

文章编号: 1008-2786-(2019)4-508-10
DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000443

川西山区自然边坡土壤种子库随海拔梯度的变化

谭向前¹, 陈芳清^{1*}, 王 稷¹, 熊丹伟¹, 许建新²

(1. 三峡大学 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 铁汉生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518040)

摘 要: 明确土壤种子库在海拔梯度上的变化规律, 可为人工边坡的拟自然恢复提供参考。本文选取川西高山亚高山区为研究对象, 通过野外样方调查和室内种子库萌发实验, 研究了该区域自然边坡的土壤种子库组成、土壤种子库与植被群落关系及其随海拔梯度的变化。结果发现: (1) 不同海拔区域自然边坡土壤种子库的物种组成与物种多样性有较大差异。随着海拔的上升, 土壤种子库中一年生草本植物的物种占比逐渐降低, 多年生草本植物则逐渐增加。种子库的物种多样性则随着海拔上升呈先增加后下降的变化规律。(2) 海拔及坡位都对土壤种子库的密度有一定影响。低海拔地区土壤种子库的平均种子密度一般高于高海拔地区。同一边坡下坡位土壤种子库的种子密度高于中、上坡位。(3) 区域内自然边坡土壤种子库和植被群落物种组成的相似程度不高, 且随着海拔的升高, 相似系数逐渐降低。研究表明, 海拔是影响土壤种子库物种组成及密度的重要因素, 该区域边坡的生态恢复需根据海拔梯度选择适宜物种人工构建种子库。

关键词: 高山亚高山区; 自然边坡; 土壤种子库; 植物群落; 海拔梯度

中图分类号: Q948

文献标志码: A

土壤种子库是指土壤内部及其表面具有生命力的种子总和^[1]。土壤种子库来源于地表植被, 因此植物群落对土壤种子库的组成及空间分布有着直接影响^[2]。同时, 由于种子库也是植物群落形成与种群更新的种质资源^[2], 土壤种子库也对植物群落的恢复与演变起着重要的作用^[3], 尤其在干扰频繁的区域, 种子库对地表植被群落的影响更为显著^[4]。已有学者对典型森林^[5]、灌丛^[6]、草原^[7]群落的土壤种子库做了深入研究, 结果表明不同植被群落的土壤种子库储量及物种组成存在较大差异^[2,5-7]。其次, 微地形^[8]、土壤理化性质^[2]、植株大小^[9]等众多环境因子也对土壤种子库的形成有不同程度的影

响。海拔是影响植物生长发育的关键因素, 植被群落通常也会随着海拔变化呈现一定的变化规律。但目前鲜有针对海拔梯度变化条件下不同植被群落土壤种子库的研究, 缺乏土壤种子库在海拔梯度上的变化规律及其响应机制的研究。

川西地区指四川省阿坝州和甘孜州等高原藏区。区域内地势跌宕起伏, 谷壑纵横, 土地类型大多为坡地。由于海拔差异显著, 气候依次从亚热带到温带、再到寒温带、寒带, 呈现明显的垂直差异^[10]。高寒少雨的气候以及特殊的地理位置(地震多发带)使得该区域的自然边坡生态系统生境脆弱。近年来随着水利水电、公路与铁路工程的快速建设与

收稿日期(Received date): 2018-12-28; 改回日期(Accepted date): 2019-08-14

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2017YFC0504904-02)。[National Key Research and Development Program of China (2017YFC0504904-02)]

作者简介(Biography): 谭向前(1994-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学。[TAN Xiangqian (1994-), male, born in Yichang, Hubei province, M.Sc. candidate, research on restoration ecology] E-mail: 1217316707@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 陈芳清(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为库区和工程扰动区的生态恢复。[CHEN Fangqing (1963-), male, Ph.D., professor, research on ecological restoration of reservoir area and engineering disturbance area] E-mail: fqchen@ctgu.edu.cn

发展,区域内形成了大量裸露的人工边坡。积极开展人工边坡的生态恢复对于稳固边坡以及保护生物多样性等都有着十分重要的意义。拟自然恢复是一种仿照自然群落对退化生态系统进行生态恢复和改造的过程^[11],利用土壤种子库进行生态恢复是一种常用的拟自然恢复方法^[12]。该方法具有恢复成本低、操作方便、群落稳定性相对较强的优点,因此也适合于边坡的生态恢复^[13]。通过这个方法重建的植被群落具有一定的物种组成和群落结构,既能起到固土护坡的作用,还能保育生物多样性,美化环境^[14]。本研究以川西高山亚高山区松潘县境内不同海拔梯度自然边坡为研究对象,通过开展植被群落调查和种子萌发实验研究,揭示了该区域不同海拔梯度自然边坡种子库与植被群落的物种组成特征及其相互之间的关系,以期为该区域内人工边坡的拟自然恢复提供参考。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于四川省川西地区的阿坝藏族羌族自治州的松潘县(图 1; 32° 06′ ~ 33° 09′ N, 102° 38′ ~ 104° 15′ E)。区域内地貌东西差异显著,相对高差 4508 m,具有川西地区典型的山地地形地貌和亚热带高原季风气候特征。该地年平均气温为 7.0 ℃,年平均降雨量为 715 mm,土壤活动层通常在 11 月份冻结,次年 2—4 月融化,为典型的季节性冻土区。研究区域内群落类型多样,垂直分布明显。

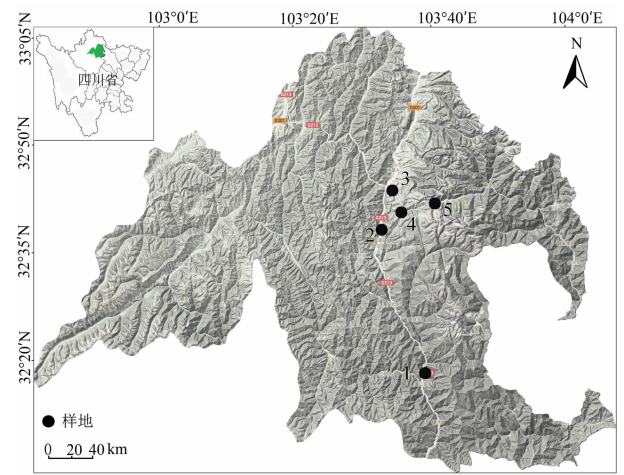


图 1 研究区域及样地分布图

Fig. 1 Study area and plots distribution

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样方调查

本研究选取松潘县境内的主要交通干线 G213 和 X120 沿线自然边坡为研究对象,从海拔 2450 m 到 3983 m 以 400 m 左右的海拔梯度为间隔,依次选取坡度相近、植被受人为干扰程度低的自然边坡设置样地 5 个(表 1),各样地面积均大于 100 m × 100 m。

2018 年 3 月分别在 5 个海拔自然边坡样地的上、中、下坡位各设置 1 个 30 m(横向) × 3 m(纵向)样带,样带之间的纵向距离大于 20 m。每个样带内横向间隔 5 ~ 10 m 随机设置 3 个 1 m × 1 m 的样方,在各样方内设置四个角及中心点 5 个采样点^[15]。清除样点表层植物,使用内径为 8 cm 的土壤采集

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sampling plots

样地	地名	海拔/m	经纬度		坡度/°	坡向/°	群落类型	植被覆盖度/%	土壤类型
1	镇江关乡	2462	32°17'29"N	103°43'56"E	45	78	山桃群落 (Ass. <i>Amygdalus davidiana</i>)	80	灰褐土
2	十里乡	2875	32°39'22"N	103°36'03"E	43	38	银叶蒿群落 (Ass. <i>Artemisia argyrophylla</i>)	90	灰褐土
3	川主寺镇	3168	32°46'39"N	103°39'06"E	30	25	云杉群落 (Ass. <i>Picea asperata</i>)	80	暗棕壤
4	大寨乡	3660	32°44'21"N	103°39'57"E	35	83	川滇柳 + 金露梅群落 (Ass. <i>Salix rehderiana</i> + <i>Potentilla fruticosa</i>)	85	高山草甸土
5	雪山梁	3997	32°44'44"N	103°39'58"E	48	34	矮生嵩草群落 (Ass. <i>Kobresia humilis</i>)	70	高山草甸土

器,采集 0 ~10 cm 的土壤样品。自封袋分装土样,每个样带采集 15 份土壤样品,每个样地分别采集 45 份样品,整个实验共采集 225 份土壤样品。

2018 年 8 月中旬,在上述各样地,按对角线设置 3 个 5 m×5 m 的灌丛样方,三个样方边缘两两之间最小距离 5 m,最大距离不超过 50 m。在每个灌丛样方内按对角线布置 3 个 1 m×1 m 草本样方^[15]。即每个样地共调查 3 个灌木样方、9 个草本样方。分别记录每个样方的植物种类及其盖度与数量。

1.2.2 土壤种子库的萌发实验

利用室内种子萌发法^[15]测定土壤种子库的物种组成和数量。将土壤样品自然风干,除去样品中的杂质及石子,粉碎样品,过直径为 4 mm 的圆孔土壤筛。将筛分的土壤样品放在底部盛有约 3 cm 厚的干沙基质的萌发盘(18 cm×12 cm×6 cm)中,土壤厚度为 2 cm 左右。干沙基质在实验之前进行高温烘烤,确保其中原本存在的种子被灭活。将萌发盘置于人工气候箱中,并在 25 ℃,24 000 lx 的光照强度和 50% 的相对湿度下进行种子萌发实验。每天适量浇水,观察并鉴定幼苗,记录幼苗的种类及数量,并将已鉴定的幼苗去除。种子萌发 2 周后,将无法识别的幼苗单独移植,待它们生长成完整的植物再进行鉴定,并补充到样品记录中。当土样连续 15 天无种子萌发时结束萌发实验。萌发实验从 2018 年 3 月开始,同年 9 月结束。

1.2.3 数据分析与处理

计算各样地土壤种子库中各物种的重要值(重要值 = 相对密度 + 相对频度)和地表植被中各物种

重要值(重要值 = 相对密度 + 相对盖度 + 相对频度)^[15]。然后分别计算不同海拔自然边坡土壤种子库的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数^[16]。

各样地土壤种子库与植物群落物种组成的相似性状况采用 Jaccard 相似性系数^[17]表征,公式为:

$$SC = w/(a + b - w) \tag{1}$$

式中,SC 为 Jaccard 相似系数;*w*(种)为种子库与植物群落共有的物种数;*a*(种)为种子库中的物种数;*b*(种)为植物群落的物种数。

依据 Jaccard 相似性原理,SC 值在区间[0.00, 0.25]、[0.25,0.50]、[0.50,0.75]、[0.75,1.00]分别表示极不相似、中等不相似、中等相似、极为相似。数据处理与分析均采用 Excel 和 SPSS 软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库的物种组成

五个海拔梯度自然边坡的土壤种子库中,共有物种 81 种,分属 24 科 64 属(表 2)。其中菊科的物种数最多,有 19 种;禾本科及蔷薇科次之,分别有 10 种和 6 种。土壤种子库植物的科数、属数和物种数都随海拔的上升呈先增后减的变化趋势。其中群落的物种数量以样地 2 的物种数最高,样地 5 最低。生活型以多年生草本为主,一年生草本次之。共有一年生草本植物 24 种,多年生草本 55 种,灌木物种 2 种。随着海拔的升高,各海拔梯度物种生活型组成发生明显变化,一年生草本植物的物种占比逐渐降低,多年生草本植物的物种占比则不断升高,灌木

表 2 土壤种子库的物种组成
Tab.2 Species composition of soil seed banks

样地	科数	属数	种数	生活型组成种数			优势种
				PH	AH	SH	
1	12	29	35	19	16	—	白莲蒿,细裂叶莲蒿,光叶风毛菊
2	17	33	41	29	12	—	雀舌草,光叶风毛菊,银叶蒿
3	18	32	34	27	7	—	紫苜蓿,垂穗披碱草,三叶委陵菜
4	15	28	31	25	5	1	珠芽蓼,直梗高山唐松草,双柱头蕨草
5	13	17	22	18	3	1	矮生蒿草,珠芽蓼,光叶风毛菊
总数	24	64	81	55	24	2	—

注:PH 为多年生草本;AH 为一年生草本;SH 为灌木。白莲蒿—*Artemisia sacrorum*;细裂叶莲蒿—*Artemisia gmelinii*;光叶风毛菊—*Saussurea chetchozensis*;雀舌草—*Stellaria uliginosa*;紫苜蓿—*Medicago sativa*;垂穗披碱草—*Elymus nutans*;三叶委陵菜—*Potentilla freyniana*;珠芽蓼—*Polygonum viviparum*;直梗高山唐松草—*Thalictrum alpinum*;双柱头蕨草—*Scirpus distigmaticus*。

物种仅在高海拔区域的样地 4 和样地 5 出现。优势物种的种类也随海拔梯度的变化而变化,并由此导致群落类型的变化。

土壤种子库的物种多样性指数、均匀度指数呈相同的变化格局(表 3),即随着海拔梯度的增加先增加后减少,而优势度指数随海拔升高呈现相反的变化规律。各样地土壤种子库的物种优势度指数排序为样地 1>样地 2>样地 5>样地 4>样地 3。低海拔区域土壤种子库的生态优势度明显高于中、高海拔区域。多样性指数和均匀度指数排序均为样地 3>样地 4>样地 5>样地 2>样地 1。中海拔区域土壤种子库的物种多样性和均匀度高于高海拔和低海拔区域。

表 3 土壤种子库的物种多样性				
Tab. 3 Species diversity of soil seed banks				
样地	物种数	优势度指数	多样性指数	均匀度指数
1	35	0.32	1.98	0.56
2	41	0.27	2.24	0.60
3	34	0.09	2.88	0.82
4	31	0.10	2.72	0.79
5	22	0.13	2.44	0.79

2.2 土壤种子库的数量特征

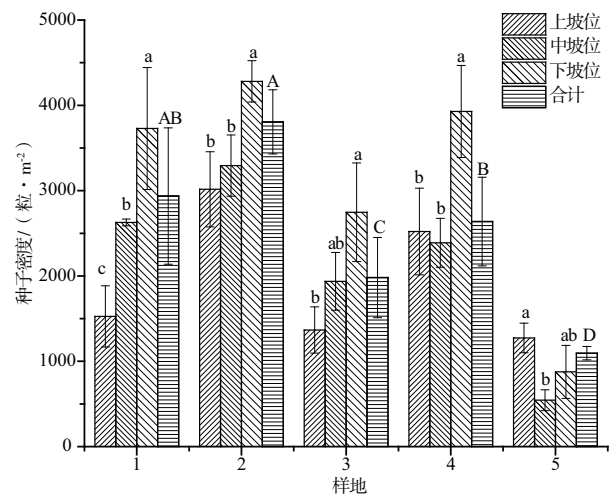
各样地的土壤种子库平均密度介于 $1095.23 \pm 78.19 \sim 3805.91 \pm 376.10$ 粒·m⁻²之间(图 2)。土壤种子库平均种子密度总体上随着海拔上升呈先增加后减小,其大小顺序为样地 2>样地 1>样地 4>样地 3>样地 5。其中样地 1 与样地 2 土壤种子库密度差异不显著,但显著高于其他样地($P<0.05$)。

坡位对土壤种子库密度有着显著影响($P<0.05$)(图 2)。样地 4 种子密度呈下坡位>上坡位>中坡位的变化,样地 5 的种子密度呈上坡位>下坡位>中坡位的变化。其他样地种子密度均呈下坡位>中坡位>上坡位的变化,且下坡位种子密度显著高于上坡位($P<0.05$),下坡位土壤种子数占样地总种子数的 40% 以上。

2.3 土壤种子库与地上植被的关系

所调查样地植物群落共出现地上植物 123 种,分属 36 科 97 属。以菊科的物种数最多,有 20 种;蔷薇科和禾本科次之,分别有 14 种和 11 种。生活型组成以草本植物为主(102 种),灌木次之

(19 种),乔木最少(2 种)。随海拔升高,各样地植物群落的物种多样性指数依次为 2.91、3.04、3.26、3.03、3.01。各个样地植物群落的物种数均大于其土壤种子库物种数。5 个样地土壤种子库与样地植物群落的总物种数为 154 种,共有物种数为 60 种,总体上两者之间物种组成的相似程度不高,相似系数为 0.42(表 4)。各样地间共有物种数随着海拔梯度的增加而逐渐减少,土壤种子库与植物群落物种组成的相似系数也随之逐渐减小。其中样地 5 物种组成的相似水平为极不相似,其他样地的相似水平为中等不相似。



注:小写字母表示在 0.05 水平上同一样地坡位间差异显著水平;大写字母表示在 0.05 水平上各样地间差异显著水平。

图 2 土壤种子库的数量特征
Fig. 2 Quantitative characteristics of soil seed bank

将植物群落及土壤种子库重要值占前 8 位的物种作为优势种,比较各海拔梯度土壤种子库与植物群落的优势种物种组成,发现不同海拔地上植被和土壤种子库的优势种组成存在较大的差异(图 3)。随着海拔梯度的增加,植物群落和土壤种子库共优种数量呈先减少后增加的变化趋势。其中样地 1 地上植被和土壤种子库有 4 个共优种,分别为白莲蒿、光叶风毛菊、早熟禾、紫苜蓿;样地 2 地上植被和土壤种子库有 3 个共优种,分别为雀舌草、银叶蒿、紫苜蓿;样地 3 地上植被和土壤种子库有 3 个共优种,分别为紫苜蓿、双柱头蕨草、西藏嵩草;样地 4 地上植被和土壤种子库有 4 个共优种,分别为珠芽蓼、直梗高山唐松草、双柱头蕨草、天胡荽;样地 5 地上植被和土壤种子库有 5 个共优种,分别为矮生蒿草、光

表 4 土壤种子库与地表植物物种组成的相似系数

Tab. 4 Similarity coefficients of species composition between soil seed bank and standing vegetation

样地	种子库种数/种	地上植被种数/种	仅存在种子库的种数/种	仅存在地上植被的种数/种	共有种数/种	相似性系数
1	35	36	14	15	21	0.42
2	41	46	16	21	25	0.40
3	34	36	16	18	18	0.35
4	31	38	13	20	18	0.35
5	22	36	11	25	11	0.23
总数	81	123	21	63	60	0.42

叶风毛菊、佛甲草、双柱头蕨草、川滇绣线菊。其中光叶风毛菊在样地 1 和样地 5 均为共优种,紫苜蓿在样地 1、样地 2、样地 3 均为共优种,双柱头蕨草在样地 3、样地 4 和样地 5 均为共优种。

3 讨论

3.1 土壤种子库物种组成特征及其多样性随海拔梯度的变化

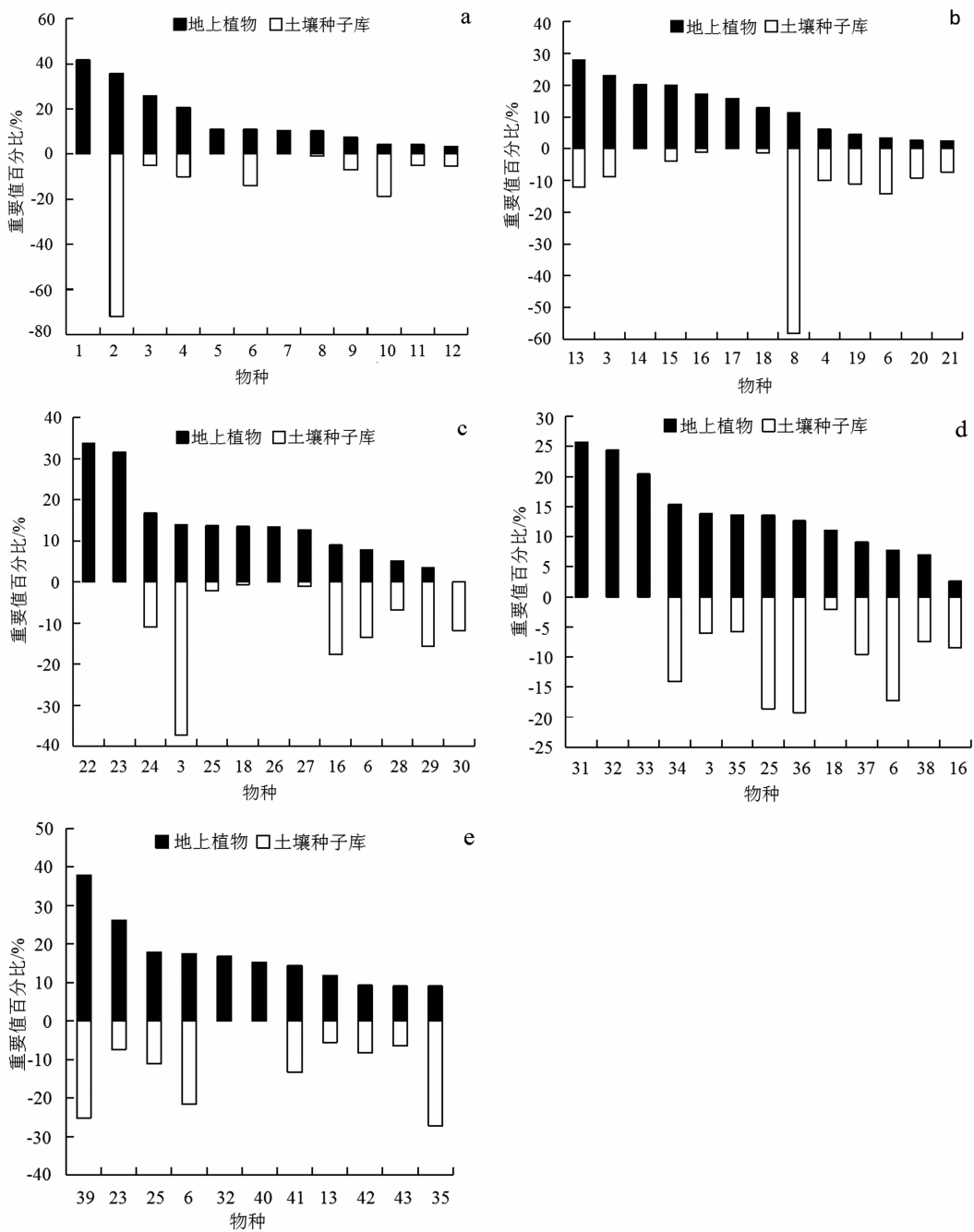
土壤种子库的组成与区域气候特征和群落类型密切相关^[3]。川西高山亚高山区属于亚热带季风气候带,群落类型随着海拔梯度的变化而变化。本研究中所调查的自然边坡植物群落包括草坡、灌丛和森林等不同类型的,土壤种子库的物种生活型的总体组成以多年生草本最多,其次是一年生草本,木本很少出现。该结果与同气候带香格里拉亚高山区^[5]的研究结果相同。研究中各样地物种组成均以菊科物种最多,禾本科及蔷薇科次之。与同气候带的黔中地区^[16]和汶川地区^[18]土壤种子库优势物种的科属特征相同。但随着海拔升高,一年生草本植物的物种占比逐渐降低,多年生草本植物的物种占比不断升高。各海拔梯度土壤种子库的优势物种也明显不同。其中低海拔的样地以温带广布的白莲蒿、雀舌草和紫苜蓿为优势种,高海拔样地则逐渐以垂穗披碱草、珠芽蓼、双柱头蕨草、矮生蒿草等高原广布的耐寒植物种类为主。

海拔梯度的变化对区域内土壤种子库的物种多样性有显著影响,土壤种子库的物种组成、优势成分以及植被与种子库的关系常因海拔梯度的变化而变化^[19]。但在不同研究尺度下,物种多样性的增长曲线会有所变化,分别呈单峰或者双峰变化格局^[20]。Ashton 等^[21]的研究发现中山坡地的物种多样性高

于低山山谷和河谷。黄瑞灵等^[22]对拉鸡山不同海拔的土壤种子库开展了研究,发现土壤种子库物种丰富度及多样性随着海拔梯度的增加先增加后减少,中海拔地区物种数量高于低海拔和高海拔地区。本研究中各海拔样地土壤种子库物种组成和多样性有较大差异,种子库的多样性指数随着海拔升高呈现先增大后减小的规律,呈单峰变化格局。本研究中植物群落物种多样性与种子库基本一致,但多样性指数与物种数的峰值所出现的样地不同。这主要是因为多样性指数在一定程度上与物种数量无关,但与物种配置中的个体数量和重要值等有关^[23]。研究中位于低海拔的样地 1 和样地 2 的土壤种子库中分别存在极端优势种白莲蒿和雀舌草,它们的种子数量分别占样地种子库的 54.90% 和 50.81%,优势地位突出,这使得种子库的物种优势度指数较高,而均匀度指数较低。随着海拔变化,土壤、温度、光照、湿度等众多环境因子也都会发生改变,但海拔差异引起的众多环境差异性因子往往是通过影响地表植被的生长发育来间接影响土壤种子库^[19]。

3.2 土壤种子库的数量特征及其随海拔梯度和地形因素的变化

张玲等^[24]在对太白山南坡不同海拔梯度(1500~3500 m)土壤种子库的研究中,发现种子储量在中海拔呈现高峰值。本研究结果也显示海拔对土壤种子库密度影响十分明显,土壤种子库密度随着海拔升高呈先增加后减小的变化。该变化趋势与前人在高山亚高山区的研究结果基本一致^[17]。研究中样地 2 的土壤种子库密度远大于邻近的样地。究其原因可能与植被群落类型对种子库密度空间分布的影响有关。由于草本植物通常具有较高的繁殖效率,木本植物的繁殖效率相对较低^[25],同时木本植物群落中草本植物的生长及繁殖常受木本植



注:图中右上角的小写字母 a, b, c, d, e 分别代表样地 1,2,3,4,5。横坐标上数值分别代表不同的物种:1. 山桃;2. 白莲蒿;3. 紫苜蓿;4. 早熟禾 (*Poa annua*);5. 小果蔷薇 (*Rosa cymosa*);6. 光叶风毛菊;7. 矮探春 (*Jasminum humile*);8. 雀舌草;9. 尼泊尔蓼 (*Polygonum nepalense*);10. 细裂叶莲蒿;11. 苦苣菜 (*Sonchus oleraceus*);12. 小蓬草 (*Conyza canadensis*);13. 银叶蒿;14. 细枝绣线菊 (*Spiraea myrtilloides*);15. 尼泊尔香青 (*Anaphalis nepalensis*);16. 垂穗披碱草;17. 沙棘 (*Hipophae rhamnoides*);18. 毛茛 (*Ranunculus japonicus*);19. 朝天委陵菜 (*Potentilla supina*);20. 牛筋草 (*Eleusine indica*);21. 黑麦草 (*Lolium perenne*);22. 云杉;23. 川滇绣线菊 (*Spiraea schneideriana*);24. 西藏蒿草 (*Kobresia tibetica*);25. 双柱头蕨草;26. 地榆 (*Sanguisorba officinalis*);27. 西南草莓 (*Fragaria moupinensis*);28. 平车前 (*Plantago depressa*);29. 三叶委陵菜;30. 高羊茅 (*Festuca elata*);31. 川滇柳;32. 金露梅;33. 高山柏 (*Sabina squamata*);34. 天胡荽;35. 珠芽蓼;36. 直梗高山唐松草;37. 二叶兜被兰 (*Neottianthe cucullata*);38. 泽漆 (*Euphorbia helioscopia*);39. 矮生蒿草;40. 婆婆纳 (*Veronica didyma*);41. 佛甲草 (*Sedum lineare*);42. 卷耳 (*Cerastium arvense*);43. 蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)。

图 3 不同海拔土壤种子库与地表植被的优势种及其重要值百分比

Fig. 3 The percentages of important values of dominant species in soil seed bank and surface vegetation along altitude gradient

物的制约与影响,因此草地的种子库规模往往大于灌丛和森林。本研究中样地 2 为草丛,邻近样地均为灌丛或者森林,因此样地 2 种子密度最大。样地 5 虽然群落类型是草丛,但其物种数量较少,特别是一年生植物种类少,所以其种子密度仍相对较低。

微地形对土壤种子库数量的影响较为突出^[26]。韩润燕等^[8]对不同微地形固定沙丘的研究发现土壤种子库储量呈现出底坡 > 下部坡位 > 中部坡位 > 上部坡位 > 顶坡的变化趋势。本研究结果显示,坡位对种子密度有较大影响,同一边坡下坡位的土壤种子库密度普遍高于中、上坡位。其原因可能是坡位对土壤含水量、养分、侵蚀程度^[27]和种子传播有着关键影响。下坡位的土壤含水量、养分相对较高,植被发育相对较好,有性繁殖能力较强。此外种子传播后受水流冲刷向下坡位转移也是使得下坡位种子密度上升的重要原因。但研究中样地 5 出现反常,可能是由于样地 5 因放牧导致中坡位及下坡位植被退化所致。

3.3 土壤种子库与植被的关系及其随海拔梯度的变化

土壤种子库与植被之间的相似性长期以来一直是许多研究者的争论焦点。Yuan 等^[28]认为土壤种子库基本可以反映了植被群落的组成,但国内外众多的研究者却发现土壤种子库和植被群落的物种组成具有较大差异^[29-30]。国内关于高山亚高山地区土壤种子库与植被关系的研究主要集中在青藏高原的高寒草甸^[30]、青海省东北部山区^[7]和四川省干热河谷^[6]等地区。现有研究普遍表明在高海拔山地土壤种子库与植被群落相似性较低,而低海拔山地相似性较高^[31]。本研究中五个样地种子库与植被群落总的物种组成相似系数为 0.42,相似程度处于中等不相似。造成种子库与植被相似性较低的原因有多种^[32],其中植物群落的生活型组成是主要影响因素。James 等^[25]研究发现当土壤种子库的生活型组成以多年生草本和木本植物为主时,植被和种子库的相似性较低,当以多一年生草本为主时,两者相似性较高。本研究中各样地土壤种子库的生活型组成均以多年草本为主,因此其植物群落和种子库的总相似性水平较低。

种子库与植被的相似性同样受到海拔梯度的影响^[33]。李彦娇等^[6]对岷江上游到下游 3 个样地种

子库与植被相似性进行了研究,发现相似性系数随着海拔梯度的增加而降低。本研究结果显示川西高山亚高山地区边坡种子库与植被的相似性系数也随海拔梯度的增加呈下降的趋势。这同样可能与群落类型及其物种生活型组成随海拔梯度的变化特征有关^[18]。本研究中随海拔升高,植被群落土壤种子库及植被群落的物种组成中一年生草本植物的占比逐渐减小,多年生草本植物和乔灌木的占比逐渐增大,植被与种子库的相似性因而逐渐降低。

川西高山亚高山区地形地貌复杂多变,工程建设形成大量高陡边坡。由于冻融循环作用的影响,坡地的稳定性相对较低,选择适宜的本地物种进行生态恢复对于边坡的稳定具有十分重要的作用。本研究结果对于生态恢复中的物种选择与配置有较好的指导意义。由于自然边坡土壤种子库来源于边坡及其周围植物群落,土壤种子库的物种是边坡植物群落更新与发育的基础。因此,在利用土壤种子库技术对工程边坡进行拟生态恢复时,应参考自然边坡土壤种子库的物种组成及其空间分布的差异性,以促进植被的生态恢复。考虑到快速恢复坡地及其稳定性的需求,该地区边坡先锋群落构建应以草丛为主,在 2400 m 左右构建白莲蒿群落,物种组成上搭配紫苜蓿、早熟禾、山桃等;2800 m 左右构建雀舌草群落,物种组成上搭配银叶蒿、紫苜蓿、尼泊尔香青等;3200 m 左右构建紫苜蓿群落,物种组成上搭配西藏嵩草、垂穗披碱草、川滇绣线菊等;3600 m 左右构建珠芽蓼群落,物种组成上搭配双柱头藨草、直梗高山唐松草、川滇柳、金露梅等;4000 m 左右构建矮生嵩草群落,物种组成上搭配珠芽蓼、光叶风毛菊、川滇绣线菊等。

4 结论

本研究揭示了不同海拔梯度上川西山区自然边坡土壤种子库和植物群落的物种组成和数量特征,并分析了土壤种子库空间分布的差异性以及土壤种子库与植物群落的相似性,结果表明:

(1)海拔梯度对土壤种子库物种组成及其多样性有显著影响。各海拔区域自然边坡土壤种子库的物种组成与优势物种有较大差异。随着海拔的上升,土壤种子库中一年生草本植物的物种占比逐渐降低,多年生草本植物则逐渐增加。种子库的物种

多样性则随着海拔上升呈先增加后下降的变化规律。

(2)海拔梯度及坡位对土壤种子库的密度有一定影响。总体上,低海拔地区土壤种子库的平均种子密度高于高海拔地区,同一边坡下坡位土壤种子库的种子密度高于中、上坡位。

(3)海拔梯度对土壤种子库和植被相似性影响较小,但仍存在一定规律,即随着海拔的升高,相似系数逐渐降低。由于土壤种子库与植被相似性较低,依靠自然土壤种子库恢复原有植被群落的可能性不大。因此,该地区人工边坡的生态修复可参考本文研究结果,在不同海拔选择适宜的物种人工构建植被种子库。

参考文献 (References)

- [1] THOMPSON K, GRIME J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats [J]. *Journal of Ecology*, 1979, **67**(3): 893–921.
- [2] 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与其土壤理化性质分析[J/OL]. *生态学报*, 2019, (17): 1–11. [LI Guoqi, SHAO Wenshan, ZHAO Panpan, et al. Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in a desert steppe region[J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, (17): 1–11]
- [3] 张志明,沈蕊,张建利,等.元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较[J]. *生物多样性*, 2016, **24**(4): 431–439. [ZHANG Zhiming, SHEN Rui, ZHANG Jianli, et al. Comparisons of species composition between soil seed banks and aboveground plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River [J]. *Biodiversity Science*, 2016, **24**(4): 431–439]
- [4] PUGNAIRE F I, LAZARO R. Seed bank and understorey species composition in a semi-arid environment: The effect of shrub age and rainfall [J]. *Annals of Botany*, 2000, **86**(4): 807–813.
- [5] 裴艳辉,杨德军,耿云芬,等.香格里拉亚高山不同退化程度森林群落土壤种子库的特征研究[J]. *西部林业科学*, 2012, **41**(2): 56–61. [PEI Yanhui, YANG Dejun, GENG Yunfen, et al. Study on soil seed bank characteristics of vegetations in Shangri-la subalpine of northwest Yunnan under different degraded degrees [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2012, **41**(2): 56–61]
- [6] 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 Yanjiao, BAO Weikar, WU Fuzhong. Soil seed bank and natural regeneration potential of shrubland in dry valleys of Minjiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(2): 399–407]
- [7] 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 Qipeng, WANG Jian, ZHAO Chengzhang, 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]
- [8] 韩润燕,陈彦云,李旺霞.不同微地形固定沙丘地上植被、土壤种子库和土壤含水量的分布特征[J]. *草业科学*, 2014, **31**(10): 1825–1832. [HAN Runyan, CHEN Yanyun, LI Wangxia. The distribution and relationships of ground vegetation, soil seed bank and soil water content of fixed sand under different micro-landform conditions [J]. *Pratacultural Science*, 2014, **31**(10): 1825–1832]
- [9] AMANDE T, LONNIE A. Resident species with larger size metrics do not recruit more offspring from the soil seed bank in old-field meadow vegetation [J]. *Journal of Ecology*, 2019, **107**(3): 1067–1078.
- [10] 樊敏,郭亚琳,李富程,等.岷江上游植被生境适应性空间分异格局的间隙度分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(7): 1078–1085. [FAN Min, GUO Yalin, LI Fucheng, et al. Lacunarity analysis of spatial variation patterns of vegetation habitat suitability in the upper reaches of Min river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(7): 1078–1085]
- [11] 胡建忠.西部地区植被建设的主要途径探讨[J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(3): 121–123. [HU Jianzhong. Discussion on main approaches for vegetation construction in western region of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(3): 121–123]
- [12] 赵娜,贺梦璇,李洪远.草炭与珍珠岩对土壤种子库种子萌发特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, **36**(6): 92–96. [ZHAO Na, HE Mengxuan, LI Hongyuan. Properties of vegetation succession on shallow landslide deposits in loess hilly and gully region and the related response of soil nutrient [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, **36**(6): 92–96]
- [13] 伏凯,杨建英,王力,等.北京山区不同质地类型自然边坡土壤种子库特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(3): 355–360. [FU Kai, YANG Jianying, WANG Li, et al. Soil seed bank characteristics of natural slope with different textures in Beijing mountainous Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(3): 355–360]
- [14] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等.工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. *水利水电技术*, 2017, **48**(2): 130–137. [ZHAO Bingqin, XIA Zhenyao, XU Wennian, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, **48**(2): 130–137]
- [15] 张森,陈芳清,王娅微,等.不同植物恢复模式下香溪河消落带土壤种子库特征及其对水位消涨的响应[J]. *湿地科学*, 2016, **14**(2): 194–200. [ZHANG Miao, CHEN Fangqing, WANG

- Yajing, et al. The characteristics of soil seed banks under different restoration patterns and their responses to water-level fluctuation in fluctuating belt of Xiangxi River [J]. *Wetland Science*, 2016, **14** (2): 194 – 200]
- [16] 李生,姚小华,任华东,等. 黔中石漠化地区不同土地利用类型土壤种子库特征[J]. *生态学报*, 2008, (9): 4602 – 4608. [LI Sheng, YAO Xiaohua, REN Huadong, et al. Different land-used soil seed banks in Karst Rocky Desertification area of middle Guizhou Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (9): 4602 – 4608]
- [17] 马全林,卢琦,魏林源,等. 干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征[J]. *生态学报*, 2015, **35** (7): 2285 – 2294. [MA Quanlin, LU Qi, WEI Linyuan, et al. Varying characteristics of soil seed banks during the succession process of *Nitraria Tangutorum* vegetation in an arid desert area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35** (7): 2285 – 2294]
- [18] 张广帅,邓浩俊,杜锟,等. 汶川地震生态治理区土壤种子库及其与地上植被的关系[J]. *中国生态农业学报*, 2015, **23** (1): 69 – 79. [ZHANG Guangshuai, DENG Haojun, DU Kun, et al. Soil seed bank and its correlations with aboveground vegetation in ecological restoration zones of Wenchuan earthquake region [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2015, **23** (1): 69 – 79]
- [19] 张敏,宋晓阳. 热带森林群落土壤种子库对海拔梯度的响应[J]. *生态学杂志*, 2015, **34** (9): 2390 – 2400. [ZHANG Min, SONG Xiaoyang. Responses of soil seed banks in tropical forests to an elevational gradient [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34** (9): 2390 – 2400]
- [20] HEGAZY A K, HAMMOUDA O, TLOVETT D J, et al. Variations of the germinable soil seed bank along the altitudinal gradient in the northwestern Red Sea region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29** (1): 20 – 29.
- [21] ASHTON P S, HARRIS P G, THADANI R. Soil seed bank dynamics in relation to topographic position of a mixed-deciduous forest in southern New England [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **111** (1): 15 – 22.
- [22] 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 Ruiling, ZHOU Huakun, LIU Zehua, 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]
- [23] 马晓勇,上官铁梁. 太岳山森林群落物种多样性[J]. *山地学报*, 2004, **22** (5): 606 – 612. [MA Xiaoyong, SHANG GUAN Tieliang. Species diversity of the forest communities in Taiyue Mountain, Shanxi [J]. *Mountain Research*, 2004, **22** (5): 606 – 612]
- [24] 张玲,方精云. 太白山南坡土壤种子库的物种组成与优势成分的垂直分布格局[J]. *生物多样性*, 2004, (1): 123 – 130. [ZHANG Ling, FANG Jingyun. Composition and dominant species of soil seed bank along an altitudinal gradient in Mt. Taibai, Qinling Mountains [J]. *Biodiversity Science*, 2004, (1): 123 – 130]
- [25] JAMES C S, CAPON S J, WHITE M G, et al. Spatial variability of the soil seed bank in a heterogeneous ephemeral wetland system in semi-arid Australia [J]. *Plant Ecology*, 2007, **190** (2): 205 – 217.
- [26] CHAMBERS J C. Seed movements and seedling fates in disturbed sagebrush steppe ecosystems: implications for restoration [J]. *Ecological Applications*, 2000, **10** (5): 1400 – 1413.
- [27] 李传人,艾应伟,郭培俊,等. 铁路边坡不同坡位土壤物理化学性质差异性[J]. *水土保持学报*, 2012, **26** (6): 91 – 95. [LI Chuanren, AI Yingwei, GUO Peijun, et al. Differences of soil physicochemical properties in different railway cut-slope positions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26** (6): 91 – 95]
- [28] YUAN Longyi, LIU Guihua, LI Wei, 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.
- [29] SMITH L M, KADLEC J A. Seed banks and their role during drawdown of a North American marsh [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1983, **20** (2): 673 – 684.
- [30] 马妙君,周显辉,吕正文,等. 青藏高原东缘封育和退化高寒草甸种子库差异[J]. *生态学报*, 2009, **29** (7): 3658 – 3664. [MA Miaojun, ZHOU Xianhui, Lü Zhengwen, et al. A comparison of the soil seed bank in an enclosed vs. a degraded alpine meadow in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29** (7): 3658 – 3664]
- [31] 罗辉,王克勤. 金沙江干热河谷山地植被恢复区土壤种子库和地上植被研究(英文)[J]. *生态学报*, 2006, **26** (8): 2432 – 2442. [LUO Hui, WANG Keqin. Soil seed bank and aboveground vegetation in Jinshajing Hot-Dry River Valley Hillslope vegetation restoration site [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26** (8): 2432 – 2442]
- [32] 刘瑞雪,詹娟,史志华,等. 丹江口水库消落带土壤种子库与地上植被和环境的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, **24** (3): 801 – 808. [LIU Ruixue, ZHAN Juan, SHI Zhihua, et al. Soil seed bank and its correlations with aboveground vegetation and environmental factors in water level fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir, Central China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24** (3): 801 – 808]
- [33] 刘庆艳,姜明,吕宪国,等. 湿地土壤种子库与地上植被相似性关系研究评述[J]. *生态学报*, 2014, **34** (24): 7465 – 7474. [LIU Qingyan, JIANG Ming, Lü Xianguo, et al. A review of similarity between soil seed bank and aboveground vegetation in wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34** (24): 7465 – 7474]

Variations of Soil Seed Bank of Natural Slopes in the Western Sichuan Mountainous Region along Altitude Gradient

TAN Xiangqian¹, CHEN Fangqing^{1*}, WANG Ji¹, XIONG Danwei¹, XU Jianxin²

(1. Hubei International Scientific and Technological Cooperation Center of Ecological Conservation and Management in the Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Tech and Ecology & Environment Co., Ltd., Guangdong 518040, Shenzhen, China)

Abstract: To clarify the variations of soil seed banks along the elevation gradient and provide reference for imitating natural restoration of artificial slopes, the alpine and sub-alpine areas in the Western Sichuan was selected as the research objects in this paper. The composition of soil seed banks, relationship between soil seed banks and vegetation of natural slopes, and their changes with altitude gradient were studied by field plot investigations and germination experiments. The results showed that: (1) the species composition and species diversity differed significantly among soil seed banks collected from different altitude natural slopes. The proportion accounting for by the annual herbaceous plants gradually decreased with the increasing altitude in the soil seed banks, meanwhile the proportion accounting for by the perennial herb gradually increased. The species diversity of soil seed bank increased first and then decreased with the increase of altitude. (2) Elevation and slope position had a certain impact on the density of soil seed bank. The average seed density of soil seed bank at the low altitude areas was generally higher than that at the high altitude areas. The seed density of soil seed bank at the low part was higher than that of the middle and upper parts within the same slope. (3) The similarity of species composition between soil seed bank and standing plant community in the region was relatively low. The similarity coefficient decreased with the increasing of elevation. All of these results suggested that the elevation was an important factor affecting the species composition and density of soil seed bank. The ecological restoration of the slope in this area needs to select appropriate species to artificially construct the seed banks according to elevation gradient.

Key words: alpine and sub-alpine regions; natural slope; soil seed bank; vegetation community; elevation gradient