北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

西藏亚高山森林土壤种子库与地上植被群落的海拔梯度分异特征

邓炜展 张艳 王彬 袁旭 彭李 冀晓东 周金星 张喆

Altitudinal gradient differentiation characteristics of soil seed bank and aboveground vegetation communities in subalpine forest of Xizang region, southwestern China

Deng Weizhan, Zhang Yan, Wang Bin, Yuan Xu, Peng Li, Ji Xiaodong, Zhou Jinxing, Zhang Zhe

引用本文:
邓炜展, 张艳, 王彬, 袁旭, 彭李, 冀晓东, 周金星, 张喆. 西藏亚高山森林土壤种子库与地上植被群落的海拔梯度分异特征[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):119–128. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250222
Deng Weizhan, Zhang Yan, Wang Bin, Yuan Xu, Peng Li, Ji Xiaodong, Zhou Jinxing, Zhang Zhe. Altitudinal gradient differentiation characteristics of soil seed bank and aboveground vegetation communities in subalpine forest of Xizang region, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):119–128. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250222

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250222

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京市城市公园绿地土壤种子库特征及其更新潜力
Characteristics and regeneration potential of soil seed banks in green space of urban parks in Beijing
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 1–15. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230024

海拔与坡向对伏牛山自然陡坡土壤种子库的影响
Effects of altitude and slope aspect on soil seed banks on natural steep slope of Funiu Mountain, Henan Province of central China
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 74–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210480

干旱矿区利用夏季和上年秋季土壤种子库恢复植被研究
Using soil seed bank in summer and previous autumn to restore vegetation in arid mining area
北京林业大学学报, 2024, 46(5): 93–102. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230228

林下植被叶际微生物群落对生活型与光照的响应
Responses of phyllosphere microbial communities in understory vegetation to plant life form and light intensity
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 67–79. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250088

戴云山南坡不同海拔森林土壤优势细菌群落特征及影响因素
Characteristics and its influencing factors of forest soil dominant bacterial community in different elevations on the southern slope of Daiyun Mountain, Fujian Province of eastern China
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 107–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200278

不同表土覆盖方式对种子库活力的影响
Effects of different topsoil covering modes on seed bank vitality
北京林业大学学报, 2022, 44(4): 86–94. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210392

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250222

西藏亚高山森林土壤种子库与地上植被群落的海拔梯度分异特征

邓炜展[1]　张　艳[1]　王　彬[1]　袁　旭[2,3,4]　彭　李[2,3]　冀晓东[1]
周金星[1]　张　喆[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 华能澜沧江水电股份有限公司，云南 昆明 650204；3. 华能澜沧江上游水电有限公司，西藏 昌都 854300；4. 西藏自治区澜沧江清洁能源安全绿色智能建设技术创新中心，云南 昆明 650214）

摘要:【目的】土壤种子库是植被群落更新与演替的潜在种源储备，研究亚高山森林生态系统中土壤种子库的分布特征及其与地上植被的关联，有助于评估生态系统的自然恢复潜力，为群落重建与生态修复实践提供科学依据。**【方法】**以西藏林芝市巴宜区海拔 2 300～3 300 m 的亚高山森林区为研究对象，采用样方法进行地上植被调查与土壤采样，并通过萌发法分析土壤种子库的物种组成、生活型构成及密度分布特征。**【结果】**(1)土壤种子库中共萌发 30 种植物，分属 15 科 27 属，主要为一年生或多年生草本植物，物种组成较地上植被群落更为单一。(2)随着海拔升高，土壤种子库与地上植被的物种丰富度均呈现“先增后降”的趋势，多年生草本植物比例增加，表现出对高海拔环境的较强适应性。(3)Margalef 丰富度指数、Shannon 多样性指数和 Simpson 多样性指数随海拔升高呈现先升后降的趋势。不同海拔高度的土壤种子库与地上植被的 Sørensen 相似性指数较低(0.240～0.375)，并随海拔升高呈下降趋势。(4)地上植被密度与土壤种子密度呈显著正相关关系($r = 0.721$, $P < 0.01$)。土壤种子密度随海拔升高呈现先增大后减小的趋势，变化范围为(47.22 ± 2.78)粒/m^2～(141.67 ± 13.89)粒/m^2，其垂直分布具有递减趋势，表现出明显的表层(0～10 cm)富集特征。**【结论】**亚高山森林土壤种子库与地上植被在物种丰富度和生活型上差异显著，种子密度较低且木本成分匮乏，自然恢复能力有限。建议通过人工构建乡土物种种子库以促进生态修复。本研究为亚高山森林恢复潜力评估与修复策略制定提供了科学依据。

关键词：海拔梯度；土壤种子库；生活型；相似性指数；西藏
中图分类号：S722　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)01−0119−10
引文格式：邓炜展，张艳，王彬，等. 西藏亚高山森林土壤种子库与地上植被群落的海拔梯度分异特征［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：119−128. Deng Weizhan, Zhang Yan, Wang Bin, et al. Altitudinal gradient differentiation characteristics of soil seed bank and aboveground vegetation communities in subalpine forest of Xizang region, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 119−128.

Altitudinal gradient differentiation characteristics of soil seed bank and aboveground vegetation communities in subalpine forest of Xizang region, southwestern China

Deng Weizhan[1]　Zhang Yan[1]　Wang Bin[1]　Yuan Xu[2,3,4]　Peng Li[2,3]　Ji Xiaodong[1]
Zhou Jinxing[1]　Zhang Zhe[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd, Kunming 650204, Yunnan, China;
3. Huaneng Lancang Upstream Hydropower Co., Ltd, Changdu 854300, Xizang, China;
4. Lancang River Clean Energy Security Green Intelligent Construction Technology Innovation Center of Xizang Autonomous Region, Kunming 650214, Yunnan, China)

收稿日期: 2025−06−13　**修回日期:** 2025−12−26
基金项目: 西藏自治区科技计划技术创新引导项目(XZ202501JX0012)，澜沧江流域高寒区高陡边坡植被恢复及灌溉技术研究及示范项目(HY2024/S36)，国家重点研发计划(2021YFB2301602-02)。
第一作者: 邓炜展，博士生。主要研究方向：边坡生态恢复。Email：Dengweizhan@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 张艳，副教授。主要研究方向：水土保持、边坡生态恢复。Email：bltjzhangyan@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] The soil seed bank serves as a reservoir of propagules essential for vegetation community regeneration and succession. This study investigates the distribution patterns of soil seed banks in subalpine forest ecosystems and their relationship with aboveground vegetation to evaluate the ecosystem's capacity for natural vegetation recovery. The findings provide a foundation for community restoration and ecological rehabilitation practices. [**Method**] The study focused on the subalpine forest region in Bayi District, Linzhi City, Xizang of southwestern China, spanning an altitude range of 2 300 to 3 300 m. A systematic sampling approach was employed to conduct aboveground vegetation surveys and soil sampling. The germination method was utilized to determine the species composition, life-form composition, and density distribution characteristics of the soil seed bank. [**Result**] (1) A total of 30 species (representing 15 families and 27 genera) germinated from the soil seed bank. These species were predominantly annual or perennial herbaceous plants, with a relatively homogeneous species composition compared to the aboveground vegetation community. (2) The species richness of both the soil seed bank and aboveground vegetation exhibited an "increase followed by a decrease" trend with increasing elevation. Additionally, the proportion of perennial herbs increased, reflecting their strong adaptability to high-elevation environments. (3) The Margalef richness index, Shannon diversity index, and Simpson diversity index initially increased and then decreased with rising elevation. The Sørensen similarity indices between the soil seed bank and aboveground vegetation at different elevations were low (0.240–0.375) and tended to decline with increasing elevation. (4) Aboveground vegetation density was positively correlated with soil seed bank density (r = 0.721, $P < 0.01$). Soil seed density displayed an "increase followed by a decrease" trend with elevation, ranging from (47.22 ± 2.78) seed/m^2 to (141.67 ± 13.89) seed/m^2. The vertical distribution of soil seed density showed a decreasing trend, with a clear pattern of enrichment in the surface layer (0–10 cm). [**Conclusion**] Significant differences exist between the soil seed bank and aboveground vegetation communities in terms of species richness and life-form composition in the subalpine forest region. Furthermore, the low density of the soil seed bank suggests that natural recovery of the original vegetation communities using the soil seed bank alone is challenging. Therefore, establishing an artificial seed bank of native species is recommended to enhance ecological restoration efforts. This study elucidates the seed bank's response to altitudinal gradients and its coupling relationship with aboveground vegetation in the subalpine forest area, providing theoretical support for assessing the soil seed bank's potential for vegetation restoration and formulating ecological restoration strategies in this region.

Key words: altitude gradient; soil seed bank; life form; similarity index; Xizang

在全球气候变化与人类活动扰动不断加剧的背景下，如何维持受损生态系统的自然更新能力，已成为生态修复领域的核心问题[1]。土壤种子库作为地上植被潜在的"生态种源库"，在植被恢复与群落演替中发挥着关键作用[2−3]。特别是在高扰动生境或环境条件严酷的区域，种子库的"隐性生物多样性"价值愈加凸显，成为衡量生态系统自我修复能力的重要指标[4−6]。然而，高原地区种子库沿海拔梯度的分布特征及其对植被更新的支撑机制尚不明晰，亟需开展系统研究以构建本土化、低干预的精准恢复策略。

种子库对地上植被的支撑效度取决于其种源容量及与地上群落的相互作用。种子库的密度与多样性特征通常受生境条件与地上群落结构的双重制约，反映了种子输入（种子雨）、种子输出（萌发、死亡）及生境过滤机制相互耦合的生态过程。地上植被的物种组成、繁殖策略及物候节律不仅决定了种子进入土壤的方式，也影响了种子库结构的演变方向[7−8]。需要强调的是，种子库并非地上群落的简单复制，而是一种具有时滞性与选择性的生态调控单元，其与地上植被之间的相似性和替代性在不同演替阶段呈现出动态变化，可能驱动"种子库主导"或"地上群落主导"的演替路径转换，这一动态关系在复杂地形环境下表现尤为突出[9]。海拔梯度作为调控局域气候、植被结构与再生机制的关键生态因子，显著影响种子库的分布格局与更新潜力[10]。已有研究尝试从不同纬度探讨海拔变化对土壤种子库生态功能的影响机制[11]。一类观点认为，随海拔升高气温下降，地上植被减少，从而导致种子产出减少、种子库密度降低[12]；另一类研究则发现，在一定海拔范围内种子库密度随海拔升高而增强的现象[13−14]，推测与特定气候带内的植物更新机制与播种策略有关。这些结果揭示出不同生态区中种子库沿海拔梯度的响应规律

存在显著区域差异性，反映了气候、土壤、群落类型等多因子交互作用下的复杂生态调控过程[15−16]。

西藏位于青藏高原西南部，是我国生态环境最为脆弱、自然恢复力较低的区域之一[17]。受限于生态系统稳定性差、对外干扰敏感、外源种子引入适应性差等特性，该区域一旦发生植被退化，往往难以依赖自然演替实现有效恢复[18−20]，需要发掘本土生态系统中的潜在种源资源，为生态修复提供内源性支撑。受海拔、气候空间异质性强等自然背景影响，西藏不同生态系统的种源组成和植被恢复潜力可能存在显著差异。尽管已有研究尝试探讨海拔梯度对种子库结构与功能的影响，但多局限于低海拔、稳定生境，缺乏在典型高原地区连续海拔梯度下，对土壤种子库与地上植被关系的系统研究[21−24]。目前尚不清楚二者在复杂高原环境中如何协同演化，其耦合机制及时空响应规律仍有待深入揭示。因此，本研究聚焦于西藏不同海拔梯度下典型生态系统，开展地上植被调查与种子库萌发试验，深入揭示不同海拔梯度下土壤种子库与地上植被之间的响应关系，解析其在生态系统自组织重建过程中的协同作用机制。本研究不仅可为区域生态修复提供重要种源基础，更有助于构建契合高原环境特征的本土化、低干预生态恢复策略，为西藏典型生态系统的精准恢复提供科学支撑与实践路径。研究目标包括：(1)揭示不同海拔下种子库−地上群落的响应关系；(2)解析二者在生态系统自组织重建中的协同机制；(3)为生态系统精准修复提供科学支撑与实践路径。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

试验区位于西藏自治区林芝市巴宜区鲁朗镇东久曲附近亚高山森林区(29°21′～30°15′N，93°27′～95°17′E)。该区域属高原山地季风气候，年平均气温约为 12 ℃，年降水量为 654 mm。降水主要集中在 5—9 月，占全年总降水量约 90%。夏季凉爽湿润、无高温天气，冬季气温较低、干燥少雨，全年日照充足。雨热同期，植物生长旺盛、种类丰富，植被呈现明显的垂直带谱分布特征[25]。

1.2　样地设置与样品采集

研究区海拔介于 2 300～3 300 m 之间，按 100 m 的海拔间隔设置 11 个海拔梯度，每个海拔梯度设置 2 个样地，共设置 22 个样地。选取植被群落类型丰富、生境代表性强的区域，每个样地内设置 1 个 10 m × 10 m 的乔木样地，在每个乔木样地内设置 4 个 3 m × 3 m 的灌木样方，并于每个灌木样方内设置 2 个 1 m × 1 m 的草本样方。共设置 22 个乔木样地，88 个灌木样方和 176 个草本样方，开展多层次植被调查[26−27]。2023 年 7 月完成样地植被调查，详细记录了各样方内地上植被情况，乔木样地主要调查树木种类、数量、树高等，灌木样方主要调查植被种类、数量、高度、盖度、生活型等，草本样方主要调查植被种类、数量、高度、生活型等[21, 28]，调查点位主要植被情况如表 1 所示。

土壤种子库采样工作于 2024 年 3 月植被返青前开展，此时土壤中部分种子已经历冬季低温胁迫，休眠状态逐渐解除，临近萌发阶段，能够较真实地反映种子库的储量与组成。根据地上植被群落的调查，在每个草本样方中央设立 15 cm × 15 cm 的采样点，分别采集 0～5 cm、5～10 cm、10～15 cm、15～20 cm 4 个土层的土壤样品，共采集 704 份土壤样品，用于后续种子库分析。

1.3　种子库萌发方法

土壤种子库样品中种子的数量与物种组成采用萌发法测定[10, 29]。将土壤样品置于光照充足、通风良好的环境中自然风干 10 d，随后轻轻碾碎土壤团粒，并使用 2 mm 筛网筛分以去除石砾及植物残体，同时人工检查是否含有大粒径种子。将过筛后的土壤样品均匀平铺于底部垫有 2 cm 灭活细河沙的育苗盘中，置于温室内进行萌发试验。试验期间适度浇水以保持土壤湿润，待幼苗发育至形态可辨识阶段后，进行种类鉴定、数量记录与及时移除。整个萌发试验持续 5 个月，每 15 d 翻动一次土壤以促进休眠种子萌发，连续 4 周未观察到新出苗个体时即终止试验。

1.4　物种多样性、相似性及密度计算

根据植被调查与萌发试验结果，计算不同海拔地上植被群落及土壤种子库的多样性指数、相似性及密度。物种多样性指数包括 Shannon 多样性指数(H)[3]、Simpson 多样性指数(D)[28, 30−31]、Pielou 均匀度指数(E)[13]、Margalef 丰富度指数(R)[21]，并采用 Sørensen 相似性系数[12]表示地上植被群落与土壤种子库物种组成的相似性。密度以单位面积(1 m^2)内的植被(或种子)数量表示。在物种多样性指数方面，分别计算样地内灌木(3 m × 3 m)、草本(1 m × 1 m)和土壤种子库(15 cm × 15 cm)多样性指数的平均值[3, 21]，其中地上部分的物种多样性采用面积加权平均法，地下部分直接采用土壤种子库多样性指数的平均值。

1.5　数据统计与分析

野外植被调查与种子库室内试验所得数据使用 Excel 2010 与 SPSS 21.0 软件进行处理与统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行显著性

表 1 样地概况及主要物种

Tab. 1 General information and main species of sample plots

样地编号	经纬度	海拔/m	主要物种
1	94°54′00″E 30°00′12″N	2 352	糙皮桦(*Betula utilis*)、小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)等
2	94°52′49″E 29°59′42″N	2 323	川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)、圆锥山蚂蝗(*Sunhangia elegans*)、李叶绣线菊(*Spiraea prunifolia*)、飞蓬(*Erigeron acris*)、毛蕊花(*Verbascum thapsus*)等
3	94°52′37″E 30°00′16″N	2 467	川滇高山栎、高丛珍珠梅(*Sorbaria arborea*)、酢浆草、车前(*Plantago asiatica*)、毛蕊花、四川堇菜(*Viola szetschwanensis*)、地毯草(*Axonopus compressus*)等
4	94°52′12″E 29°59′42″N	2 458	川滇高山栎、桃(*Prunus persica*)、黄花木(*Piptanthus concolor*)、红马蹄草(*Hydrocotyle nepalensis*)、早熟禾(*Poa annua*)、飞蓬、毛蕊花、地毯草等
5	94°52′12″E 29°58′59″N	2 576	高山松(*Pinus densata*)、圆锥山蚂蝗、三桠乌药(*Lindera obtusiloba*)、披碱草、腺梗豨莶(*Sigesbeckia pubescens*)等
6	94°52′09″E 29°58′53″N	2 536	云杉(*Picea asperata*)、高山松、小叶栒子、圆锥山蚂蝗、金荞麦(*Fagopyrum dibotrys*)、毛蕊花、聚合草(*Symphytum officinale*)等
7	94°47′08″E 29°56′55″N	2 620	高山松、素方花(*Jasminum officinale*)、圆锥山蚂蝗、琉璃草(*Cynoglossum furcatum*)、薄荷(*Mentha canadensis*)等
8	94°46′48″E 29°59′20″N	2 679	糙皮桦、素方花、圆锥山蚂蝗、金荞麦、黄花蒿(*Artemisia annua*)、腺梗豨莶、聚合草、地毯草等
9	94°47′39″E 29°54′29″N	2 736	山杨(*Populus davidiana*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、三对叶悬钩子(*Rubus trijugus*)、披碱草、早熟禾等
10	94°47′52″E 29°54′37″N	2 705	苦木(*Picrasma quassioides*)、桤木、苣荬菜(*Sonchus wightianus*)、滇苦菜(*Picris divaricata*)、飞蓬等
11	94°47′18″E 29°53′47″N	2 867	山杨、桃、长瓣瑞香(*Daphne longilobatal*)、野茼蒿(*Crassocephalum crepidioides*)、酢浆草、腺梗豨莶等
12	94°47′17″E 29°53′38″N	2 841	山杨、长瓣瑞香、三对叶悬钩子(*Rubus trijugus*)、通泉草(*Mazus pumilus*)、披碱草、聚合草、地毯草等
13	94°46′57″E 29°52′35″N	2 901	山杨、波密小檗(*Berberis gyalaica*)、牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)、车前、巴天酸模(*Rumex patientia*)、艾草(*Artemisia argyi*)、龙牙草(*Agrimonia pilosa*)等
14	94°46′07″E 29°50′57″N	2 924	高山柳(*Salix takasagoalpina*)、川滇冷杉(*Abies forrestii*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)、酢浆草、飞蓬、艾草等
15	94°44′42″E 29°50′11″N	3 066	冷杉(*Abies fabri*)、三花杜鹃(*Rhododendron triflorum*)、红马蹄草、尼泊尔鸢尾(*Iris decora*)、通泉草、龙牙草等
16	94°44′41″E 29°49′56″N	3 013	冷杉、刺黑珠(*Berberis sargentiana*)、三桠乌药、尼泊尔鸢尾、六叶葎(*Galium hoffmeisteri*)等
17	94°44′28″E 29°49′59″N	3 136	冷杉、林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensi*)、三花杜鹃(*Rhododendron triflorum*)、尼泊尔鸢尾、黄花蒿、地毯草、巴天酸模等
18	94°44′13″E 29°49′40″N	3 177	冷杉、裂叶茶藨子(*Ribes laciniatum*)、白心球花报春(*Primula atrodentata*)、三裂碱毛茛(*Halerpestes tricuspis*)、龙牙草等
19	94°44′34″E 29°47′53″N	3 267	林芝云杉、三花杜鹃、披碱草、苜蓿(*Medicago sativa*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、嵩草(*Carex myosuroides*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)等
20	94°44′55″E 29°47′42″N	3 221	林芝云杉、防己叶菝葜(*Smilax menispermoidea*)、苜蓿、尼泊尔鸢尾、披碱草等
21	94°43′29″E 29°45′53″N	3 387	林芝云杉、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)、白心球花报春、圆穗蓼(*Bistorta macrophylla*)等
22	94°43′45″E 29°46′21″N	3 367	林芝云杉、黄花木、黄花蒿、老鹳草、蒲公英等

检验，探讨海拔梯度对地上植被与土壤种子库特征的影响，并运用 Origin 8.5 进行绘图与模型拟合。

2 结果与分析

2.1 种子库与地上植被群落物种组成及生活型关系

不同海拔梯度下，土壤种子库与地上植被群落的物种组成及生活型构成存在差异(图 1)。地上植被群落共记录 131 种植物，隶属 51 科 105 属，其中菊科(Asteraceae)、蔷薇科(Rosaceae)、蓼科(Polygonaceae)和禾本科(Poaceae)植物占据优势地位。土壤种子库仅包含 30 种植物，分属 15 科 27 属，以菊科与禾本科为主，物种丰富度远低于地上植被群落。

物种丰富度与海拔呈单峰关系(图 1a)。在海拔 2 300 ~ 3 300 m 范围内，物种丰富度在 2 700 m 处达到峰值(35 种)，在 3 300 m 处降至最低(18 种)。生活型组成随海拔变化显著(图 1c)：一年生草本占比呈先增后减趋势，峰值出现在 2 700 m(40.0%)，最低值出现在 3 300 m(5.56%)；多年生草本占比随海拔升高持续增加，变化范围为 20.0% ~ 68.18%。乔木、灌木/半灌木的占比无显著海拔差异，藤本与蕨类植物仅见于 2 700 m 以下样地。

土壤种子库的物种丰富度沿海拔梯度呈单峰变化(图 1b)，与地上植被群落的变化趋势一致。其中主要为草本植物种子，包含多年生草本 18 种，一年生草本 12 种。一年生草本种子占比随海拔增加呈先

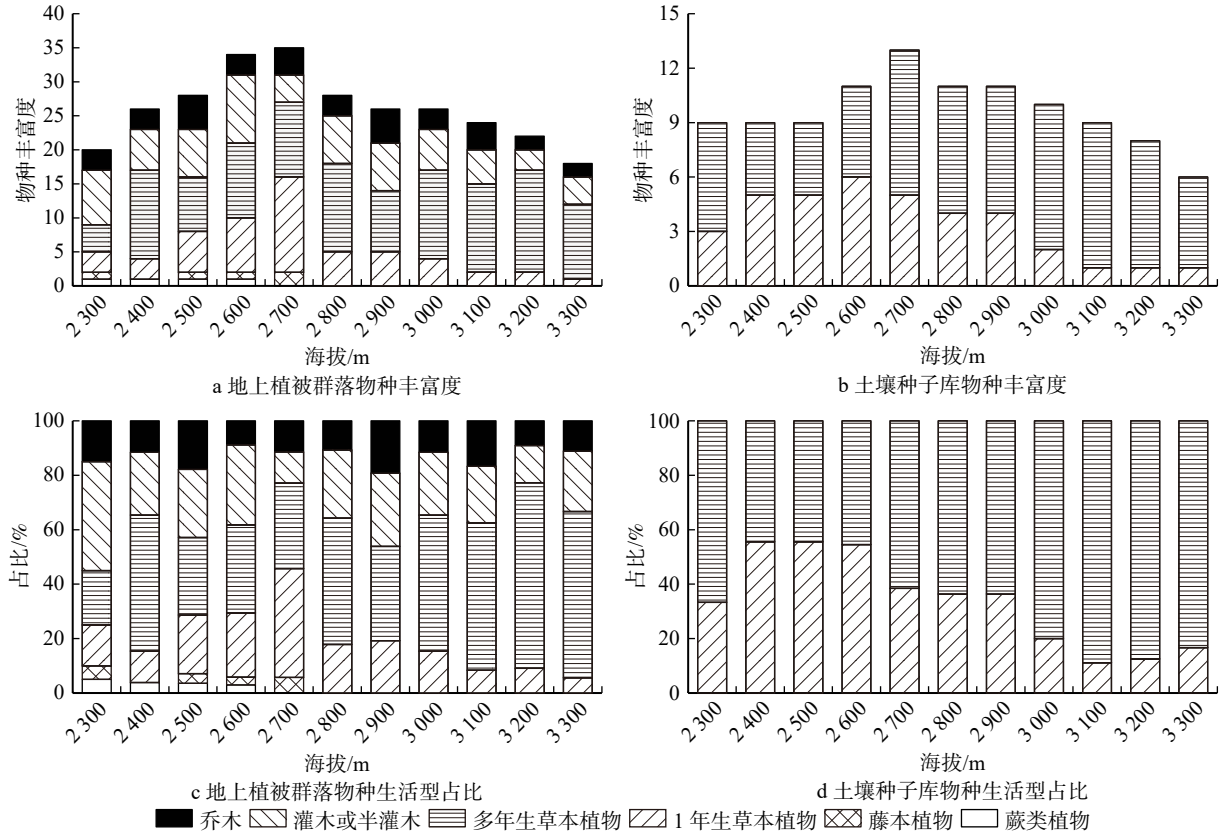


图 1　不同海拔土壤种子库与地上植被物种组成及生活型占比

Fig. 1　Species composition and life form ratios of soil seed bank and aboveground vegetation at varying altitudes

增后减趋势，变化范围为 11.11% ~ 55.56%；多年生草本种子占比则随海拔持续上升，变化范围为 44.44% ~ 88.89%。

2.2　种子库与地上植被群落物种多样性

种子库与地上植被群落的物种多样性指数沿海拔梯度表现出显著的分异特征(图 2)。地上植被的 Margalef 丰富度指数((2.37 ± 0.19) ~ (3.89 ± 0.61))和 Shannon 多样性指数((2.48 ± 0.14) ~ (3.05 ± 0.15))均呈现单峰形海拔分布模式，其峰值出现在海拔 2 700 m 处；种子库的相应指数分别为(1.44 ± 0.08) ~ (2.63 ± 0.08)和(1.27 ± 0.16) ~ (1.90 ± 0.03)，变化趋势与地上植被保持一致。地上植被的 Simpson 多样性指数变化幅度较小((0.90 ± 0.02) ~ (0.95 ± 0.01))，其峰值同样出现在海拔 2 700 m 处；而种子库的 Simpson 多样性指数变化幅度较大((0.64 ± 0.01) ~ (0.87 ± 0.001))，总体呈现先增加后减少的趋势。此外，Pielou 均匀度指数在两者中均未表现出显著的海拔差异，地上植被与种子库的变化范围分别为(0.91 ± 0.01) ~ (0.96 ± 0.01)和(0.71 ± 0.09) ~ (0.94 ± 0.03)。

2.3　种子库与地上植被群落物种的相似性

土壤种子库与地上植被群落的 Sørensen 相似性指数普遍较低(0.240 ~ 0.375)，沿海拔梯度呈现单峰分布，峰值出现在 2 700 m(表 2)。总体而言，种子库中的所有物种均在地表植被群落中有所分布。在相同海拔条件下，两者共有物种为 24 种，包括披碱草、早熟禾、酢浆草、车前、毛蕊花、腺梗豨莶、飞蓬、牛膝菊、聚合草、薄荷、通泉草、蓟(*Cirsium japonicum*)、嵩草、四川堇菜、红马蹄草、老鹳草、牛筋草(*Eleusine indica*)、地毯草、苣荬菜、野茼蒿、苜蓿、巴天酸模、龙牙草、艾草。

2.4　种子库与地上植被群落的密度关系

土壤种子库与地上植被的密度关系如图 3 所示。地上植被密度为 5.92 ~ 17.25 株/m^2，土壤种子库密度为 47.22 ~ 141.67 粒/m^2，两者均随海拔升高呈现单峰格局，峰值均出现在 2 700 m(分别为其他海拔的 1.17 ~ 2.92 倍和 1.13 ~ 3.00 倍)。线性拟合分析表明，土壤种子库密度与地上植被密度呈显著正相关($r = 0.721$，$P < 0.01$)。

不同土层深度的种子库密度分布如图 4 所示。在同一海拔范围内，0 ~ 20 cm 土层种子密度随深度增加而递减：0 ~ 5 cm > 5 ~ 10 cm > 10 ~ 15 cm > 15 ~ 20 cm，各层密度范围分别为 22.22 ~ 72.22 粒/m^2、13.89 ~ 52.78 粒/m^2、0 ~ 22.22 粒/m^2 和 0 ~ 5.56 粒/m^2。随着海拔升高，各土层种子密度也呈现单峰格局。在海拔 2 300 ~ 3 300 m 范围内，样地 0 ~ 10 cm 土层

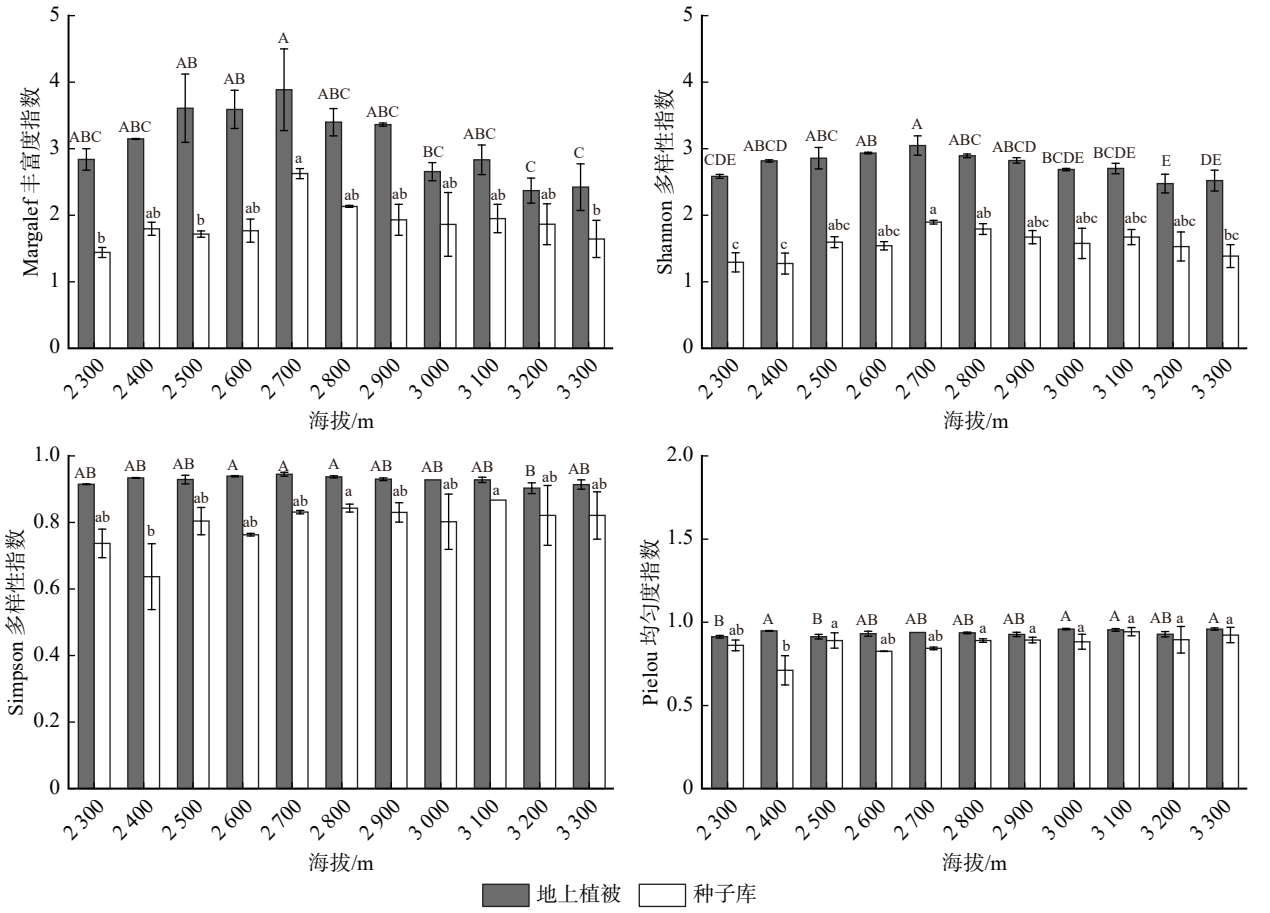


图 2 不同海拔土壤种子库与地上植被物种多样性

Fig. 2 Species diversity of soil seed bank and aboveground vegetation at different altitude

注：不同大写字母表示不同海拔地上植被群落之间物种多样性差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示不同海拔土壤种子库之间物种多样性差异显著（$P < 0.05$）。

表 2 不同海拔土壤种子库与地上植被的相似性

Tab. 2 Similarity between soil seed banks and aboveground vegetation at different altitudes

海拔/m	物种丰富度			Sørensen 相似性指数
	地上植被群落	土壤种子库	共有物种	
2 300	20	9	4	0.276
2 400	26	9	5	0.286
2 500	28	9	5	0.270
2 600	34	11	8	0.356
2 700	35	13	9	0.375
2 800	28	11	6	0.308
2 900	26	11	5	0.270
3 000	26	10	5	0.278
3 100	24	9	4	0.242
3 200	22	8	4	0.267
3 300	18	7	3	0.240

均含有种子。然而，在海拔 2 800 m 以上的 15 cm 以下土层以及 3 300 m 处 10 cm 以下土层均未发现种子。

3 讨 论

3.1 海拔对土壤种子库与地上植被组成的影响机制

海拔是影响土壤种子库结构和植物生长的重要因素之一，与土壤种子库的分布特征具有显著的相关性[32]。本研究中，不同海拔的地上植被群落共调查到植物 131 种，土壤种子库识别植物 30 种。尽管二者在物种丰富度上存在较大差异，但种子库中的所有植物均出现在地上植被群落中，表明地上植被群落是土壤种子库的主要种源[33]。在生活型构成上，土壤种子库以草本植物为主，这一结果与前人研究一致[34−35]。造成这一现象的原因主要包括以下几点。(1)草本植物与木本植物的繁殖策略存在差异。草本植物具有较高的繁殖能力，种子产量大、粒径小、种皮坚硬，易在土壤中存储且寿命较长；而乔木和灌木的种子相对较大，数量较少，多分布于枯落物表层，较难埋入土壤[36−38]。(2)取样时间和方法是导致木本种子量较低的另一重要因素。由于木本植物的种子雨主要集中在秋季，春季取样错过了木本种子库存量的高峰期；此外，木本植物种子的空间分布呈

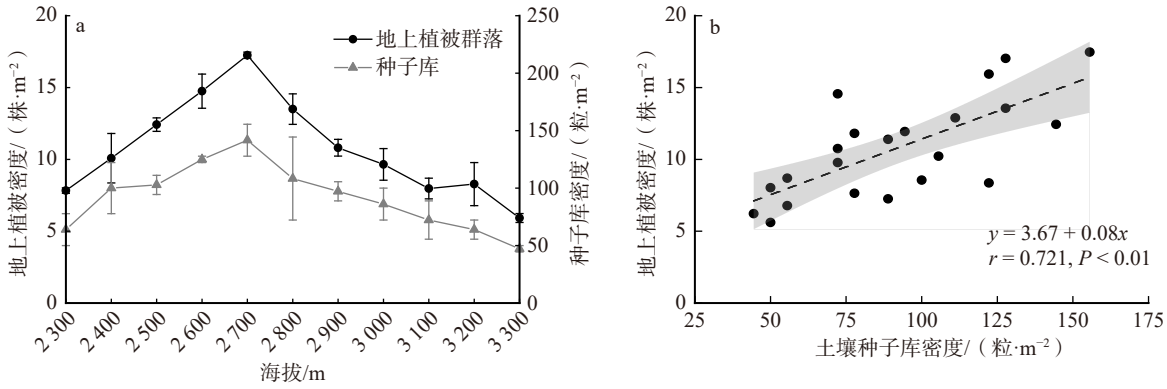


图 3　不同海拔土壤种子库密度与地上植被密度的关系及拟合模型

Fig. 3　Relationship between soil seed bank density and aboveground vegetation density at various altitudes along with the fitted model

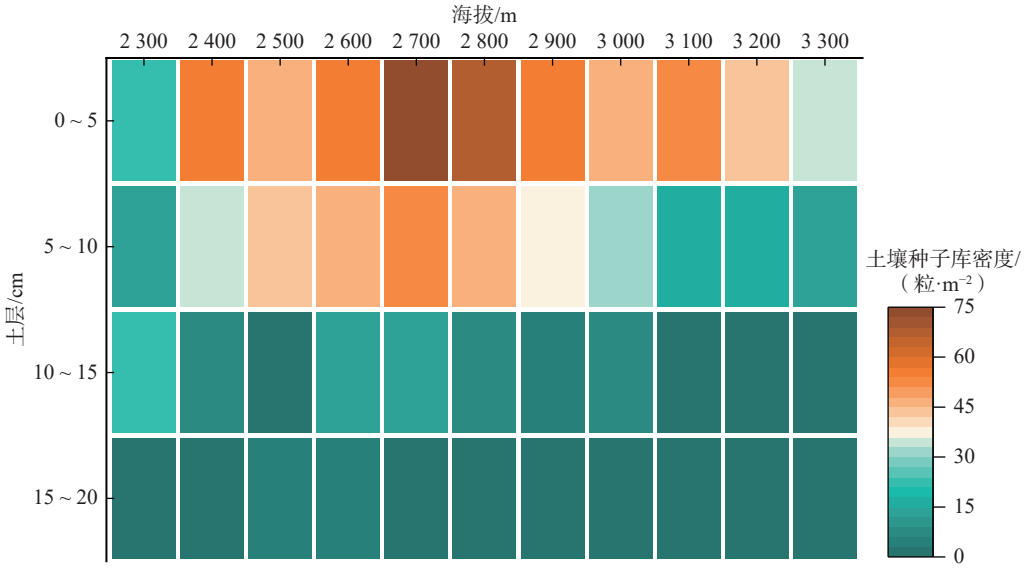


图 4　不同海拔各土层土壤种子库密度

Fig. 4　Soil seed bank density at various soil layers across different altitudes

母株集中型，种子密度随距母树距离增加而锐减，若样方未覆盖母树周围，也可能导致木本种子量偏低[38−39]。(3)试验损耗或萌发失败也可能导致木本种子量较低。木本种子体积较大、种皮较薄，在土壤筛分过程中易被挤压破裂或损失。部分木本植物种子存在休眠机制，若试验过程中未满足其萌发所需条件，可能导致其未能萌发而被遗漏[40]。(4)高海拔环境对木本植物繁殖的限制。随着海拔升高，年均温及积温下降，抑制了木本植物的种子形成和萌发[7, 33]。相比之下，草本植物具有更强的抗逆能力和根系适应性，能够在复杂环境中维持繁殖[12]。在地上植被群落中，随着海拔升高，一年生草本植物的比例逐渐降低，而多年生草本植物的比例显著上升。这可能是由于高海拔地区温度较低，一年生草本植物的存活及繁殖受到阻碍，而多年生草本植物的繁殖策略更能适应海拔变化的影响，因此在植被群落中所占比例呈上升趋势[41−42]。

3.2　多样性指数与相似性变化揭示群落稳定性与恢复力

土壤种子库与地上植被的物种多样性指数及相似性可反映植物群落的稳定性与潜在恢复力[43]。研究结果表明，Shannon 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Simpson 多样性指数在 2 300 ~ 3 300 m 海拔范围内随海拔升高先升高后降低。土壤种子库与地上植被群落的多样性指数随海拔升高并非线性变化，而是存在一个最优海拔区间，在中海拔区域生物多样性相对较高，表明该区域具有较强的群落稳定性和恢复能力，这一现象在土壤种子库中尤为明显[33, 44]。地上植被与土壤种子库之间的 Sørensen 相似性指数整体较低，且随海拔变化呈现“先升高后降低”的趋势，这一结果与刘建立等[45]、黄瑞灵等[46]的研究结果一致。二者相似性偏低的原因是多方面的：地上群落的繁殖策略影响种子进入种子库的概率，乔木和灌木种子粒径大、传播受限，难以形成短暂种子库[37]；

气候变化或人为干扰(如放牧等)导致地上植被更替，而土壤种子库中仍留存已消失植物的种子，导致两者相似性降低[12]；高海拔地区部分植物因低温和生长期短无法完成有性繁殖，仅依赖无性繁殖维持群落，缺乏地表向地下的种子库输入[8, 47]；此外，季节动态变化也是影响种子库的重要因素，部分先锋种在春季萌发后不再保留于种子库中，造成其与地上群落的组成差异[32]。综合以上分析表明，研究区土壤种子库中具备一定的种源，但土壤种子库与地上植被群落的相似度较低，能提供的植物种类较少，对地上植被自然恢复方面提供的种源供给能力较低，难以依靠土壤种子库自然恢复为原始植被群落。

3.3 土壤种子库密度的空间分布规律及其生态恢复启示

土壤种子库密度与地上植被密度之间的关系反映了植物群落的发展趋势，是评估退化生态系统自然恢复能力与制定合理修复策略的关键依据之一[1, 10]。本研究发现，地上植被密度越高，其对应的土壤种子库密度亦相对较高，且二者在海拔 2 300 ~ 3 300 m 范围内均呈现出“先升高后降低”的变化趋势，在 2 600 ~ 2 800 m 的中海拔区域达到峰值。这一空间分布格局与亚高山森林区已有研究结果一致[32, 48]。在低海拔区域，尽管植被种类较为丰富，但群落组成以一年生植物为主，其生命周期短、受气候波动影响大，且高温多雨的气候可能促使种子提早萌发，导致土壤种子库中有效种子储量偏低，保存能力较弱。相比之下，中海拔地区具备更为适宜的水热条件和降水时空分布，促使地上植被生长旺盛，提供了持续而充足的种源输入，对短暂种子库具有更强补给能力。该区域的生态环境相对稳定，为持久种子库的形成与积累提供了理想条件，进而形成密度较高的土壤种子库储备库[41]。高海拔区域因温度低、降水减少等限制性因子，致使地上植被生长受限，繁殖力下降，种子雨输入量锐减，导致短暂与持久种子库储量的衰减[12, 42−43]。高海拔地区植被群落以多年生草本、灌木或半灌木为主导，其繁殖策略偏向营养繁殖，种子产量较低，进一步制约了土壤种子密度的累积[20, 44]。本研究进一步通过拟合分析验证，土壤种子库密度与地上植被密度之间呈显著正相关关系($P < 0.01$)。地表植被密度的提升说明单位面积内的繁殖个体数量增加，加大了种子散落与积累的概率，增强了瞬时种子库的输入能力。若该区域环境持续稳定，则优势种种子将不断进入持久种子库并长期保存，具体表现为土壤种子密度随地上植被密度增加而增加[40]。

研究还发现，土壤种子库密度主要集中在 0 ~ 10 cm 浅层土壤中，随着土层深度的增加，土壤中的种子密度逐渐下降；且各土层的种子密度随着海拔升高而降低。种子在土壤中的垂直分布主要受“输入路径”和“保存条件”的双重限制，浅层土壤不仅是种子沉积的主要区域，也是种子存活与萌发的核心环境。相较之下，深层土壤因通气性差、温度较低等不利条件，对种子进入与保存构成天然屏障[2, 15, 34]。此外，随着海拔升高，地上植被的密度与种子产量下降，种源输入受限，进一步加剧了土壤种子库在垂直分布上的整体退化。综上所述，尽管研究区土壤中具备一定数量的存活种子，为生态系统的恢复提供了基础种源，但总体密度较低、物种组成较为单一，其自然恢复为原始植被群落的能力有限。在未来的生态修复过程中，应结合土壤种子库的实际储备状况，科学引导适生植物的引种与配置，辅助建立多样性更高、结构更稳定的植被群落，以提升区域生态系统的自我恢复能力与长期稳定性。

4 结　　论

本研究阐明了亚高山冷湿森林区不同海拔梯度下土壤种子库与地上植被的组成特征及其相互关系。地上植被物种丰富度和生活型均高于土壤种子库，且土壤种子库以草本植物种子为主，物种组成较为单一。随着海拔升高，地上植被和土壤种子库的物种总数及多样性指数(Margalef 丰富度、Shannon 多样性、Simpson 多样性)均表现出“先升后降”的趋势，多年生草本显示出较强的高海拔适应性。Sørensen 相似性指数总体较低(0.240 ~ 0.375)，表明土壤种子库在一定程度上可以反映地上植被群落的物种变化情况，但其物种丰富度与生活型仍与地上植被群落存在较大差异。

土壤种子密度变化范围为 47.22 ~ 141.67 粒/m^2，地上植被密度变化范围为 5.92 ~ 17.25 株/m^2，两者密度间存在显著正相关关系($r = 0.721$，$P < 0.01$)。土壤种子密度呈现明显的表层(0 ~ 10 cm)富集特征，随土层深度递减。整体上，该区域土壤种子库的种子密度偏低，仅靠自然土壤种子库难以实现原有植被群落的有效恢复。在生态修复过程中，应根据不同海拔带的地上群落特征与土壤种子库状况，科学选择适宜的乡土物种，构建人工种子库，以提升亚高山森林区生态系统的恢复效率与稳定性。

参 考 文 献

[1] Yang X, Baskin C C, Baskin J M, et al. Global patterns of potential future plant diversity hidden in soil seed banks [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 7023.

[2] de Medeiros-Sarmento P S, Ferreira L V, Gastauer M. Natural regeneration triggers compositional and functional shifts in soil

seed banks [J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 141934.

[3] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征及其土壤理化性质 [J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6282−6292.
Li G Q, Shao W S, Zhao P P, et al. Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in a desert steppe region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6282−6292.

[4] Valkó O, Tóthmérész B, Kelemen A, et al. Environmental factors driving seed bank diversity in alkali grasslands[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 182: 80−87.

[5] Schmidt K T, Maltz M, Ta P, et al. Identifying mechanisms for successful ecological restoration with salvaged topsoil in coastal sage scrub communities [J]. Diversity, 2020, 12(4): 150.

[6] Romig K B, James D K, Maxwell C J, et al. Hidden biodiversity: dryland soil seed banks across ecological sites and states [J]. Journal of Arid Environments, 2025, 227: 105307.

[7] 孙瑜硕, 常选选, 张雪, 等. 腾格里沙漠东南缘不同植被类型土壤种子库多样性 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2356−2362.
Sun Y S, Chang X X, Zhang X, et al. Diversity of soil seed banks under different vegetation types in the southeastern margin of the Tengger Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2356−2362.

[8] An H, Zhao Y, Ma M. Precipitation controls seed bank size and its role in alpine meadow community regeneration with increasing altitude [J]. Global Change Biology, 2020, 26(10): 5767−5777.

[9] Mejstřík M, Svátek M, Pollastrini M, et al. Differential roles of seed and sprout regeneration in forest diversity and productivity after disturbance [J]. Forest Ecosystems, 2024, 11: 100198.

[10] Naud L, Måsviken J, Freire S, et al. Altitude effects on spatial components of vascular plant diversity in a subarctic mountain tundra [J]. Ecology and Evolution, 2019, 9(8): 4783−4795.

[11] 王梦丽, 余海波, 高禾苗, 等. 水位变化对沮漳河河漫滩湿地土壤种子库的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1044−1054.
Wang M L, Yu H B, Gao H M, et al. Effects of water level on soil seed bank in the floodplain wetland of Juzhang River, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1044−1054.

[12] 谭向前, 陈芳清, 王稷, 等. 川西山区自然边坡土壤种子库随海拔梯度的变化 [J]. 山地学报, 2019, 37(4): 508−517.
Tan X Q, Chen F Q, Wang J, et al. Variations of soil seed bank of natural slopes in the western Sichuan mountainous region along altitude gradient [J]. Mountain Research, 2019, 37(4): 508−517.

[13] 热依汉古丽·夏迪, 杨蕾, 如马南木·尼合买提, 等. 西天山野果林准噶尔山楂土壤种子库海拔梯度分布格局 [J]. 植物科学学报, 2023, 41(2): 172−182.
Reyihanguli · Xiadi, Yang L, Rumananmu · Nihemaiti, et al. Distribution patterns of the soil seed bank of Crataegus songarica K. Koch with altitude in the western Tianshan wild fruit forest [J]. Plant Science Journal, 2023, 41(2): 172−182.

[14] Funes G, Basconcelo S, Díaz S, et al. Seed bank dynamics in tall-tussock grasslands along an altitudinal gradient [J]. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(2): 253−258.

[15] 张洺也, 齐清, 佟守正, 等. 不同水文条件下莫莫格臺草草丘湿地土壤种子库特征及其与土壤环境的关系 [J]. 湿地科学, 2023, 21(2): 239−247.
Zhang M Y, Qi Q, Tong S Z, et al. Characteristics of soil seed banks and their relationships with soil factors in tussock wetland of the Momoge National Nature Reserve under different hydrological conditions [J]. Wetland Science, 2023, 21(2): 239−247.

[16] Tessema Z K, de Boer W F, Prins H H T. Changes in grass plant populations and temporal soil seed bank dynamics in a semi-arid African savanna: implications for restoration [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182: 166−175.

[17] Chen M, Shi Z, Liu S, et al. Leaf functional traits have more contributions than climate to the variations of leaf stable carbon isotope of different plant functional types on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2023, 871: 162036.

[18] 张雷, 孙鹏森, 刘世荣. 川西亚高山森林不同恢复阶段生长季蒸腾特征 [J]. 林业科学, 2020, 56(1): 1−9.
Zhang L, Sun P S, Liu S R. Growing-season transpiration of typical forests in different succession stages in subalpine region of western Sichuan, China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(1): 1−9.

[19] 张光茹, 李文清, 张法伟, 等. 退化高寒草甸关键生态属性对多途径恢复措施的响应特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6293−6303.
Zhang G R, Li W Q, Zhang F W, et al. Responses of key ecological attributes to multi-path restoration measures of degraded alpine meadows [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6293−6303.

[20] He H, Li H, Zhu J, et al. The asymptotic response of soil water holding capacity along restoration duration of artificial grasslands from degraded alpine meadows in the Three River Sources, Qinghai–Tibetan Plateau, China [J]. Ecological Research, 2018, 33(5): 1001−1010.

[21] 王雅芳, 李国旗, 石云, 等. 贺兰山低山区土壤种子库与地上植被关系分析 [J]. 草地学报, 2023, 31(1): 166−172.
Wang Y F, Li G Q, Shi Y, et al. Analysis of relationship between soil seed bank and aboveground vegetation in low mountain area of Helan Mountain [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 166−172.

[22] 李国旗, 谢博勋, 解盛, 等. 基于文献计量学的土壤种子库研究进展分析 [J]. 土壤, 2022, 54(1): 103−113.
Li G Q, Xie B X, Xie S, et al. Research progress of soil seed bank based on bibliometric analysis [J]. Soils, 2022, 54(1): 103−113.

[23] de Malach N, Kigel J, Sternberg M. Contrasting dynamics of seed banks and standing vegetation of annuals and perennials along a rainfall gradient [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2023, 58: 125718.

[24] Chu H, Zhang C, Dong Q, et al. The effect of grazing intensity and season on the soil seed bank and its relation with above-ground vegetation on the alpine steppe[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 285: 106622.

[25] 吕振豫, 王鹏翔, 董义阳, 等. 雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空演变特征分析与归因识别 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 105−113,404.
Lü Z Y, Wang P X, Dong Y Y, et al. Spatiotemporal evolution analysis and attribute identification of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 105−113,404.

[26] 欧阳群文, 郭小平, 郝嘉航, 等. 基于种子库视角的北京市高速

路边坡喷播植被演替特征研究 [J]. 生态环境学报, 2025, 34(6): 941−949.
Ouyang Q W, Guo X P, Hao J H, et al. Vegetation succession characteristics of highway slope spraying in Beijing: a perspective from the soil seed bank [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(6): 941−949.

[27] 吴科君, 贺丽, 李红霖, 等. 川西北高寒区不同程度沙化草地土壤种子库特征 [J]. 草地学报, 2025, 33(6): 1817−1825.
Wu K J, He L, Li H L, et al. Characteristics of soil seed banks in different degrees of desertified grasslands in the alpine region of northwest Sichuan [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1817−1825.

[28] 韩梦洁, 刘超, 梁鸿飞, 等. 不同海拔高度对温性山地草原土壤种子库特征的影响 [J]. 草地学报, 2025, 33(9): 2755−2764.
Han M J, Liu C, Liang H F, et al. The impact of different altitude on soil seed banks in temperate mountainous grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(9): 2755−2764.

[29] de Malach N, Kigel J, Sternberg M. The soil seed bank can buffer long-term compositional changes in annual plant communities [J]. Journal of Ecology, 2021, 109(3): 1275−1283.

[30] 薛雅文, 赵丁洁, 孙明琦, 等. 北京市城市公园绿地土壤种子库特征及其更新潜力 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 1−15.
Xue Y W, Zhao D J, Sun M Q, et al. Characteristics and regeneration potential of soil seed banks in green space of urban parks in Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 1−15.

[31] 石成华, 李奇, 罗清虎, 等. 福建南平市洪涝灾害致损森林土壤种子库与地上植被及土壤性质的关系 [J]. 山地学报, 2024, 42(5): 648−661.
Shi C H, Li Q, Luo Q H, et al. Relationship between damaged soil seed bank and aboveground vegetation and soil properties in post-flooding forests in Nanping City, Fujian Province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(5): 648−661.

[32] Birhanu L, Bekele T, Tesfaw B, et al. Soil seed bank composition and aboveground vegetation in dry Afromontane forest patches of Northwestern Ethiopia [J]. Trees, Forests and People, 2022, 9: 100292.

[33] Yuan L Y, Liu G H, Li W, et al. Seed bank variation along a water depth gradient in a subtropical lakeshore marsh, Longgan Lake, China [J]. Plant Ecology, 2007, 189(1): 127−137.

[34] 张起鹏, 王建, 赵成章, 等. 高寒干旱草原披针叶黄华植物群落土壤种子库与地上植被的关系 [J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4619−4626.
Zhang Q P, Wang J, Zhao C Z, et al. Relationships between the soil seed bank and above-ground vegetation of a *Thermopsis lanceolata* community in degraded alpine arid grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4619−4626.

[35] 石文杰, 马琴, 杨君珑, 等. 贺兰山东麓不同海拔斑子麻黄群落土壤种子库特征及其影响因子 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(5): 1361−1370.
Shi W J, Ma Q, Yang J L, et al. Characteristics of soil seed banks and their influencing factors in *Ephedra rhytidosperma* communities at different altitudes on the eastern foothills of Helan Mountain, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(5): 1361−1370.

[36] 杨马进, 黄文娟, 李臻, 等. 14 种川西北高山野生功能性草本花卉植物种子萌发特性 [J]. 亚热带植物科学, 2023, 52(3): 228−241.
Yang M J, Huang W J, Li Z, et al. Seed germination of 14 wild functional ornamental herbaceous species from the northwest Sichuan [J]. Subtropical Plant Science, 2023, 52(3): 228−241.

[37] Mašková T, Poschlod P. Soil seed bank persistence across time and burial depth in calcareous grassland habitats [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 4(12): 790867.

[38] Benitez-Malvido J. In site soil seed-banks: Size, composition and persistence across tropical successional stages [J]. Plants, 2023, 12(15): 2760.

[39] Dylewski Ł, Ortega Y K, Bogdziewicz M, et al. Seed size predicts global effects of small mammal seed predation on plant recruitment [J]. Ecology Letters, 2020, 23(6): 1024−1033.

[40] Lamont B B. Seed biologists beware: estimates of initial viability based on ungerminated seeds at the end of an experiment may be error-prone [J]. Plant Biology, 2022, 24(3): 399−403.

[41] Yang J, Luo W, Zhao W, et al. Soil seed bank is affected by transferred soil thickness and properties in the reclaimed coal mine in the Qilian Mountains, China [J]. Journal of Arid Land, 2023, 15(12): 1529−1543.

[42] 李国旗, 王雅芳, 刘星, 等. 贺兰山低山区土壤种子库空间分布特征 [J]. 西北植物学报, 2022, 42(2): 301−311.
Li G Q, Wang Y F, Liu X, et al. Spatial distribution characteristics of soil seed bank in the low mountainous area of Helan Mountain [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(2): 301−311.

[43] Xin C, Wang J, Yang J, et al. Seasonal dynamics in forest soil seed banks along an elevational gradient in the rocky mountainous area of North China [J]. Forests, 2021, 12(10): 1318.

[44] Ma M, Collins S L, Du G. Direct and indirect effects of temperature and precipitation on alpine seed banks in the Tibetan Plateau [J]. Ecological Applications, 2020, 30(5): e02096.

[45] 刘建立, 袁玉欣, 彭伟秀, 等. 坝上地区孤石牧场土壤种子库与地上植被的关系 [J]. 草业科学, 2005, 22(12): 57−62.
Liu J L, Yuan Y X, Peng W X, et al. Relationship between seed bank and vegetation in Bashang region [J]. Pratacultural Science, 2005, 22(12): 57−62.

[46] 黄瑞灵, 周华坤, 刘泽华, 等. 坡向与海拔对青海省拉鸡山不同植被土壤种子库的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2679−2686.
Huang R L, Zhou H K, Liu Z H, et al. Effects of slope aspect and altitude on the soil seed bank under different vegetations in Laji Mountains of Qinghai Province, Northwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(10): 2679−2686.

[47] Huang M, Sang C, Zhao J, et al. Grazing exclusion altered the pattern of the soil seed bank but not the aboveground vegetation along an altitudinal gradient in alpine grassland [J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(18): 3901−3913.

[48] Bekele M, Demissew S, Bekele T, et al. Soil seed bank distribution and restoration potential in the vegetation of Buska Mountain Range, Hamar District, southwestern Ethiopia [J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11244.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）