



洮河上游紫果云杉群落土壤种子库特征及其与地上植被的关系

李 波^{1,2}, 赵 阳^{1,2}, 刘 婷^{1,2}, 陈学龙^{1,2}, 高本强^{1,2}, 曹秀文^{1,2*}

(1 甘肃省白龙江林业科学研究所, 兰州 730070; 2 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃舟曲 746300)

摘 要: 该研究以甘肃洮河国家级自然保护区大峪沟林区 (TH)、冶力关林区 (YLG)、尕海-则岔国家级自然保护区则岔林区 (GZ) 的紫果云杉 (*Picea purpurea*) 天然林群落为研究对象, 通过样地调查与萌发实验, 分析洮河上游紫果云杉群落土壤种子库特征, 以揭示洮河上游紫果云杉群落土壤种子库特征及与地上植被的关系, 为紫果云杉群落恢复和管理提供依据。结果表明: (1) 3 个林区土壤种子库共萌发 27 科 45 属 50 种植物, 种子库密度在 958~1 129 粒/m² 之间, 草本植物是构成研究区土壤种子库的主体。(2) 3 个林区紫果云杉群落土壤种子库垂直结构明显, 物种数及种子密度随土层的加深呈减少趋势。(3) 3 个林区地上植被物种数大于土壤种子库物种数, 相似性系数在 0.15~0.23 之间, 表现为极不相似性; 土壤种子库的多样性指数除 Pielou 指数高于地上植被外, Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数均低于地上植被。研究认为, 洮河上游紫果云杉群落土壤种子库以草本植物为主, 乔木和灌木的储量较小, 特别是建群种紫果云杉的储量较小; 地上植被和土壤种子库之间相互的贡献力较低, 仅依靠紫果云杉林土壤种子库进行自然恢复, 远不能缓解现阶段紫果云杉林退化的问题, 因此需开展人工育苗、造林等措施来促进紫果云杉的更新与发展。

关键词: 洮河上游; 紫果云杉; 土壤种子库; 地上植被

中图分类号: Q948.15⁺4 **文献标志码:** A

Characteristics of Soil Seed Bank and Their Relationship with Aboveground Vegetation of *Picea purpurea* Community in Upstream of Taohe River

LI Bo^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2}, LIU Ting^{1,2}, CHEN Xuelong^{1,2}, GAO Benqiang^{1,2}, CAO Xiuwen^{1,2*}

(1 Institute of Forestry Science of Bailongjiang in Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 2 Gansu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu, Gansu 746300, China)

Abstract: This study understand the characteristics of soil seed bank in natural forest community dominated by *Picea purpurea* in Taohe National Nature Reserve Dayu forest regions (TH), Yeligan forest regions (YLG) and Gahai-Zecha National Nature Reserve Zecha forest regions (GZ), Gansu Province, which revealed the characteristics of soil seed bank and its relationship with aboveground vegetation in *P. purpurea* community of Taohe River upstream. It provided basis for recovery and management of community of *P. purpurea*. The results showed that: (1) there were 50 species of soil seed bank in the 3 forest regions, which belonged to 45 genera and 27 families, the density of soil seed bank ranged from 958 to 1 129 ind/m², herbaceous plants composed the majority of the soil seed bank. (2) It was obvious of the vertical

收稿日期: 2021-11-11; 修改稿收到日期: 2022-02-09

基金项目: 甘肃省林业科技创新与国际合作项目 (KJCX202001, KJCX201909)

作者简介: 李 波 (1988—), 男, 工程师, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 314541046@qq.com

* 通信作者: 曹秀文, 正高级工程师, 主要从事森林保护研究。E-mail: gscaoxw@126.com

structure of soil seed banks, presenting species and density decreased with the increase of soil depth. (3) It showed that species of aboveground vegetation were more than soil seed bank, similarity coefficient between 0.15 and 0.23, which had extreme dissimilarity; Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, Simpson dominance index of soil seed bank were lower than that of aboveground vegetation, but Pielou evenness index was higher. All in all, this study indicated that the soil seed bank in *P. purpurea* community of Taohe River upstream consisted largely of herbaceous plant. Thus, arbors and shrubs had smaller reserves, especially *P. purpurea* that was the constructive species. The contribution was lower between aboveground vegetation and soil seed bank, this implied that it was far from being able to alleviate the degradation of *P. purpurea* forest only by natural restoration of soil seed bank. Therefore, artificial seedling and afforestation measures will be needed to promote the regeneration and development of *P. purpurea* forest.

Key words: Taohe River upstream; *Picea purpurea*; soil seed bank; aboveground vegetation

土壤种子库(soil seed bank)是指存在于土壤上层凋落物和土壤中具有活力的全部种子的集合^[1],是植物种群生活史的潜在阶段^[2]。土壤种子库为种群甚至群落的更新、演替及退化生态系统的恢复提供繁殖体^[3],是物种定居、生存、繁衍、发展及扩散的物质基础^[4, 5],同时在维持种群和群落生态多样性及遗传多样性方面具有重要意义,是研究种群生态学及恢复生态学的重要内容^[6]。目前,中国已对巨柏(*Cupressus gigantea*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、高山松(*Pinus densata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等森林的土壤种子库进行了大量研究^[7-12],而以上的研究大多集中于对群落内建群种的种子库特征进行分析,而对群落内全部物种的种子库研究的较少。事实上,土壤种子库是群落内所有物种种子的储存库,当群落受外力破坏后,土壤种子库中的活力种子在适宜条件下萌发生长,竞争演替为新的群落,土壤种子库中所有种子均参与了新群落的演替过程。因此研究群落内全部物种的种子库特征对植物群落的天然更新、退化生态系统的恢复、植物群落的演替等具有重要的意义。

洮河是黄河上游最大的一级支流,区内森林生态系统对涵养黄河源头水源、维持黄河上游生态平衡、遏制生态退化等方面具有重要的屏障作用^[13]。洮河林区森林生态系统每年的总生态服务价值为217亿元,为促进当地社会经济发展以及环境保护发挥着重要作用^[14]。因此,加强对该区森林生态系统的研究,对保护当地森林资源、维持黄河水量、维系黄河生态安全具有十分重大的意义。

紫果云杉(*Picea purpurea*)是中国特有树种,喜阴湿、耐寒。源于丽江云杉(*P. likiangensis*)和青扦(*P. wilsonii*)的自然同倍体杂交,占据了青藏

高原东北部高海拔的极端生境^[15],是黄河上游地区主要的建群树种,在涵养水源、防止水土流失、保育生物多样性方面发挥着无可替代的作用^[16]。早期大规模的林业生产活动造成原生紫果云杉林的大面积退化,甘肃省现残存种群在大夏河流域、洮河流域等黄河上游区呈碎片分布,种群更新不畅、森林面积扩大有限,严重制约着其生态功能的发挥。为揭示紫果云杉群落植被自然更新能力及恢复潜力,探索紫果云杉群落衰退的原因,以洮河上游紫果云杉群落为研究对象,调查群落土壤种子库特征及与地上植被的关系,以期揭示紫果云杉群落土壤种子库的特征,分析与地上植被的关系,为探索紫果云杉群落自然恢复能力以及制定合理的恢复方式提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于洮河上游,地处青藏高原、黄土高原和甘肃南部山区交汇区域,介于 E102°09′~103°51′, N34°10′~35°09′之间。气候属于青藏高原湿润区和高原大陆性季风过渡区,冬季漫长,夏季温凉。区域内降水丰富,年降水量 634~680 mm,日照强烈,年日照时长 2 277~2 365 h,常年气温较低,年平均气温 2.3~5.8℃。区内山势陡峭,海拔 1 000~4 300 m。土壤为暗黑色草甸土、沼泽土、泥炭土和棕、褐色森林土。森林植被以云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、油松、落叶松(*Larix gmelinii*)等暗针叶林为主,植被垂直地带性明显,阴阳坡差异大,具有较丰富的野生动植物资源^[13]。

1.2 样地设置与调查

选择洮河上游紫果云杉分布相对集中的甘肃洮河国家级自然保护区大峪沟林区(TH)、冶力关国家森林公园林区(YLG)、尕海-则岔国家级自然保护

区则岔林区(GZ)为研究区。2020年5月,对研究区全面勘察后,采用典型抽样法,按照海拔高度在每个区域设置3块20 m×30 m的标准地,记录标准地的基本信息(表1)。对标准地内的乔木进行每木检尺,记录树种、胸径、高度、郁闭度、冠幅等信息;在每个标准地的一条对角线的起点和终点处设置2个10 m×10 m的灌木样方,记录灌木的植物名称、高度、多度、盖度信息;采取五点法设置5个1 m×1 m草本样方,记录草本的植物名称、高度、多度、盖度信息;采用样线法,沿标准地的长边,每隔10 m设置一条样线,每条样线每隔5 m设置一个种子库取样点,为使样点的种子库能够代表标准地的种子库特征,与标准地重合的边不取样(图1)。用直径7 cm的土钻分枯落物层、0~2 cm、2~5 cm、5~10 cm层对土壤种子库进行取样,每个样点取样3次,分层混合后标记装入自封袋内,带回实验室阴干备用。共采集土壤种子库样品216份[3(林区)×3(海拔)×6(样品)×4(层)]。

1.3 实验室萌发

采用种子萌发法确定土壤种子库的物种组成及

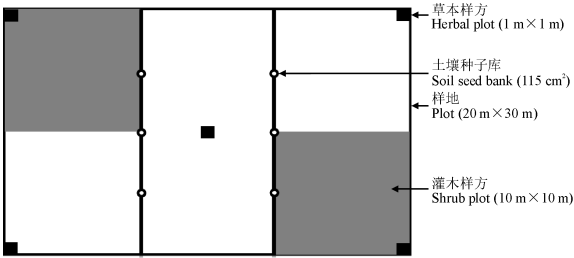


图1 样方及土壤种子库布设示意图

密度。将野外采集的216份样品分别通过5 mm的土壤筛,除去大的石块、枯落物及根系,然后将每份土样压碎后置于底部铺有2 cm无种子粗砂的花盆中(直径30 cm,高15 cm),将粗砂置于恒温160℃烘箱内烘4 h后得到无种子粗砂。另外用10个无种子粗砂的花盆作为对照来检测粗砂中是否有未消除的种子。发芽实验开始于2020年6月初,将花盆置于甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站的温室内。每天喷水保持花盆内的土壤湿润。定期观测种子萌发情况,对已萌发可鉴定的幼苗计数后清除,暂时不能鉴定的幼苗标记后移栽至空花盆内,直至幼苗长到能鉴定为止。连续2周内无种子萌发时翻动土壤,继续观察,直至花盆内连续1月无种子萌发后结束萌发实验。实验结束后在对照花盆中无种子萌发,证明粗砂中不含种子。

1.4 数据计算

根据花盆中统计到的物种数来计算土壤种子库中物种密度、多样性指数、相似性系数^[17]。

1.4.1 土壤种子库密度: 单位面积土壤中所萌发的种子数量(粒/m²)。

1.4.2 地上植被、土壤种子库多样性指数计算公式:

Margalef 丰富度指数(R): $R = \frac{S - 1}{\ln N}$ (1)

Shannon-Wiener 多样性指数(H): $H = -\sum_{i=1}^s P_i^2 \ln P_i$ (2)

Simpson 优势度指数(D): $D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$ (3)

Pielou 均匀度指数(E): $J = H / \ln S$ (4)

表1 标准地基本信息

Table 1 Basic information of the standard plots

样地 Plots	编号 Number	海拔 Altitude /m	坡度 Slope/°	建群种 Constructive species				枯落层 厚度 Litter depth /cm
				树种 Tree	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	郁闭度 Closure	
洮河大峪沟 林区(TH)	1	2 835	5	紫果云杉 <i>P. purpurea</i>	20.5	11.2	0.5	3.8
	2	2 955	30	紫果云杉 <i>P. purpurea</i>	15.8	12.1	0.6	4.2
	3	3 028	31	紫果云杉、冷杉 <i>P. purpurea</i> , <i>Abies fabri</i>	16.5	12.8	0.7	3.6
冶力关林区 (YLG)	4	2 750	18	紫果云杉、云杉 <i>P. purpurea</i> , <i>P. asperata</i>	17.5	11.6	0.5	3.2
	5	2 886	20	紫果云杉 <i>P. purpurea</i>	21.8	15.2	0.4	4.4
	6	3 041	36	紫果云杉 <i>P. purpurea</i>	25.2	18.5	0.6	3.7
尕海-则岔 林区(GZ)	7	2 846	40.5	紫果云杉 <i>P. purpurea</i>	13.6	9.5	0.6	3.3
	8	3 293	34.5	紫果云杉 <i>P. purpurea</i>	15	11.9	0.7	3.7
	9	3 412	19	紫果云杉、冷杉 <i>P. purpurea</i> , <i>Abies fabri</i>	9.7	6.1	0.6	3.5

式中, S 和 N 分别为各林区地上、土壤种子库中的所有物种丰富度和密度, P_i 为种 i 的密度占全部种密度总和的百分比。

1.4.3 土壤种子库与地上植被相似性 根据 Jaccard 相似性原理计算土壤种子库与地上植被相似性

相似性系数: $S_c = \frac{c}{a + b - c}$

(5)

式中: S_c 为相似性系数; a 和 b 分别代表土壤种子库和地上植被的物种丰富度, c 代表地上植被和土壤种子库共有物种数。当 $0 < S_c \leq 0.25$ 时, 为极不相似; $0.25 < S_c \leq 0.5$ 时, 为中等不相似; $0.5 < S_c \leq 0.75$ 时, 为中等相似; $0.75 < S_c \leq 1$ 时, 为极相似^[18]。

1.5 数据处理与分析

本研究使用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)、多重比较 (LSD) 对数据进行统计分析, 用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库基本特征

2.1.1 物种组成及密度 洮河上游不同林区紫果云杉群落土壤种子库物种组成见表 2。土壤种子库样品中共萌发幼苗 534 株, 隶属于 27 科 45 属 50 种。其中, TH (洮河大峪沟林区) 土壤种子库萌发植物 34 种, 属于 22 科 32 属; YLG (冶力关林区) 土壤种子库萌发植物 33 种, 属于 20 科 30 属; GZ (尕海-则岔林区) 土壤种子库萌发植物 35 种, 属于 22 科 35 属。3 个林区土壤种子库的共有种有 11 种, 分别为: 紫果云杉、红脉忍冬 (*Lonicera nervosa*)、蛛

毛蟹甲草 (*Parasenecio roborowskii*)、大花金挖耳 (*Carpesium macrocephalum*)、大丁草 (*Gerbera anandria*)、三脉紫菀 (*Aster ageratoides*)、林猪殃殃 (*Galium paradoxum*)、双花堇菜 (*Viola biflora*)、早熟禾 (*Poa annua*)、鹿蹄草 (*Pyrola calliantha*) 和凹头苋 (*Amaranthus blitum*)。菊科 (Asteraceae) 植物在 3 个林区 (顺序为 TH、YLG、GZ, 下同) 土壤种子库中萌发种类最多, 均为 7 种, 分别占到各林区萌发物种数的 20.59%、21.21%、20.00%, 其次为蔷薇科 (Rosaceae) 植物, 在 3 个林区各萌发 3、4、3 种, 占到 8.82%、12.12%、8.57%。

由表 2 可知, 3 个林区土壤种子库萌发的物种密度各不相同。其中, TH 土壤种子库种子密度为 958 粒/m², 以禾本科 (Poaceae)、菊科植物为主, 分别占到种子密度的 28.39%、24.22%, 而建群种紫果云杉的种子密度仅为 6 粒/m², 占 0.63%; YLG 土壤种子库种子密度为 1 129 粒/m², 以禾本科、菊科植物为主, 分别占到种子密度的 28.17%、23.65%, 建群种紫果云杉的种子密度也为 6 粒/m², 仅占 0.53%; GZ 土壤种子库种子密度为 1 009 粒/m², 以菊科、禾本科植物为主, 分别占到种子密度的 31.02%、22.30%, 建群种紫果云杉在土壤种子库中的种子密度仅为 12 粒/m², 占 1.19%。由此可见, 禾本科、菊科植物构成了土壤种子库的主体。

2.1.2 物种生活型特征 由图 2 可知, TH 种子库萌发乔木 1 种、灌木 5 种、多年生草本 22 种、一年生草本 6 种, 其中草本植物占 82.35%, 木本植物占 17.65%; YLG 种子库萌发乔木 2 种、灌木 5 种、藤本

表 2 紫果云杉群落土壤种子库物种组成及种子密度

Table 2 Species composition and seed density of soil seed bank in *P. purpurea* communities

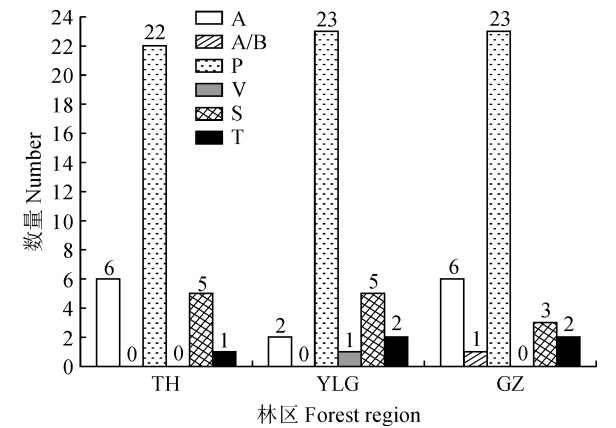
科 Family	物种名称 Species name	TH		YLG		GZ	
		密度 Density /m ²	组成 Composition /%	密度 Density /m ²	组成 Composition /%	密度 Density /m ²	组成 Composition /%
菊科 Asteraceae	箭叶橐吾 <i>Ligularia sagitta</i>	29	3.03	12	1.06		
	草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>			52	4.61		
	蛛毛蟹甲草 <i>Parasenecio roborowskii</i>	144	15.03	150	13.29	168	16.65
	总状橐吾 <i>Ligularia botrycides</i>			6	0.53		
	大花金挖耳 <i>Carpesium macrocephalum</i>	23	2.40	12	1.06	6	0.59
	大丁草 <i>Gerbera anandria</i>	12	1.25	23	2.04	23	2.28
	甘青蒿 <i>Artemisia tangutica</i>	12	1.25			12	1.19
	三脉紫菀 <i>Aster ageratoides</i>	6	0.63	12	1.06	23	2.28
	黄腺香青 <i>Anaphalis aureopunctata</i>	6	0.63			12	1.19
	烟管头草 <i>Carpesium cernuum</i>					69	6.84

续表2 Continued Table 2							
科 Family	物种名称 Species name	TH		YLG		GZ	
		密度 Density /m ²	组成 Composition /%	密度 Density /m ²	组成 Composition /%	密度 Density /m ²	组成 Composition /%
蔷薇科 Rosaceae	高山绣线菊 <i>Spiraea alpina</i>	6	0.63				
	秀丽莓 <i>Rubus amabilis</i>	6	0.63	35	3.10	17	1.68
	紫色悬钩子 <i>Rubus irritans</i>			17	1.51		
	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>	17	1.77	6	0.53	6	0.59
	路边青 <i>Geum aleppicum</i>			29	2.57	29	2.87
忍冬科 Caprifoliaceae	刚毛忍冬 <i>Lonicera hispida</i>	35	3.65	17	1.51		
	红脉忍冬 <i>Lonicera nervosa</i>	23	2.40	58	5.14	40	3.96
	蓝果忍冬 <i>Lonicera caerulea</i>	17	1.77			6	0.59
	葎子蕪 <i>Triosteum pimatifidum</i>					6	0.59
蓼科 Polygonaceae	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	29	3.03	12	1.06	29	2.87
	支柱蓼 <i>Polygonum suffultum</i>	17	1.77				
	苦荞麦 <i>Fagopyrum tataricum</i>	6	0.63			12	1.19
柳叶菜科 Onagraceae	长籽柳叶菜 <i>Epilobium pyrricholophum</i>			6	0.53	6	0.59
	高山露珠草 <i>Circaea alpina</i>	6	0.63	17	1.51	6	0.59
茜草科 Rubiaceae	林生茜草 <i>Rubia sylvatica</i>			23	2.04		
	林猪殃殃 <i>Galium paradoxum</i>	92	9.60	40	3.54	75	7.43
车前科 Plantaginaceae	四川婆婆纳 <i>Veronica szechuanica</i>	6	0.63	6	0.53		
	车前 <i>Plantago asiatica</i>			6	0.53		
毛茛科 Ranunculaceae	银莲花 <i>Anemone cathayensis</i>	29	3.03	6	0.53		
	长柄唐松草 <i>Thalictrum przewalskii</i>					6	0.59
松科 Pinaceae	紫果云杉 <i>Picea purpurea</i>	6	0.63	6	0.53	12	1.19
	冷杉 <i>Abies fabri</i>					6	0.59
堇菜科 Violaceae	双花堇菜 <i>Viola biflora</i>	29	3.03	75	6.64	46	4.56
禾本科 Poaceae	早熟禾 <i>Poa annua</i>	272	28.39	318	28.17	225	22.30
杜鹃花科 Ericaceae	鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>	23	2.40	6	0.53	40	3.96
苋科 Amaranthaceae	凹头苋 <i>Amaranthus blitum</i>	35	3.65	69	6.11	6	0.59
十字花科 Brassicaceae	紫花碎米荠 <i>Cardamine tangutorum</i>	12	1.25	40	3.54	12	1.19
伞形科 Apiaceae	变豆菜 <i>Sanicula chinensis</i>	6	0.63				
石竹科 Caryophyllaceae	孩儿参 <i>Pseudostellaria heterophylla</i>	6	0.63				
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	6	0.63	23	2.04	6	0.59
报春花科 Primulaceae	过路黄 <i>Lysimachia christinae</i>	12	1.25			17	1.68
龙胆科 Gentianaceae	椭圆叶花锚 <i>Halenia elliptica</i>	6	0.63			6	0.59
列当科 Orobanchaceae	甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i>	12	1.25			29	2.87
罂粟科 Papaveraceae	小黄紫堇 <i>Corydalis raddeana</i>	6	0.63			23	2.28
虎耳草科 Saxifragaceae	柔毛金腰 <i>Chrysosplenium pilosum</i> var. <i>valdepilosum</i>	6	0.63	23	2.04	6	0.59
锦葵科 Malvaceae	蜀葵 <i>Althaea rosea</i>					12	1.19
桦木科 Betulaceae	糙皮桦 <i>Betula utilis</i>			6	0.53		
茶藨子科 Grossulariaceae	冰川茶藨子 <i>Ribes glaciale</i>			6	0.53		
牻牛儿苗科 Geraniaceae	甘青老鹳草 <i>Geranium pylzowianum</i>			6	0.53	6	0.59
茄科 Solanaceae	红果龙葵 <i>Solanum alatum</i>			6	0.53	6	0.59

1种,多年生草本23种,一年生草本2种,其中草本植物占78.79%,木本植物占21.21%;GZ萌发乔木2种,灌木3种,多年生草本23种,一年生草本6种,一年或二年生草本1种,其中草本植物占85.71%,木本植物占14.29%。由此可见,3个林区紫果云杉群落土壤种子库中草本植物均占到78%以上,说明草本植物是构成土壤种子库的主体。

2.1.3 土壤种子库垂直分布特征 由图3可知,不同林区相同土层物种数不同,同一林区不同土层物种数也不同。3个林区土壤种子库物种数在各土层上均表现为GZ>TH>YLG,且种子库物种数均在枯落层中最多,5~10 cm处最少,3个林区土壤种子库均有70%以上的物种集中分布在枯落层中,表现出物种数随土壤深度的增加而减少的变化趋势。从图4可知,紫果云杉群落土壤种子库的种子密度也具有明显的垂直分布特征,随土层深度的增加,种子密度均为:枯落层>0~2 cm(土壤表层,下同)>2~5 cm(土壤亚表层,下同)>5~10 cm(土壤深层,下同),表现出种子密度随着土层加深而降低的趋势,这与物种数的垂直分布特征一致。

虽然3个林区均表现出土壤种子库密度随土层深度变化的规律,但其递减趋势有所差异。TH林区:枯落物层和土壤表层种子密度差异不显著($P>0.05$),与土壤亚表层和土壤深层种子密度差异均显著($P<0.05$);土壤表层、土壤亚表层和土壤深层种子密度差异均不显著($P>0.05$)。YLG林区:枯落层和土壤表层种子密度差异不显著($P>0.05$),与土壤亚表层和土壤深层种子密度差异均不显著($P>0.05$),与土壤



A. 一年生草本; A/B. 一年或两年生草本; P. 多年生草本; V. 藤本; S. 灌木; T. 乔木

图2 紫果云杉群落土壤种子库物种生活型特征

A. Annual plants; A/B. Annual or biennial plants; P. Perennials; V. Vines; S. Shrubs; T. Trees

Fig. 2 Species life type characteristics in soil seed bank of *P. purpurea* communities

壤亚表层和土壤深层种子密度差异均显著($P<0.05$);土壤表层和土壤亚表层种子密度差异不显著($P>0.05$),和土壤深层种子密度差异显著($P<0.05$);土壤亚表层和土壤深层种子密度差异显著($P<0.05$)。GZ林区:枯落层和土壤表层、土壤亚表层之间种子密度差异均不显著($P>0.05$),与土壤深层种子密度差异均显著($P<0.05$);土壤表层和土壤深层种子密度差异显著($P<0.05$);土壤亚表层和土壤深层种子密度差异不显著($P>0.05$)。总体而言,3个林区均表现为土层深度差异越大,种子库密度差异越大的特征。

2.2 土壤种子库与地上植被的关系

2.2.1 土壤种子库与地上植被相似性 分析3个林区紫果云杉群落地上植被与土壤种子库之间的相

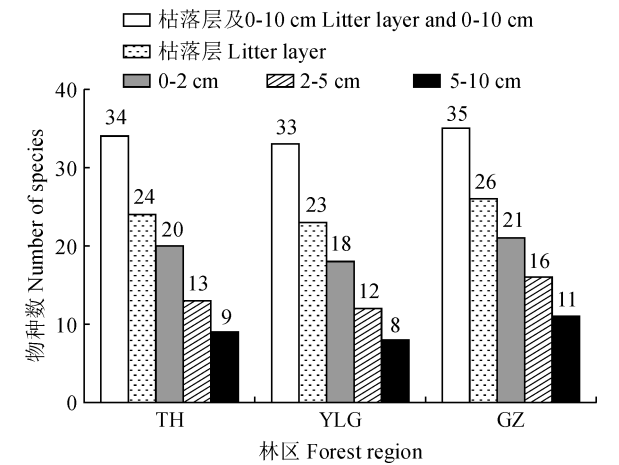
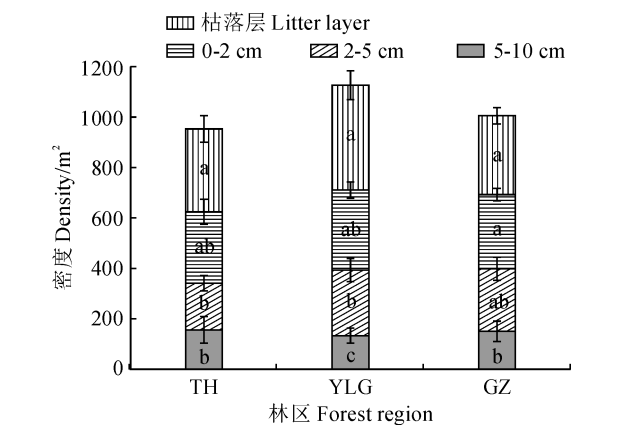


图3 紫果云杉群落土壤种子库物种数垂直分布特征

Fig. 3 Species number vertical distribution in soil seed bank of *P. purpurea* communities



图中不同字母表示同一林区土层间差异显著($P<0.05$)

图4 紫果云杉群落土壤种子库种子密度垂直分布特征

Different normal letters indicate significant differences among soil layers in the same forest regions

Fig. 4 Seed density vertical distribution in soil seed bank of *P. purpurea* communities

表3 紫果云杉群落地上植被与土壤种子库多样性特征

多样性 Diversity	TH		YLG		GZ	
	地上 Aboveground	土壤种子库 Soil seed bank	地上 Aboveground	土壤种子库 Soil seed bank	地上 Aboveground	土壤种子库 Soil seed bank
R	7.37±0.32Aa	4.25±0.19Ba	5.89±0.19Aa	4.23±0.66Aa	6.08±0.71Aa	4.46±0.11Aa
H	2.95±0.16Aa	2.41±0.06Ba	2.82±0.19Aa	2.44±0.14Aa	2.80±0.20Aa	2.54±0.08Aa
D	0.89±0.04Aa	0.86±0.03Aa	0.86±0.04Aa	0.87±0.03Aa	0.89±0.03Aa	0.89±0.02Aa
E	0.73±0.04Aa	0.83±0.05Aa	0.74±0.06Aa	0.84±0.04Aa	0.73±0.04Aa	0.86±0.03Aa

注:R. Margalef 丰富度指数;H. Shannon-Wiener 多样性指数;D. Simpson 多样性指数;E. Pielou 均匀度指数。不同大写字母表示同一林区土壤种子库和地上植被间的差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示不同林区间土壤种子库或地上植被的差异显著($P<0.05$)

Note: R. Margalef; H. Shannon-Wiener; D. Simpson; E. Pielou. Different capital letters mean significant differences between soil seed banks and aboveground vegetation in the same forest region ($P<0.05$), Different normal letters indicate significant differences among soil seed banks or aboveground vegetation in the different forest regions ($P<0.05$)

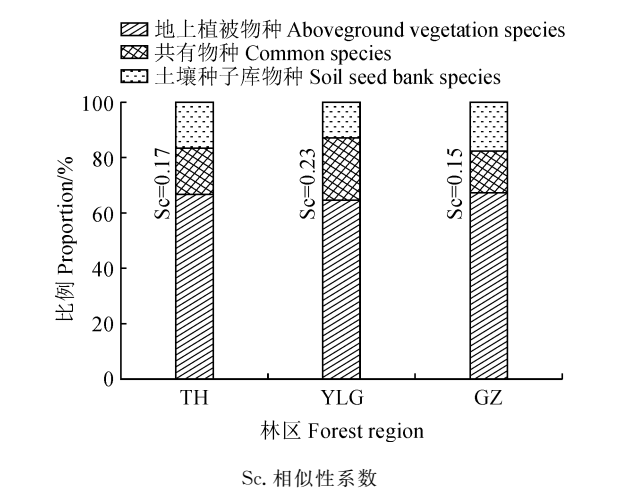


图5 紫果云杉群落土壤种子库与地上植被物种相似性

Sc. Similarity coefficient

Fig. 5 Similarity between species in soil seed bank and aboveground vegetation of *P. purpurea* communities

似性(图5),发现3个林区地上植被丰富度均远大于土壤种子库丰富度,相似性系数大小为:YLG>TH>GZ,相似系数整体较低,均表现为极不相似。其中,TH土壤种子库物种数34种,地上植物物种数85种,共有物种数17种,相似系数0.17;YLG土壤种子库物种数33种,地上植物物种数81种,共有物种数21种,相似系数0.23;GZ土壤种子库物种数35种,地上植物88种,共有物种数16种,相似系数0.15。

2.2.2 土壤种子库物种多样性与地上植物多样性

方差分析显示(表3),土壤种子库和地上植被的Margalef丰富度指数(R)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson多样性指数(D)、Pielou均匀度指数(E)在3个林区内差异均不显著($P>0.05$)。3个林区地上植被多样性与土壤种子库多样性相比发

现,R和H值均表现为土壤种子库低于地上植被,但TH林区差异显著($P<0.05$),YLG和GZ差异性不显著($P>0.05$);D值相差不大,差异性均不显著($P>0.05$);E值均表现为土壤种子库高于地上植被,但差异性不显著($P>0.05$)。总体而言,洮河上游3个林区的土壤种子库之间及地上植被间的多样性指数差别不大,但同一林区土壤种子库的R和H值要低于地上植被,D值相差不大,E值高于地上植被,说明地上植被的物种数丰富度、多样性高于土壤种子库,而土壤种子库比地上植被的均匀性要高。

3 讨论和结论

3.1 土壤种子库特征

土壤中种子种类组成及种子密度是植被自然恢复的物质基础,也是判断植被恢复能力大小的依据^[19]。本研究得出,洮河上游紫果云杉群落土壤种子库共萌发50种植物,菊科植物占比最大。蛛毛蟹甲草、大花金挖耳、大丁草、三脉紫菀、红脉忍冬、林猪殃殃、紫果云杉、双花堇菜、早熟禾、鹿蹄草、凹头苋在3个林区土壤种子库中均有出现,为紫果云杉群落的广布种。紫果云杉土壤种子库密度在958~1129粒/m²之间,基本符合Harper^[20]、Stivertown^[21]统计的森林土壤种子库种子密度在100~1000粒·m⁻²的研究结果。3个林区土壤种子库中禾本科、蔷薇科、菊科植物的种子密度均占优势,可能因为其具有优势的繁殖策略。此外建群种紫果云杉的种子储量较低,平均仅为8粒/m²。究其原因,一是紫果云杉种子在土壤中形成瞬时土壤种子库,种子寿命较短^[22];二是紫果云杉结实有年份丰欠变化,近五年紫果云杉的结果量较少,可能也是导致其储量较低的原

因;三是紫果云杉的种子富含丰富的淀粉、油脂,种子散播后易被动物取食,仅有少部分种子能进入土壤种子库;四是紫果云杉生长于高海拔地区,且紫果云杉林郁闭度较高,打破种子休眠萌发需要长时间的低温环境^[23]。但具体是何种原因导致土壤种子库中紫果云杉种子密度较少,还需进一步深入研究。

植物生活型是植物长期适应生境在外貌上表现的生长类型^[24],是土壤种子库的特征之一^[25]。众多研究表明,多数森林土壤种子库中草本植物的种类及数量较多^[5]。本研究得出,洮河上游紫果云杉群落土壤种子库无论是在数量还是在种类上均以草本植物为主,灌木和乔木的分布量较少,说明草本植物是构成洮河上游紫果云杉群落土壤种子库的主体。分析原因,土壤种子库物种组成依赖于种子库的输入以及种子生活力的持久性^[26]。一方面紫果云杉群落中草本植物的丰富度、多度高于木本植物,从而生产大量的种子输入到种子库种;另一方面,草本植物利用的资源较少,一般比木本植物矮小,产生的种子相对偏小且近球形^[27],更易进入土壤^[28],且能在土壤中保持长时间的活力^[29]。因此,种子输入和持久性角度均能解释土壤种子库中草本植物种子占比例高的原因。另外,野生乔、灌木种子在自然条件下存在难萌发的现象^[30],也是导致土壤种子库乔、灌幼苗数量少的原因。

种子在土壤中的垂直分布有一定的规律性^[31],一般情况下,物种数及密度均自上而下呈递减趋势^[12,32],本研究结果也得出相同的结论。紫果云杉群落枯落层较厚(平均 3.5 cm 左右),会保留较多的种子,随后种子通过自身重力、干扰及雨水冲刷的影响,逐渐向下层土壤转移,转移过程中受土壤阻力、动物摄食、霉变、萌发等影响,进入土壤深层的种子逐渐减少,导致土壤种子库物种数及密度自上而下逐渐降低。此外,统计发现紫果云杉均在土壤表层萌发,可能是由于枯落层中的紫果云杉种子易受鼠类、虫蚁的危害,且其种子较大,靠自身重力下渗的深度有限,同时土壤表层具有较大的湿度,长期的湿润环境会软化种皮,并保证幼苗萌发后对水分和养分的需求,因此土壤表层的紫果云杉萌发数量最多。

3.2 土壤种子库与地上植被的关系

研究土壤种子库与地上植被的相似性可为揭示控制群落组成机制、群落对外界的响应、生物多样性恢复以及群落演替提供依据^[33]。土壤种子库和地上植被是相辅相成的关系,土壤种子库萌发后参与地上植物的演替和更新,而地上植物结实量直接影

响土壤种子库的大小,其共有物种既能反映两者的演替更新能力,又能揭示当前两者的相互贡献力^[34]。本研究中 3 个林区紫果云杉群落土壤种子库与地上植被相似系数在 0.15~0.23 之间,相似程度较低,这与前人研究森林土壤种子库与地上植被的相似性较低的结果一致^[35-37]。地上植被与土壤种子库物种组成间的差异,可能和不同物种的种子特性有关^[38],如种子产量、在土壤中的活力时间及萌发条件等,也可能和物种所处生境以及物种生物学特征有关。本研究对象紫果云杉树体高大,森林郁闭度高,林内遮光严重,部分植物因光照不足,不能正常完成生活史,加之种子特性、干扰等外部环境因素的影响,使土壤种子库的丰富度远小于地上植被,导致土壤种子库与地上植被的相似性较低。紫果云杉群落相似性系数较低,也说明地上植被和土壤种子库之间相互的贡献力较低。

研究土壤种子库物种多样性特征能更好地认识群落的发展和变化^[39],本研究 3 个林区紫果云杉群落土壤种子库、地上植被的物种丰富度指数、多样性指数以及均匀度指数差异不大,说明紫果云杉群落土壤种子库及地上植被的物种数目分布较一致,群落相对稳定。对比分析土壤种子库与地上植被多样性得出,地上植被物种的丰富度大,从而提高了土壤种子库物种的多样性指数,但灌草层中单一优势种的出现降低了其均匀度指数,说明紫果云杉群落地上植被的多样性高于土壤种子库,这与秦岩松^[40]的研究结果一致。

3.3 关于紫果云杉群落恢复的建议

本研究结果表明,3 个林区紫果云杉群落土壤种子库储量较大,草本植物种子达到 78% 以上,乔木和灌木的储量少,特别是建群种紫果云杉的平均储量仅为 8 粒/m²,加之地上植被与土壤种子库物种的相似性低,地上植被丰富度、多样性高于土壤种子库。显然土壤种子库仅能维系紫果云杉群落内部分植被的恢复与更新,仅为紫果云杉群落恢复的种源之一,如果仅仅依靠紫果云杉群落土壤种子库对群落植被,特别是紫果云杉种群进行自然恢复,远不能缓解因早期大规模的林业生产活动造成现有紫果云杉林群落大面积退化的问题。因此,需人为参与收集高质量的紫果云杉种子、人力补播种源、并开展人工育苗、造林等措施,促进紫果云杉的更新与发展。同时,应对现有紫果云杉群落进行封山育林保护措施,使其生存空间保持自然状态,避免人为原因造成的不可逆的破坏。

参考文献:

[1] ROBERTS H A. Seed banks in soils[J]. *Advances in Applied Biology*, 1981, 6: 1-55.

[2] HARPER J L. Population Biology of Plants[M]. London: Academic Press, 1997.

[3] KEBROM T, TESFAYE B. The role of soil seed banks in the rehabilitation of degraded hills lope in Southern Wello, Ethiopia[J]. *Biotropica*, 2000, 32: 23-32.

[4] 郭连金,徐卫红,房会普,等. 不同年龄香果树种子雨和种子库及其更新特征[J]. 西北植物学报,2016,**36**(11): 2 273-2 282.

GUO L J, XU W H, FANG H P, *et al.* Seed rain,seed bank and natural regeneration of *Emmenopterys henryi* in different age classes[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalisa Sinica*, 2016,**36**(11): 2 273-2 282.

[5] 杜有新,曾平生. 森林土壤种子库研究进展[J]. 生态环境, 2007,(5): 1 557-1 563.

DU Y X, ZENG P S, The advance in the study on seed bank of forest [J]. *Ecology and Environment*, 2007,(5): 1 557-1 563.

[6] 王 俊,白 瑜. 土壤种子库研究的几个热点问题[J]. 生态环境,2006,(6): 1 372-1 379.

WANG J, BAI Y. The hot topics and perspectives of soil seed bank research[J]. *Ecology and Environment*, 2006,(6): 1 372-1 379.

[7] 方 祥,王东丽,李 佳,等. 围封对固沙樟子松林土壤种子库的影响[J]. 草业科学, 2020, **37**(4): 635-644.

FANG X, WANG D L, LI J, *et al.* Effects of enclosure on the soil seed banks of sand-fixed *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests[J]. *Pratacultural Science*, 2020, **37**(4): 635-644.

[8] 李永霞,安毅鹏,侯萧渠,等. 藏东南巨柏土壤种子库的时空分布格局[J]. 西部林业科学, 2021, **50**(4): 7-12.

LI Y X, AN Y P, HOU X F, *et al.* Spatial and temporal distribution pattern of soil seed bank of *Cupressus gigantea* in Southeast Tibet [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, **50**(4): 7-12.

[9] 赵 总,刘 勇,田祖为,等. 红锥种子雨土壤种子库与幼苗更新动态[J]. 林业科学, 2020, **56**(5): 37-49.

ZHAO Z, LIU Y, TIAN Z W, *et al.* Dynamics of seed rain, soil seed bank and seedling regeneration of *Castanopsis hystrix* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, **56**(5): 37-49.

[10] 田晓萍,马 力,占玉芳. 祁连山祁连圆柏土壤种子库海拔梯度分布格局[J]. 山地学报, 2019, **37**(5): 662-668.

TIAN X P, MA L, ZHAN Y F. Distribution patterns of soil seed bank of *Sabina przewalskii* along altitudinal gradient in the Qilian Mountains[J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(5): 662-668.

[11] 高 郅,李照青,卢 杰,等. 西藏工布自然保护区高山松林土壤种子库空间分布动态特征[J]. 林业科学研究, 2021, **34**(2): 158-165.

GAO T, LI Z Q, LU J, *et al.* Study on spatial distribution dynamic characteristics of soil seed bank of *Pinus densata* forest in Gongbu Nature Reserve, Tibet [J]. *Forest Research*, 2021, **34**(2): 158-165.

[12] 王 辉,任继周. 子午岭油松林土壤种子库研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2004,(1): 1-5.

WANG H, REN J Z. Research on seed bank of *Pinus tabulaeformis* forest in the Ziwu Mountains[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004,(1): 1-5.

[13] 赵 阳,刘锦乾,陈学龙,等. 洮河上游紫果云杉种群结构特征[J]. 植物生态学报, 2020, **44**(3): 266-276.

ZHAO Y, LIU J Q, CHEN X L, *et al.* Population structure characteristics of *Picea purpurea* in the upstream of Taohe River [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(3): 266-276.

[14] 邱书志,王 伟,丁 骞,等. 洮河林区森林生态系统服务功能及价值评估 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, **38**(2): 97-102.

QIU S Z, WANG W, DING Q, *et al.* Forest ecosystem service function and value evaluation in Taohe forest area[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, **38**(2): 97-102.

[15] 王婧如,王明浩,张晓玮,等. 同倍体杂交物种紫果云杉的生态位分化及其未来潜在分布区预测[J]. 林业科学, 2018, **54**(6): 63-72.

WANG J R, WANG M H, ZHANG X W, *et al.* The ecological divergence and projection of future potential distribution of homoploid hybrid species *Picea purpurea* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(6): 63-72.

[16] 赵 阳,齐 瑞,焦 健,等. 尕斯库勒地区紫果云杉种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(20): 7 447-7 457.

ZHAO Y, QI R, JIAO J, *et al.* The population structure and dynamic characteristics of *Picea purpurea* at the Gahai-zecha area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(20): 7 447-7 457.

[17] 张 玲,方精云. 秦岭太白山 4 类森林土壤种子库的储量分布与物种多样性[J]. 生物多样性, 2004,(1): 131-136.

ZHANG L, FANG J Y. Reserves and species diversity of soil seed banks in four types of forest on Mt. Taibai, Qinling Mountains[J]. *Biodiversity Science*, 2004,(1): 131-136.

[18] 何芳兰,郭春秀,马俊梅,等. 民勤绿洲边缘梭梭林衰败过程中土壤种子库动态及其与地上植被的关系[J]. 生态学报, 2018, **38**(13): 4 657-4 667.

HE F L, GUO C X, MA J M, *et al.* Dynamic changes in soil seed banks and their relationships with aboveground vegetation during the decaying of *Haloxylon ammodendron* plantations at the edge of the Minqin oasis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(13): 4 657-4 667.

[19] 李林瑜,方紫妍,陆 彪,等. 西天山野果林不同居群黑果小檗土壤种子库及幼苗更新研究[J]. 植物科学学报,2018,**36**(4): 534-540.

LI L Y, FANG Z Y, LU B,*et al.* Research on the soil seed bank and seedling renewal of different populations of *Berberis atrocarpa* in the Western Tianshan Wild Fruit Forest [J]. *Plant Science Journal*, 2018, **36**(4): 534-540.

[20] HARPER J L. Population Biologie of Plant [M]. London: Academic Press,1977: 256-263.

[21] STIVERTOWN J W. Introduction to Plantation Population Ecology [M]. London: Academic Press, 1977.

[22] 黄忠良,孔国辉,魏 平,等. 南亚热带森林不同演替阶段

土壤种子库的初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 1996, (4): 42-49.

HUANG Z L, KONG G H, WEI P, *et al.* A study on the soil seed banks at the different succession stages of south sub-tropical forests[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1996, (4): 42-49.

[23] 王桔红, 张 勇, 崔现亮, 等. 不同海拔梯度糙皮桦和紫果云杉种子的萌发变异[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(4): 589-594.

WANG J H, ZHANG Y, CUI X L, *et al.* Variations of *Betula utilis* and *Picea purpurea* germination at different altitudes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(4): 589-594.

[24] 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): 6 282-6 292.

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): 6 282-6 292.

[25] 魏识广, 李 林, 黄忠良, 等. 鼎湖山森林土壤种子库动态研究[J]. 生态环境, 2005, (6): 917-920.

WEI S G, LI L, HUANG Z L, *et al.* Study on the dynamic of seed bank of Dinghushan forest soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, (6): 917-920.

[26] 冯 璐, 刘京涛, 韩广轩, 等. 黄河三角洲滨海湿地地下水位变化对土壤种子库特征的影响[J/OL]. 生态学报, 2021, (10): 1-10.

FENG L, LIU J T, HUANG X, *et al.* Effects of groundwater level fluctuation on characteristics of soil seed banks in coastal wetlands of the Yellow River Delta [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, (10): 1-10.

[27] 郭亚亚, 王树林, 车昭碧, 等. 132 种植物种子大小、生活型、传播方式的关系[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, **38**(1): 83-90.

GUO Y Y, WANG S L, CHE Z B, *et al.* The relationship of seed size variation plant life forms and distribution types of 132 species plants[J]. *Journal of Shihezi University* (Natural Science), 2020, **38**(1): 83-90.

[28] THOMPSON K, BAND S R, HODGSON J G. Seed size and shape predict persistence in soil[J]. *Functional Ecology*, 1993, **7**(2): 236-241.

[29] LEISHMAN M R, WESTOBY M. Seed size and shape are not related to persistence in soil in Australia in the same way as in Britain[J]. *Functional Ecology*, 1998, **12**: 480-485.

[30] 何召琬, 程积民, 万惠娥, 等. 子午岭天然柴松林土壤种子库[J]. 中国水土保持科学, 2009, **7**(6): 85-91.

HE Z W, CHENG J M, WAN H E, *et al.* Soil seed bank of *Pinus tabulaeformis* f. *shekannesis* natural forest in the Ziwuling Mountains[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, **7**(6): 85-91.

[31] 尹 锴, 潘存德, 刘翠玲, 等. 天山云杉林土壤种子库物种组成及其垂直空间分布[J]. 新疆农业大学学报, 2005, (4): 1-4.

YIN K, PAN C D, LIU C L, *et al.* Species composition and vertical distribution of soil seed bank in *Picea schrenkiana* Forest[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005, (4): 1-4.

[32] MIAO J M, XIAN H Z, GUO Z D. Soil seed bank dynamics in alpine wetland succession on the Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2011, **346**(1/2): 19-28.

[33] HOPFENSBERGER K N. A review of similarity between seed bank and standing vegetation across ecosystems[J]. *Oikos*, 2007, **116**(9): 1 438-1 448.

[34] 唐 勇, 曹 敏, 张建侯, 等. 刀耕火种对山黄麻林土壤种子库的影响[J]. 云南植物研究, 1997, (4): 95-100.

TANG Y, CAO M, ZHANG J H, *et al.* The impact of slash-and-burn agriculture on the soil seed bank of *Trem orientalis* forest[J]. *Plant Diversity*, 1997, (4): 95-100.

[35] 李彦娇, 包维楷, 吴福忠. 岷江干旱河谷灌丛土壤种子库及其自然更新潜力评估[J]. 生态学报, 2010, **30**(2): 399-407.

LI Y J, BAO W K, WU F Z. Soil seed bank and natural regeneration potential of shrub land in dry valleys of Minjiang River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(2): 399-407.

[36] 朱晨曦, 刘志刚, 王昌辉, 等. 土壤种子库特征及与地上植被的关系—以福建省三明市杉木人工林为例[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(10): 4 416-4 423.

ZHU C X, LIU Z G, WANG C H, *et al.* Characteristics of soil seed bank and its relationship with aboveground vegetation— a case study of Chinese fir plantations in Sanming City, Fujian Province [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4 416-4 423.

[37] 师 楠, 马建忠, 江期川, 等. 金沙江头塘小流域 5 种人工林种子库研究[J]. 森林工程, 2021, **37**(3): 44-51.

SHI N, MA J Z, JIANG Q C, *et al.* Species diversity of five plantation communities in Toutang small watershed of Jinsha River[J]. *Forest Engineering*, 2021, **37**(3): 44-51.

[38] 沈有信, 刘文耀, 张彦东. 东川干热退化山地不同植被恢复方式对物种组成与土壤种子库的影响[J]. 生态学报, 2003, (7): 1 454-1 460.

SHEN Y X, LIU W Y, ZHANG Y D. The effect of rehabilitation on vegetation species composition and soil seed bank at a degraded dry valley in Dongchuan, Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, (7): 1 454-1 460.

[39] 曾彦军, 王彦荣, 南志标, 等. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究[J]. 应用生态学报, 2003, (9): 1 457-1 463.

ZENG Y J, WANG Y R, NAN Z J, *et al.* Soil seed banks of different grassland types of Alashan arid desert region Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, (9): 1 457-1 463.

[40] 秦廷松, 李登武, 吕振江, 等. 黄土高原地区黄龙山白皮松林地土壤种子库研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(5): 694-700.

QIN T S, LI D W, LÜ Z J, *et al.* Soil seed banks in the *Pinus bungeana* forestland of the Huanglong Mountains on the Loess Plateau[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2011, **28**(5): 694-700.