾含量土壤下各物种的出苗率(%) (平均值 $\pm$ 标准误)

Table 1 The seedling emergence rate (%) of observed species under different RFC (mean $\pm$ SE)

物种 Species	0% RFC	25% RFC	50% RFC	75% RFC
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	1.67 $\pm$ 1.67b	10.82 $\pm$ 4.16ab	12.50 $\pm$ 1.60a	12.50 $\pm$ 2.85a
鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i>	22.50 $\pm$ 7.86b	62.50 $\pm$ 6.72a	56.67 $\pm$ 4.71a	74.17 $\pm$ 1.60a

小写字母表示同一物种在不同石砾含量之间的显著差异($n=4, P<0.05$); RFC: 石砾含量 Rock fragment content

2.4 石砾含量梯度上种子出苗势的变化及种间差异

两个物种种子出苗高峰出现在播种后第 21 天(表 2)。胡枝子种子出苗势在 1.67%—11.67%之间,在不同石砾含量处理之间无显著差异;鞍叶羊蹄甲种子出苗势在 13.33%—61.67%之间,在不同石砾含量处理之间具有显著差异($P<0.01$; 表 2),石质土壤中出苗势在 40%—61.7%之间,明显高于 0% RFC 土壤中的 13.33%。

表 2 不同石砾含量土壤下各物种的出苗势/% (平均值 $\pm$ 标准误)

Table 2 The seedling potential (%) of observed species under different RFC (mean $\pm$ SE)

物种 Species	0% RFC	25% RFC	50% RFC	75% RFC
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	1.67 $\pm$ 1.67a	9.16 $\pm$ 4.78a	10.83 $\pm$ 2.85a	11.67 $\pm$ 3.47a
鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i>	13.33 $\pm$ 8.71c	40.00 $\pm$ 3.60b	52.50 $\pm$ 4.98ab	61.67 $\pm$ 3.19a

不同小写字母表示同一物种在不同石砾含量之间的显著差异($n=4, P<0.05$)

2.5 石砾含量梯度上种子萌发与表层土壤温度和水分之间的关系

跨石砾含量梯度上回归分析显示,鞍叶羊蹄甲出苗率与表层土壤(土层 0—10 cm)温度显著正相关($R^2_{B.b(SGR)-ST}=0.22$),而胡枝子出苗率与土壤温度之间无明显相关性(图 3);种子出苗势与土壤温度之间线性关系都较弱(图 3)。鞍叶羊蹄甲种子出苗率与出苗势均与积温显著正相关,胡枝子种子萌发与积温无显著相关性(图 4)。两种灌木种子的出苗率与土壤含水量之间都具有显著的负相关关系(图 3; $R^2_{B.b(SGR)-SWC}=0.369$; $R^2_{L.b-SWC}=0.259$),并且鞍叶羊蹄甲出苗势也与土壤含水量负相关(图 3; $R^2_{B.b(SGP)-ST}=0.451$)。

3 讨论

3.1 不同物种种子萌发特性对土壤石砾含量变化的响应模式及差异

石质土结构变化显著影响两个乡土灌木种子萌发出苗率和出苗势,具体表现为种子萌发能力随 0%—75%范围内的石砾含量增加而增加,表明土壤中含有一定的石砾能够提高旱生植物的种子萌发能力。这与 Peter 等人的研究结果相一致,表土中添加石砾使植物平均出苗率提高了 2.5 倍^[31],此外,在我国南方红壤侵蚀区, $\geq 25\%$ 的粗颗粒能够促进类芦和宽叶雀稗种子萌发和幼苗生长,但是随土壤粗颗粒比例的进一步升高,种子发芽率、发芽势和幼苗生物量等均明显下降^[21—22]。郑姗姗等人^[32]也发现长汀县砂砾化土壤导致乔灌木植物种子难以萌发。值得注意的是目前有关石砾对种子萌发特性影响的研究结果还未形成普遍结论,并且针对典型干旱区自然气候条件下的研究数据十分有限。本研究结果表明干旱河谷旱生灌木能够适应的石砾含量范围更宽。此外,野外试验的种子萌发高峰期出现在播种后第 21 天(图 2),而在实验室条件下多数种子萌发高峰期出现在一周左右^[24],说明野外环境因素多变,该研究结果能够更加真实地反映种子在自然气候

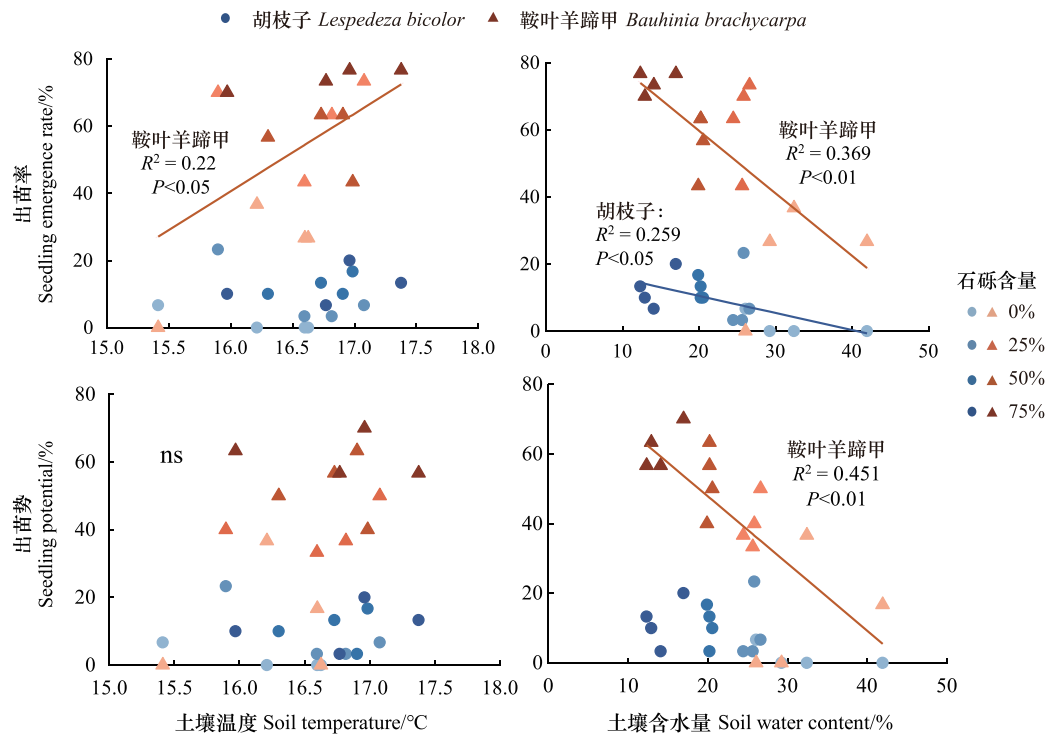


图 3 表层土壤温度和含水量与种子萌发的回归分析

Fig.3 Linear regression analysis of topsoil temperature and water content and seed germination
ns: 无显著差异

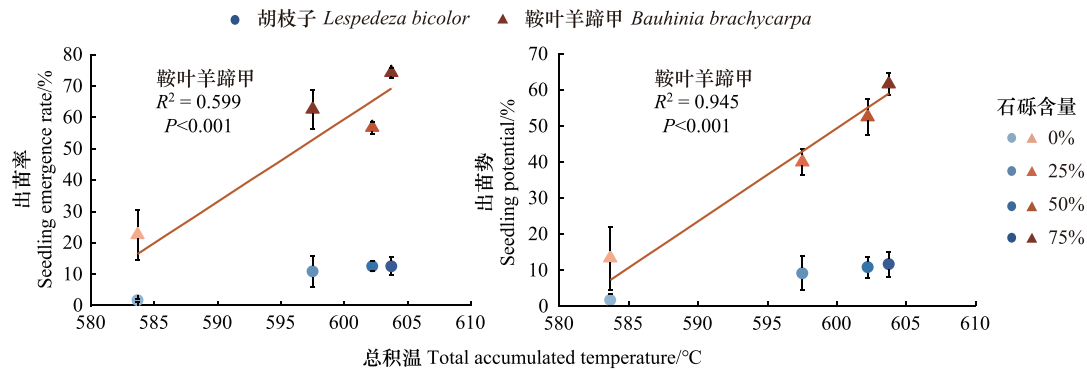


图 4 表层土壤积温与种子萌发的回归分析

Fig.4 Linear regression analysis of topsoil accumulated temperature and seed germination

条件下的萌发情况。

基于前期干旱河谷区调查结果,当地石砾含量分布范围在 1%—65%不等,在多数干旱河谷斑块状灌草群落中,胡枝子通常是鞍叶羊蹄甲伴生物种^[24]。种间比较分析进一步发现,干旱河谷两种乡土豆科灌木种子发芽动态格局及其对土壤不同石砾含量变化响应模式相似(图 2),但是两者总体萌发能力对石质土结构变化的适应性存在显著差异。胡枝子出苗率整体偏低(小于 13%),表明该物种在种子萌发阶段受到干旱河谷环境的限制。但是,胡枝子在高石砾土壤中出苗率显著高于无石土壤,可见在石质土壤修复区仍有不可忽视的应用价值。鞍叶羊蹄甲出苗在 25%、50%和 75%石砾含量土壤中并没有显著差异(表 1),尤其该物种种子萌发对中、高石砾(50%和 75%)含量土壤的适应性明显高于胡枝子,暗示在干旱河谷(65%)气候条件下,鞍叶羊

蹄甲种子萌发阶段能够适应高石砾含量土壤条件,这支持前期有关种子大小、根系垂直分布、生物量分配和生产力等方面得到的研究结论^[24, 33],这一系列的研究表明鞍叶羊蹄甲对石质土壤具有广泛适应性,表现为对高石砾含量土壤条件的适应性更强,在乡土植被恢复应用潜力更大。该结果为干旱石质山区生态系统乡土植被恢复物种筛选和植物种植环境调控提供了直接证据,对干旱、贫瘠生态系统植被恢复具有重要意义。

3.2 不同物种的种子萌发对土壤石砾含量变化的响应机制

在干旱河谷区,温度、降雨等对不同植物种子萌发有重要影响^[16, 24]。Huang 等^[16]揭示了干旱河谷区土壤石砾含量的变化驱动的表层(0—10 cm)土壤温度和水分的时空格局机制,发现石砾存在使土壤温度升高,而土壤含水量下降,并强化了两者的耦合关系。本研究发现,土壤中石砾含量增加提高了表层土壤温度,降低含水量,两者变化解释了植物种子萌发动态,具体表现为:胡枝子和鞍叶羊蹄甲种子出苗率以及鞍叶羊蹄甲种子出苗势与土壤水分含量之间都呈显著负相关关系,并且鞍叶羊蹄甲种子出苗率与表层土壤温度呈现显著正相关关系。这表明干旱河谷自然气候条件下,土壤中石砾含量驱动土壤水热环境改变,与土壤结构共同作用于种子萌发过程。

研究结果显示,土壤中石砾在有助于提高土壤温度,并有效提高了表层土壤积温,导致高石砾含量土壤中灌木种子萌发达到峰值,特别是鞍叶羊蹄甲种子的萌发对温度变化响应更加敏感。有关种子萌发积温效应的研究发现,青藏高原 12 种菊科植物种子最低萌发温度较低,但积温较高,因此萌发需要时间较长^[34],这为本试验两种旱生植物种子萌发出苗高峰期出现在观测的 3/5 时期提供了证据(图 2;图 4)。研究结果显示,两种植物种子平均出苗率和出苗势均与土壤积温成正比,均出现在积温最高的 75% RFC 土壤,表明石砾引起的土壤积温变化是影响种子萌发出苗的重要因素。

研究表明豆科旱生灌木柠条(*Caragana korshinskii*)种子萌发的适宜土壤含水量在 16%—20%之间^[35],而石砾含量增加显著降低了土壤水分含量^[16](图 1),将土壤含水量控制在 10%—30%之间,能够满足两种乡土灌木种子萌发需求。虽然高石砾含量土壤的水分减少,尤其是 75% RFC 条件下含水量为 10%—20%,但是胡枝子和鞍叶羊蹄甲的种子出苗率却呈现出较高的水平,因此在本试验石砾含量梯度上,土壤含水量仍高于两种乡土灌木种子萌发的“临界含水量”,能够达到两种乡土灌木种子萌发适宜的土壤水分环境。种子出苗率随着土壤水分降低而显著增加,反映了干旱河谷区植物群优势物种对多石山区高温干旱生境的适应性优势。

4 结论

本研究通过野外半控制试验探讨西南干旱河谷地区广泛分布的灌丛优势种在石质土结构梯度上的种子萌发特性,初步揭示了种子萌发能力随着石砾含量的变化趋势,明确种子萌发能力与土壤温度和土壤水分之间的相关关系,阐释了土壤结构变化对乡土植物种子萌发的影响机制。总体上,鞍叶羊蹄甲在种子萌发出苗阶段对土壤结构变化敏感,高石砾含量在一定程度上增强了该物种的出苗率和出苗势;胡枝子整体上种子出苗率偏低,并且对土壤环境变化不敏感。土壤温度和土壤水分变化不同程度地解释了石砾含量梯度上两物种种子萌发出苗的变化。研究结果不仅提升了干旱化背景下种子萌发出苗阶段适应土壤结构变化的理论认识,而且为干旱、半干旱区生态恢复物种筛选、种植环境控制提供有价值的依据。

参考文献(References):

- [1] 宋松泉,唐翠芳,程红焱,舒凯. 种子萌发调控的研究进展. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(7): 1226-1253.
- [2] Miransari M, Smith D L. Plant hormones and seed germination. Environmental and Experimental Botany, 2014, 99: 110-121.
- [3] Farooq M A, Ma W, Shen S X, Gu A X. Underlying biochemical and molecular mechanisms for seed germination. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(15): 8502.
- [4] 孙清琳,张瑞红,易三桂,杨柳,李巧燕,周继华,来利明,姜联合,郑元润. 长芒草(*Stipa bungeana*)种子萌发与出苗对关键环境因子的响应. 生态学报, 2019, 39(6): 2034-2042.
- [5] Stoian-Dod R L, Dan C, Morar I M, Sestras A F, Truta A M, Roman G, Sestras R E. Seed germination within genus *Rosa*: the complexity of the process and influencing factors. Horticulturae, 2023, 9(8): 914.

- [6] 张敏, 朱教君. 光温条件对不同种源红松种子萌发的影响. 植物生态学报, 2022, 46(6): 613-623.
- [7] Blunk S, de Heer M I, Sturrock C J, Mooney S J. Soil seedbed engineering and its impact on germination and establishment in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by seed-soil contact. *Seed Science Research*, 2018, 28(3): 236-244.
- [8] 杨慧玲, 梁振雷, 朱选伟, 梅世秀, 王会勤, 申艳, 黄振英. 沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响. 生态学报, 2012, 32(24): 7757-7763.
- [9] Zhou H B, Chen Y, Sadek M A. Modelling of soil-seed contact using the Discrete Element Method (DEM). *Biosystems Engineering*, 2014, 121: 56-66.
- [10] Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, Lavrysen E, Haile M, Deckers J. Spatial distribution of rock fragments in cultivated soils in northern Ethiopia as affected by lateral and vertical displacement processes. *Geomorphology*, 2002, 43(1-2): 1-16.
- [11] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, Shi Z H, Xu Q X, Fu Z Y, Guo Z L. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China. *Geomorphology*, 2012, 151: 234-242.
- [12] Lai X M, Liu Y, Li L Y, Zhu Q, Liao K H. Spatial variation of global surface soil rock fragment content and its roles on hydrological and ecological patterns. *Catena*, 2022, 208: 105752.
- [13] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于澎涛, 郭浩, 徐大平. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响. 生态学报, 2008, (10): 4929-4939.
- [14] Brown A D, Dexter A R, Chamen W C T, Spoor G. Effect of soil macroporosity and aggregate size on seed-soil contact. *Soil and Tillage Research*, 1996, 38(3-4): 203-216.
- [15] McCormick E L, Dralle D N, Jesse Hahm W, Tune A K, Schmidt L M, Dana Chadwick K, Rempe D M. Widespread woody plant use of water stored in bedrock. *Nature*, 2021, 597(7875): 225-229.
- [16] Huang L, Bao W K, Hu H, Traselin Nkrumah D, Li F L. Rock fragment content alters spatiotemporal patterns of soil water content and temperature: Evidence from a field experiment. *Geoderma*, 2023, 438: 116613.
- [17] 赵成政, 王亚军, 谢忠奎, 张玉宝, 郭志鸿, 邱阳, 华翠平, 周丽靖. 砾石长期覆盖对土壤呼吸的影响. 中国沙漠, 2020, 40(2): 232-239.
- [18] Zhang W H, Wei C F, Li Y, Wang G G, Xie D T. Effects of rock fragments on infiltration and evaporation in hilly purple soils of Sichuan Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(8): 1655-1665.
- [19] Li J M, Wang W L, Guo M M, Kang H L, Wang Z G, Huang J Q, Sun B Y, Wang K, Zhang G H, Bai Y. Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(11): 3896-3908.
- [20] Liao K H, Lai X M, Zhou Z W, Zeng X K, Xie W Y, Castellano M J, Zhu Q. Whether the Rock Fragment Content Should Be Considered When Investigating Nitrogen Cycle in Stony Soils? *JGR Biogeosciences*, 2019, 124(3): 521-536.
- [21] 郑惠欣, 黄晓, 蔡丽平, 侯晓龙, 周垂帆, 曾思毅, 魏梦玉, 邱庆舒. 土壤颗粒组成及黏着剂对类芦种子萌发和幼苗生长的影响. 草业学报, 2020, 29(2): 92-102.
- [22] 王玉珍, 黄晓, 蔡丽平, 郑惠欣, 侯晓龙, 周垂帆, 张虹, 黄鹏萍, 华聪. 不同温度条件下土壤颗粒组成对宽叶雀稗种子发芽与幼苗生长的影响. 草业学报, 2018, 27(9): 45-55.
- [23] 马朝阳, 刘天凤, 李晓雪, 霍灿灿, 付玲玲, 李在留. 土壤石砾含量对掌叶木幼苗生长及生理影响的年际变化. 植物研究, 2023, 43(6): 890-899.
- [24] 包维楷, 庞学勇, 李芳兰, 周志琼. 干旱河谷生态恢复与持续管理的科学基础. 北京: 科学出版社, 2012.
- [25] Hu H, Bao W K, Eissenstat D M, Huang L, Liu J, Li F L. Rock fragment content in soils shift root foraging behavior in xerophytic species. *Plant and Soil*, 2022, 478(1): 671-688.
- [26] Zhang X L, Ma S W, Hu H, Li F L, Bao W K, Huang L. A trade-off between leaf hydraulic efficiency and safety across three xerophytic species in response to increased rock fragment content. *Tree Physiology*, 2024, 44(3): tpae010.
- [27] Hu H, Li F L, McCormack M L, Huang L, Bao W K. Functionally divergent growth, biomass allocation and root distribution of two xerophytic species in response to varying soil rock fragment content. *Plant and Soil*, 2021, 463(1): 265-277.
- [28] 单立山, 李毅, 张正中, 白蕾, 段桂芳, 种培芳. 人工模拟降雨格局变化对红砂种子萌发的影响. 生态学报, 2017, 37(16): 5382-5390.
- [29] 朱静, 刘金福, 何中声, 邢聪, 王雪琳, 江蓝. 凋落物物理阻隔对格氏栲种子萌发及胚根生长的影响. 生态学报, 2020, 40(16): 5630-5637.
- [30] 储吴樾, 张往祥, 范俊俊. 观赏海棠花期性状与有效积温的关系. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(2): 153-159.
- [31] Golos P J, Commander L E, Dixon K W. The addition of mine waste rock to topsoil improves microsite potential and seedling emergence from broadcast seeds in an arid environment. *Plant and Soil*, 2019, 440(1): 71-84.
- [32] 郑姗姗, 陶长铸, 吴鹏飞, 马祥庆, 蔡丽平. 长汀红壤侵蚀区土壤砂砾化对土表温湿度及种子萌发的影响. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(5): 661-668.
- [33] Hu H, Bao W K, Huang L, Li F L. Shifting patterns in fine root distribution of four xerophytic species across soil structural gradients and years of growth. *Ecology and Evolution*, 2024, 14(2): e10889.
- [34] 刘文, 刘坤, 张春辉, 杜国祯. 种子萌发的积温效应——以青藏高原东缘的 12 种菊科植物为例. 植物生态学报, 2011, 35(7): 751-758.
- [35] 杨慧, 张泽, 张兰, 闫兴富. 柠条种子萌发对不同温度和土壤含水量的响应. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1875-1884.