

DOI: 10.5846/stxb201706141084

何芳兰, 郭春秀, 马俊梅, 吴昊, 金红喜. 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. 生态学报, 2018, 38(13): - .
He F L, Guo C X, Ma J M, Wu H, Jin H X. 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. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

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

何芳兰^{1,2}, 郭春秀¹, 马俊梅¹, 吴昊¹, 金红喜^{1,*}

¹ 甘肃省治沙研究所 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 兰州 730070

² 兰州大学 草地农业科技学院, 兰州 730020

摘要: 为了探明民勤绿洲边缘梭梭林衰败过程中土壤种子库演变特征及其与地上植被的关系, 以民勤西沙窝——民勤治沙综合试验站 1987 年建植的未衰败 (ND)、轻度衰败 (SLD)、中度衰败 (MD) 以及重度衰败 (SD) 梭梭林为对象, 通过野外调查及室内萌发的方法对林地土壤种子库物种组成、密度、物种多样性及其与地上植被的关系进行了研究。结果表明: 1) 梭梭林由未衰败向重度衰败演变过程中, 种子库草本植物物种数先急剧增大再缓慢减小 (峰值在 SLD 阶段), 木本植物物种数先急剧减小再保持恒定; 种子库优势种呈现出由沙生植物向沙旱生植物演替的趋势; 大部分林地种子库与地上植被物种间存在较高的相似性。2) 梭梭林衰败过程中, 草本植物种子库密度呈现出急剧增大后缓慢减小趋势, SLD、MD 及 SD 的密度分别是 ND 的 2.57、2.32、2.28 倍; 木本植物种子库密度处于持续增大状态, SLD、MD、SD 的密度分别是 ND 的 5.25、11.38、14.74 倍; 种子库与地上植株密度间存在正相关关系, 其中, 草本植物为对数曲线, 木本植物为二次函数曲线。3) 梭梭林从衰败初期 (SLD) 演变到后期 (SD), 种子库中草本植物物种多样性指数 D_{ma} 、 D_{sim} 、 H' 、 J_{sh} 均呈现出先稳定后变化的状态, 而木本植物的 4 种指数一直呈现出减小的趋势; 种子库草本植物物种多样性指数变化趋势与其地上植被存在差异, 但其变化幅度基本一致; 种子库木本植物与地上植被的物种多样性指数变化趋势完全一致, 其种子库的变化幅度小于地上植被。基于以上结果得出, 民勤梭梭林衰败过程中林地植物群落发生了由沙生植物向沙旱生植物的演替, 林地植被与土壤种子库间存在很强的依赖性, 衰败梭梭林林地土壤种子库具有较高的植被恢复能力。

关键词: 民勤绿洲; 梭梭林; 土壤种子库; 地上植被

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

HE Fanglan^{1,2}, GUO Chunxiu¹, MA Junmei¹, WU Hao¹, JIN Hongxi^{1,*}

¹ Gansu Desert Control Research Institute & Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Lanzhou 730070, China

² College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: The Minqin oasis is located in the northwest Hexi Corridor, and the northern, western, and eastern edges are surrounded by the Tengger and Badain Jaran deserts. To manage sand and prevent sandstorms, large tracts of *Haloxylon ammodendron* plantations were previously planted on the fixed and semi-fixed sand dunes of the Minqin oasis fringe. At present, parts of the *H. ammodendron* plantations, especially those close to the oasis, have presented with a degradation phenomenon due to multiple affecting factors. To ascertain the changes in soil seed banks and their relationships with

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31360203); 甘肃省创新群体项目 (145RJIA335)

收稿日期: 2017-06-14; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinhxcha@126.com

aboveground vegetation during the degradation process of *H. ammodendron* plantations, some tracts of *H. ammodendron* plantations planted in 1987 were divided into no degradation (ND), slight degradation (SLD), moderate degradation (MD), and serious degradation (SD) stages, according to the growth status of these plants and their seedlings, as well as the coverage of biological soil crust. In the present study, the species composition, density, and species diversity of soil seed banks and their relationships with aboveground vegetation were studied, with field monitoring and indoor germination methods. The results showed that 1) with an increased degree of degradation of *H. ammodendron* plantations, the number of woody plants in the soil seed banks first decreased rapidly and then remained stable, and the number of herb plants in the soil seed banks, first increased rapidly and then decreased slowly, so that the peak emerged at the SLD stage. At the same time, dominant species in soil seed banks presented a succession trend from typical psammophytes to xerophytes, and the species similarity coefficients of soil seed banks and aboveground vegetation, as calculated by Jaccard's similarity coefficient, appeared to increase from ND to SLD and then decrease from SLD to SD. 2) The soil seed bank density of herb plants rapidly increased their stage of degradation from ND to SLD and slowly decreased from SLD to SD, while the soil seed bank density of woody plants has been increasing continuously and dramatically. The densities of herb plants and woody plants in the SLD, MD, and SD stages were 2.57 and 5.25, 2.32 and 11.38, and 2.28 and 14.74 times higher than that of ND, respectively. There was a positive correlation between the species in soil seed banks and aboveground vegetation, such that this relationship for herb plants can be described with a logarithmic curve of $y = a \ln(x) + b$ ($a \neq 0$), and for woody plants may be described with a quadratic curve of $y = ax^2 + bx + c$ ($a \neq 0$). 3) With the evolution from the SLD stage in *H. ammodendron* plantations to the SD stage, some species diversity indices, such as D_{ma} , D_{sim} , H' , and J_{sw} , of herb plants in soil seed banks were initially obviously stable and then showed significant change, while the indices of woody plants showed continuous change. In addition, some obvious differences have been presented between trends of these indices in soil seed banks and in aboveground plants, while the degrees of change in soil seed banks were similar to those of aboveground plants. The changes in trend in the indices of woody species in soil seed banks were completely consistent with those in the indices of aboveground plants; however, the degrees of change in soil seed banks were smaller than those in the aboveground plants. These findings suggest that the degradation of *H. ammodendron* plantations is a succession from psammophytes to xerophytes, there is a strong interdependence between soil seed banks and aboveground vegetation, and soil seed banks in the degrading plantations will have a stronger potential for vegetation recovery due to the increase in seed bank stocks of some species, which is a response to increase the stability of the plant communities.

Key Words: Minqin oasis; *Haloxylon ammodendron* plantation; soil seed bank; aboveground vegetation

土壤种子库是指存在于土壤表层枯枝落叶层中以及土壤基质内部的具有再生潜力的全部种子总和^[1-2], 是地上植被补充更新和生物多样性的源泉,也是植物群落动态的重要组成部分^[3-5]。土壤种子库也能有效地减小种群消失的可能性,为植物群落的演替、更新以及受损生态系统恢复提供稳定的繁殖体^[6]。土壤种子库作为潜在植被,预示着将来与环境变化有关的植物变化,在连接过去、现在和将来的植物群落、群落结构与动态中起着重要的生态作用^[7-8]。相对于地上植物群落来说,土壤种子库对各种干扰的耐性较强,能综合反应区域植被结构、物种多样性、物种有性繁殖能力及局部微环境条件,并为准确、有效地判断生态系统恢复潜力和地上植被植物群落演替进展提供重要依据^[9-11]。因此,土壤种子库研究日益受到重视,其已成为恢复生态学和种群生态学研究热点之一^[11-14]。

梭梭 [*Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey) Bung] 为多年生灌木状旱生小乔木,隶属于藜科梭梭属,具有很强的抗旱、抗风蚀、耐盐碱、耐沙埋等能力,已成为干旱荒漠区防风固沙、保护草场、改善沙区气候的优良植物^[15-16]。因其苗木繁育成本低、移栽成活率高以及生长速度快等优点,已成为干旱沙漠区人工植被建植主要树种。就民勤县而言,其治沙生态林区保存较好的人工梭梭林面积达到 2.95 万 hm^2 ,形成了长达 300 多 km

的绿色长廊,成为保护绿洲的重要屏障^[17]。随着人工梭梭林建植植株的生长发育,部分区域原有的流动或半固定沙丘逐渐趋于稳定,沙丘表层逐渐形成生物土壤结皮,尤其是绿洲与荒漠毗邻区域更为明显。然而,土壤结皮的形成及发育一方面阻碍降雨及时入渗^[18-20],致使沙丘深层土壤含水量下降;另一方面使得植物种子空间分布浅表化,限制了部分植物种子更新^[21-22]。受多重因素影响,民勤绿洲边缘部分已形成生物土壤结皮的人工梭梭林出现衰退现象。同时,一些长期从事风沙一线的科技工作者对其衰败原因、人工复壮技术以及土壤水分动态开展了大量研究^[23-25],然而,有关人工梭梭林衰败过程中林地土壤种子库动态变化及其与地上植被关系方面的研究甚少。为此,本文试图在民勤绿洲边缘 1987 年建植的梭梭林中选择不同衰败程度林地,通过对林地土壤种子库组成特征、动态变化及其与植被关系研究,探讨干旱沙区人工梭梭林衰败过程中土壤种子库动态变化规律及其与植被间相互关系,为干旱沙区人工林建植及其可持续经营提供理论基础。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于石羊河下游民勤西沙窝(102°59'05"E,38°34'28"N),该区域属于典型温带大陆性荒漠气候。冬季寒冷,夏季酷热,昼夜温差大,年平均气温 7.6℃,极端低温-30.8℃,极端高温 40.0℃,无霜期 175 d;降雨量少,蒸发量大,气候干燥,年均降雨量 113.2 mm,年均蒸发量 2604.3 mm,干燥度 5.1,最高达 18.7,相对湿度 47%;光热充足,年均日照时数 2799.4 h,≥10℃的活动积温 3036.4℃;冬季盛行西北风,全年风沙日可达 83 d,并多集中在 2—5 月,年均风速 2.5 m/s,最大风速为 23.0 m/s;地下水位深 23 m 左右^[26]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设

2014 年 9 月上旬,以民勤西沙窝——民勤治沙综合试验站边缘 1987 年建植的人工梭梭林为研究对象。根据林地建植梭梭的生长、结实、更新苗以及林地土壤结皮形成发育等为依据,将人工梭梭林划分为轻度衰败(SLD)、中度衰败(MD)、重度衰败(SD),并以未衰败(ND)梭梭林作为对照(表 1)。在地形地貌相似的林地选择典型监测区 3 个(监测区均涵盖 ND、SLD、MD 和 SD,相邻监测区间距离为 2.6—3.4 km,监测区面积均大于 6.0 hm²);在监测区 ND、SLD、MD 和 SD 林地沙丘迎风面分别布设 50 m×50 m 样地 3 个,共 12 个;每个样地内布设 5 个 10 m×10 m 大样方(I),大样方外缘布设 4 个 2 m×2 m 中样方(II),大样方内布设 5 个 1 m×1 m 小样方(III)(图 1)。

表 1 不同衰败程度人工梭梭林生长状况及林地土壤结皮

Table 1 Growth status of planted *H. ammodendron* and soil crusts of *H. ammodendron* plantations at different degradation stages

衰败程度 Degree of degeneration	建植植株生长状况	梭梭及林地土壤结皮 Growth status of <i>Haloxylon ammodendron</i> planted and soil crusts in the forest lands		
		结实情况	2—5 a 生实生苗	林地土壤结皮盖度及其发育阶段
未衰败 ND	生长良好,极少量枯枝	大量	少量	结皮盖度 < 21%,主要为物理结皮
轻度衰败 SLD	生长较好,少量枯枝	大量	偶见	45% < 结皮盖度 < 67%,主要为藻类结皮
中度衰败 MD	生长较差,约有 1/3 枯枝	少量	无	72% < 结皮盖度 < 88%,主要为藻类和地衣结皮
重度衰败 SD	生长极差,约有 3/4 枯枝	极少量	无	92% < 结皮盖度,主要地衣和藓类结皮

表中 ND:未衰败, No degradation; SLD:轻度衰败, Slight degradation; MD:中度衰败, Moderate degradation; SD:重度衰败, Serious degradation

1.2.2 土壤种子库取样及萌发

土壤种子库取样:2015 年 3 月 22—24 日,在 II 号样方外缘选择林表匀质(无坑洼、鼠洞等)区域用自制箱式分层式取样器(规格:20 cm×20 cm×10 cm;分 4 层:0—2, 2—4, 4—6, 6—10 cm)采集面积 20 cm×20 cm,深度为 0—2, 2—4, 4—6, 6—10 cm 土样,分层土壤从取样器中自下而上逐一倒入土壤盘中,去掉杂物后装入布袋并带到实验室待用。

土壤种子库测定:采用种子萌发法测定土壤种子库中有活力的植物种子数量。2015 年 5 月 5—6 日,将

3 月份采集的土样压碎后平铺于 40 cm×40 cm×2.5 cm 塑料培养盘中(土厚为 1 cm)后置于甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地的培养室(17.5—23.5℃)进行萌发实验,每天喷水保持土壤湿润,待幼苗生长至可辨别物种后统计并移除,30 d 后翻土 1 次,60 d 后结束,并将土样装回土壤袋中常温保存;2016 年 6—7 月,进行二次萌发实验(方法如上)。

植被调查:2015 年 9 月进行植被调查。灌木调查:调查大样方内灌木种数及株数(幼苗除外)。草本植物调查:样方内物种分布比较均匀,个体数超过 20 株,仅查小样方内株数;反之,调查大样方内株数。

1.2.3 数据计算

根据培养盘中记录到的幼苗数计算土壤种子库密度、多样性指数及相似性系数。土壤种子库密度用单位面积土壤内所含有的活力种子数来表示(粒/m²)。地上植被密度用单位面积植株数来表示(株/m²)。以物种的重要值($IV = \text{相对密度} + \text{相对频度}$)确定土壤种子库和地上植被物种优势度,土壤种子库及地上植被的多样性用 Margale 指数(D_{ma})、Simpson 指数(D_{sim})、Shannon-Wiener 指数(H')表示,均匀度用 Pielou (J_{sw}) 指数表示^[27]。

土壤种子库物种与地上植被物种(所有草本以及株龄大于 3a 的木本)间相似性采用 Jaccard 相似性系数计算,依据 Jaccard 相似性原理^[28-29], q 值在区间[0.00,0.25]、[0.25,0.50]、[0.50,0.75]、[0.75,1.00] 分别代表极不相似、中等不相似、中等相似、极为相似。

1.3 数据分析

应用 Excel 和 SPSS 18.0 软件完成数据处理和统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duccan's 多重比较方法对不同衰败程度林地土壤种子库密度、优势种相似性以及多样性指数等进行显著性分析(显著度 $\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库的物种组成及其与地上植被相似性

2.1.1 土壤种子库物种组成特征

民勤绿洲边缘不同衰败程度人工梭梭林地土壤种子库物种组成见表 2,可见土壤种子库物种组成一直处于变化状态。其中,ND 林地土壤种子库中出现了 5 种灌木和 7 种草本植物,分属于 7 科 11 属;SLD 林地土壤种子库中出现了 4 种灌木和 11 种草本,分属于 7 科 15 属;MD 种子库中出现了 4 种灌木和 10 种草本,分属于 7 科 14 属;SD 林地土壤种子库中出现 4 种灌木和 9 种草本。此外,草本植物种子库在 ND 阶段以藜科植物为主,SLD→MD 阶段以藜科和禾本科植物为主,SD 阶段主要以藜科、禾本科和菊科植物为主;4 种林地种子库中木本植物种科属种均为单科单属,林地种子库 77.78% 物种分属于 42.86% 科,22.22% 物种分属于 57.14% 科。

依据种子库物种重要值(IV)可以看出,草本植物种子库演替经历了五星蒿、盐生草、画眉(ND、SLD)→五星蒿、画眉草、虎尾草(MD)→画眉草、猪毛蒿(SD)3 个阶段;木本植物种子库演替经历了沙蒿(ND)→红砂(SLD、MD、SD)两个阶段。

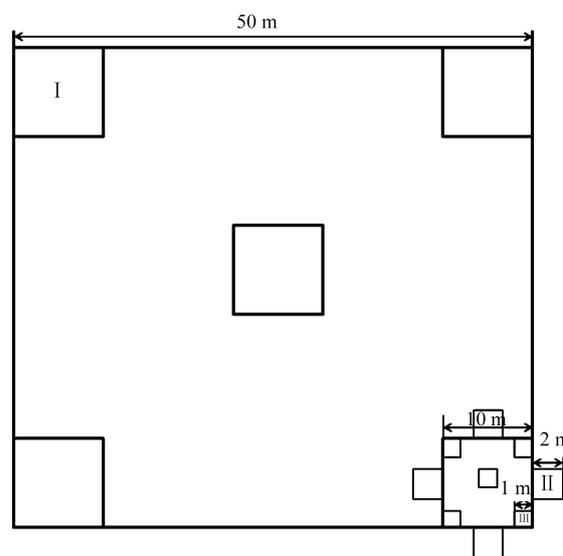


图 1 林地样方布设图

Fig.1 The sample design and layout of woodland

表 2 不同衰败程度人工梭梭林地土壤种子库物种组成及其重要值

Table 2 Species composition and important value of soil seed banks of *H. ammodendron* plantations at different degradation stages

类型 Type	科 Family	物种名 Plant name	重要值 Important value				
			ND	SLD	MD	SD	
草本植物 Herb plant	藜科 <i>Chenopodiaceae</i>	五星蒿 <i>Bassia dasyphylla</i>	42.89	35.03	40.30	10.03	
		盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i>	46.97	44.53	29.64	13.90	
		虫实 <i>Corispermum patelliforme</i>	10.75	1.22	1.12	0.00	
		沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	3.64	0.23	0.22	0.00	
		猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	1.47	3.74	5.22	6.15	
		画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	83.78	51.59	48.51	69.69	
		锋芒草 <i>Tragus racemosus</i>	0.00	22.54	22.46	0.08	
		禾本科 <i>Gramineae</i>	冠芒草 <i>Enneapogon borealis</i>	0.00	0.00	0.35	0.21
		虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	0.00	22.32	35.73	9.92	
		沙生针茅 <i>Stipa glareosa</i>	0.00	0.01	0.01	0.00	
	菊科 <i>Asteraceae</i>	砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>	0.00	2.24	2.43	0.02	
		猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.00	0.00	0.00	81.91	
	白花丹科 <i>Plumbaginaceae</i>	黄花补血草 <i>Limonium aureum</i>	10.51	16.53	13.99	8.09	
	木本植物 Woody plant	藜科 <i>Chenopodiaceae</i>	梭梭 <i>Haloxyylon ammodendron</i>	14.41	33.25	11.82	4.38
菊科 <i>Asteraceae</i>		沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	158.64	0.00	0.00	0.00	
柽柳 <i>Tamaricaceae</i>		红砂 <i>Reaumuria songarica</i>	13.46	143.91	176.18	186.85	
蒺藜科 <i>Zygophyllaceae</i>		白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	4.20	9.99	7.86	4.38	
蓼科 <i>Polygonaceae</i>		沙拐枣 <i>Calligonum arborescens</i>	9.29	12.79	4.13	4.38	

2.1.2 土壤种子库物种与地上植被物种的相似性

对 4 种林地土壤种子库物种与其地上植被物种(草本和株龄大于 3a 的木本)以及种子库优势种与其地上植被优势种相似性进行分析(图 2, 图 3), 发现不同衰败程度梭梭林地土壤种子库物种、优势种与其相应的地上物种间均存在不同程度相似性。其中, ND、SLD 林地种子库草本植物优势种与其地上植被优势种间均呈中等相似关系, 而 MD、SD 林地其优势种间均呈中等不相似(图 2 A)。种子库木本植物优势种与其地上植被优势种间的相似关系为: ND 林地呈极不相似关系, SLD 呈中等不相似关系, MD、SD 均呈极相似关系(图 2 B)。草本植物种子库优势种与其地上植被优势种相似性系数随梭梭林衰败程度加剧呈现出阶段性的减小趋势, 但木本植物的相似性系数先急剧增大后再保持恒定不变。同时, 随人工梭梭林衰败程度加剧, 土壤种子库物种与地上植被物种相似性先增大后减小, 峰值出现在 SLD 阶段(图 3); 除 ND 林地种子库木本植物物种与其地上植被物种呈极为不相似关系外, 其它种子库草本或木本植物均与相应的地上植被物种均呈极为相似关系(图 3); 除 SLD 林地种子物种与地上植被物种完全一样外, ND、MD 以及 SD 林地土壤种子库草本植物或木本植物物种数均大于其对应的地上植被物种数。

2.2 土壤种子库密度及其与地上植物密度的关系

2.2.1 土壤种子库密度

民勤不同衰败程度人工梭梭林 0—10 cm 土壤层草本植物和木本植物种子库密度见图 4, 可见不同衰败程度林地土壤种子库密度存在显著差异性($P < 0.05$)。其中, 梭梭林由 ND 向 SD 演变过程中草本植物种子库密度先呈现出急剧增大后缓慢减小趋势(峰值在 SLD 阶段), SLD、MD、SD 林地草本植物种子库密度分别是 ND 林地的 2.57、2.32、2.28 倍, 4 种林地草本植物种子库密度两两之间均差异显著($P < 0.05$)(图 4 A)。同时, 梭梭林衰败过程中林地木本植物种子库密度一直处于持续增大趋势, SLD、MD、SD 林地木本植物种子库分别是 ND 林地的 5.25、11.38、14.74 倍, 4 种阶段木本植物种子库密度两两之间均存在显著差异性($P < 0.05$)(图 4 B)。

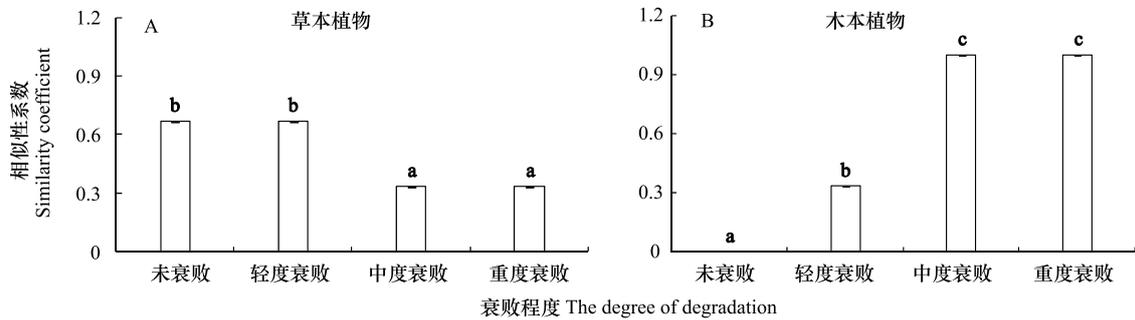


图2 不同衰败程度梭梭林种子库优势种与地上植被优势种相似性

Fig.2 Similarity between dominant species in soil seed bank and aboveground vegetation of *H. ammodendron* plantations at different degradation stages.

不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$; ND: 未衰败 No degradation; SLD: 轻度衰败 Slight degradation; MD: 中度衰败 Moderate degradation; SD: 重度衰败 Serious degradation

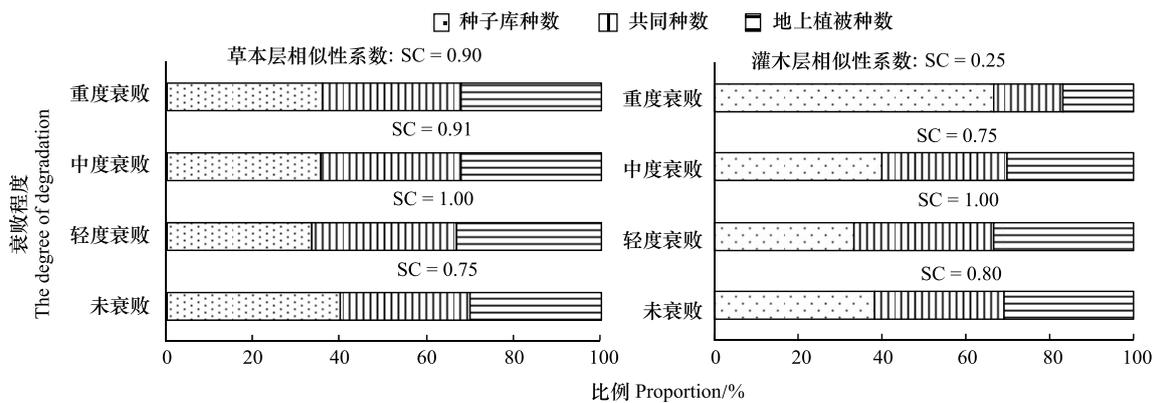


图3 不同衰败程度人工梭梭林土壤种子库物种与其地上植被物种相似性

Fig.3 Species similarity between soil seed bank and aboveground vegetation of *H. ammodendron* plantations at different degradation stages

SC: 相似性系数 Similarity coefficient

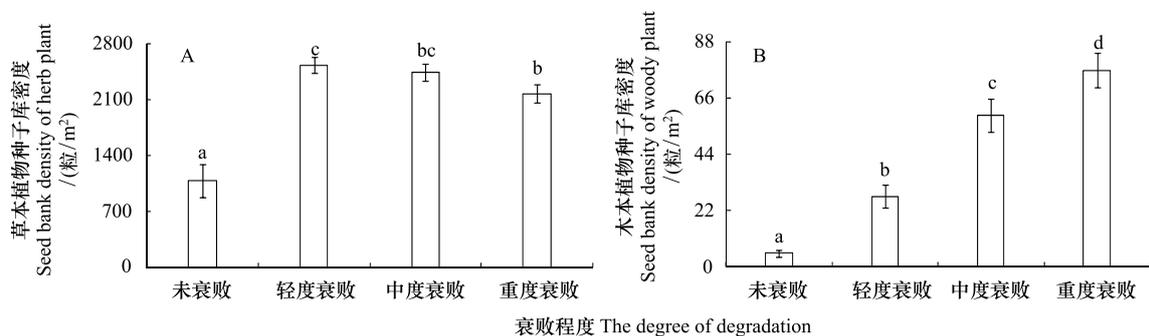


图4 不同退化程度人工梭梭林土壤种子库密度

Fig.4 Soil seed bank densities in *H. ammodendron* plantations with different degrees of degradation

不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$

2.2.2 土壤种子密度与地上植被密度关系

民勤不同衰败程度人工梭梭林地 0—10 cm 土壤层种子库密度与其地上植株密度回归分析见图 5, 可见种子库中草本植物、木本植物种子密度与其地相应的地上植被密度间均存在一定的相关性。其中, 4 种林地

种子库中草本植物种子库密度与其地上植株密度间存在正相关,二者间关系可用对数曲线 $y = a \ln(x) + b (a \neq 0)$ 来描述(图 5:ND₁、SLD₁、MD₁、SD₁);4 林地的相关系数值差异很大,SLD 林地的相关系数值高达 0.93,ND 的相关系数值还不到 0.60。此外,4 种林地种子库中木本植物种子库密度与其地上植株密度均存一定的正相关性,二者间关系符合 $y = ax^2 + bx + c (a \neq 0)$ 的二次函数(图 5:ND₂、SLD₂、MD₂、SD₂),其相关系数随梭梭林衰败程度加剧而持续增大(ND 的值小于 0.40,而 SD 接近 0.90)。

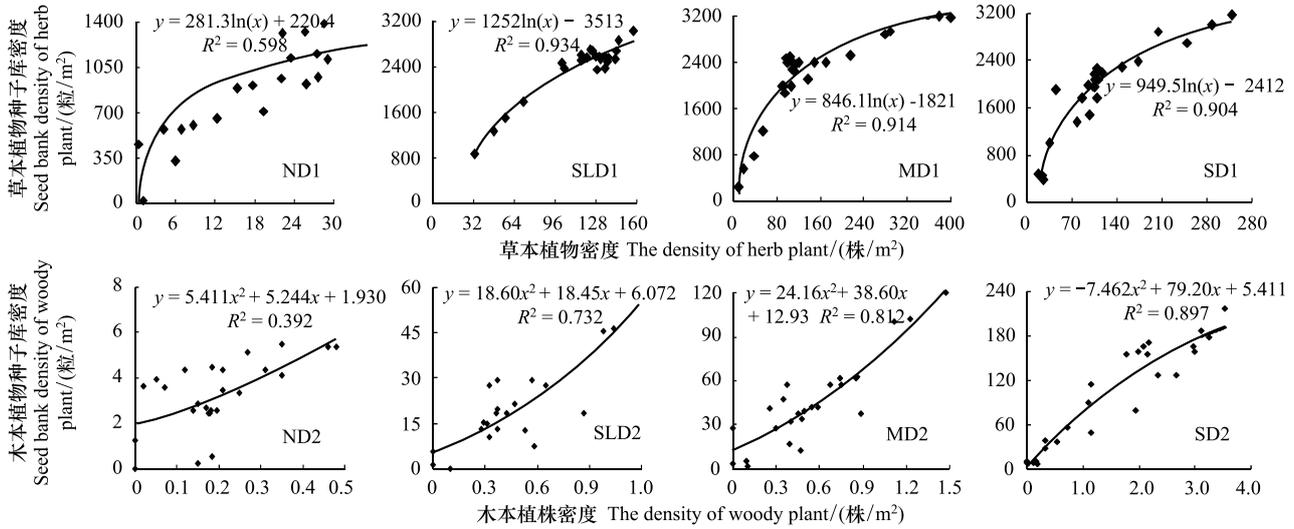


图 5 不同衰败程度梭梭林土壤种子库密度与地上植被密度关系

Fig.5 Relationship of soil seed bank density and aboveground vegetation density of *H. ammodendron* plantations at different degradation stages

2.3 土壤种子库多样性指数及其与地上植被多样性指数间的关系

2.3.1 土壤种子库多样性指数

由表 3 可以看出,不同衰败程度梭梭林土壤种子库物种丰富度指数 (D_{ma})、Simpson 优势度指数 (D_{sim})、Shannon-wiener 多样性指数 (H') 以及 Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 两两之间存在显著差异性。其中,种子库草本植物物种多样性指数 (D_{ma} 、 D_{sim} 、 H' 、 J_{sw}),除 SLD 林地与 MD 林地间差异均不显著外,其余林地 4 个指数两两之间差异均显著 ($P < 0.05$); D_{ma} 、 D_{sim} 、 H' 指数随梭梭林衰败程度加剧均呈现出先增大后减小趋势(峰值出现在 MD 阶段),而 J_{sw} 指数值处于增大趋势。种子库木本植物多样性指数中,除 MD 林地 D_{ma} 指数值与 SD 林地差异不显著外,其余林地 4 指数值两两之间均差异显著 ($P < 0.05$)。随着梭梭林衰败程度加剧, D_{ma} 指数先呈现出急剧减小后恒定不变,其余 3 个指数值均呈现出先增大后减小趋势(峰值在 SLD 阶段)。

表 3 不同衰败程度梭梭林土壤种子库物种多样性

Table 3 Species diversities of soil seed bank in *H. ammodendron* plantations with different degree of degeneration

衰败程度 Degeneration degree	植物类型 Vegetation types	物种多样性指数 Species diversity index			
		D_{ma}	D_{sim}	H'	J_{sw}
未衰败 ND		0.87 ± 0.08 a	0.72 ± 0.03 a	1.46 ± 0.06 a	0.66 ± 0.02 a
轻度衰败 SLD	草本植物	1.28 ± 0.13 c	0.82 ± 0.02 b	1.85 ± 0.05 b	0.79 ± 0.04 b
中度衰败 MD		1.29 ± 0.11 c	0.83 ± 0.03 b	1.89 ± 0.07 b	0.82 ± 0.03 b
重度衰败 SD		1.17 ± 0.07 b	0.70 ± 0.02 a	1.47 ± 0.07 a	1.06 ± 0.09 c
未衰败 ND		2.43±0.23c	0.36±0.02c	0.79±0.02c	0.48±0.03c
轻度衰败 SLD	木本植物	0.91±0.05b	0.45±0.04d	0.86±0.04d	0.62±0.04d
中度衰败 MD		0.74±0.03a	0.22±0.02b	0.49±0.06b	0.35±0.03b
重度衰败 SD		0.71±0.02a	0.13±0.03a	0.31±0.03a	0.23±0.02 a

同一列不同字母表示差异性不显著 ($P < 0.05$); D_{ma} : Margale 丰富度指数 Margale; D_{sim} : Simpson 优势度指数 Simpson; H' : Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener; J_{sw} : Pielou 均匀度指数 Pielou。

2.3.2 土壤种子库多样性及其与地上植被关系

梭梭林由 ND 向 SD 演变过程中,林地土壤种子库物种多样性指数 D_{ma} 、 D_{sim} 、 H' 及 J_{sw} 的变化趋势或幅度与其地上植被的变化存在一定关系(图 6)。由图 6: A₁、A₂ 可以看出,草本植物土壤种子库物种多样性指数与其地上植被间的关系为:种子库的 D_{ma} 指数变化趋势和地上植被相似,ND 阶段两者大小相近,SLD→SD 阶段种子库约地上植被的 1.3 倍;种子库 H' 指数呈现出缓慢增大(ND→SLD)——稳定不变(SLD→MD)——缓慢较小(MD→SD)的趋势,地上植被 H' 指数一直处于缓慢较小状态,但 SLD 和 SD 阶段两者值大小基本相同;种子库与地上植被 D_{sim} 指数变化趋势相似,其值也非常接近;种子库 J_{sw} 变化趋势(持续增大)与地上植被完全相反,但 SLD→MD 阶段两者值非常接近。

种子库木本植物及其地上植被 D_{ma} 指数值均呈现出逐渐下降趋势,ND、SD 阶段种子库的值分别是地上植被的 2.03、1.28 倍,SLD、MD 阶段两者大小基本相近;种子库 D_{sim} 、 H' 以及 J_{sw} 指数变化趋势与其地上植被完全一致,ND 阶段种子库 3 指数的值分别是其地上植被的 2.41、2.14、1.78 倍,SLD→SD 阶段地上植被 3 指数值均在其种子库的 1.47 倍以上(图 6)。

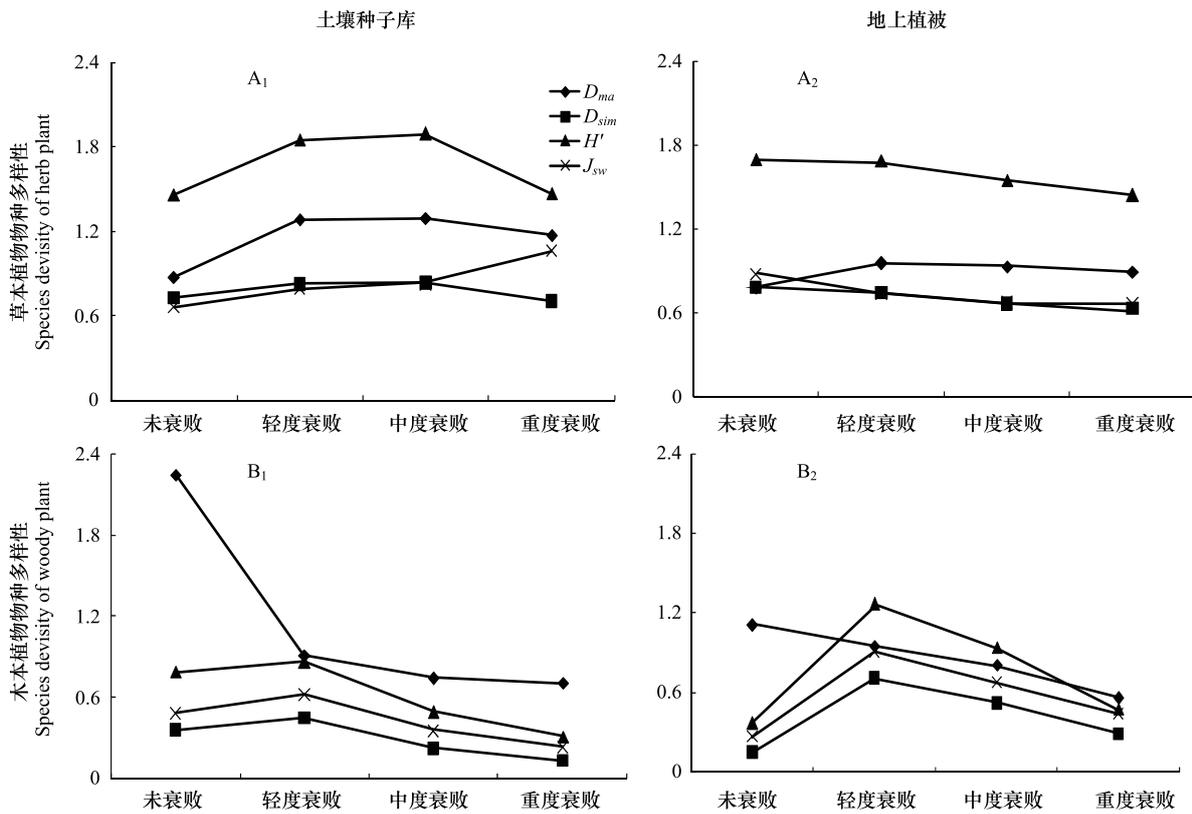


图 6 不同退化程度人工梭梭林土壤种子库和地上植被多样性指数

Fig.6 Species diversity index of soil seed bank and aboveground vegetation of *H. ammodendron* plantations at different degradation stages

D_{ma} : Margale 丰富度指数 Margale; D_{sim} : Simpson 优势度指数 Simpson; H' : Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener; J_{sw} : Pielou 均匀度指数 Pielou

3 讨论

通过对民勤绿洲边缘人工梭梭林不同衰退阶段土壤种子组成分析研究,发现种子库主要以 1 年生草本植物主,这与赵文智对科尔沁沙地土壤种子库^[30]、刘晓霞对浑善达克沙地土壤种子库研究结果类似^[31]。这可能是由于干旱沙区降雨量极少,并且几乎集中分布在 7—9 月份期间,只有五星蒿、盐生草、画眉草等短命沙生植物才能完成生命周期,并产生大量种子。同时,4 种林地种子库 77.78% 物种分属于 42.86% 科,22.22% 物种分属于 57.14% 科,物种均属于单属,这与党荣理等人对西北干旱区植被科属组成特征研究相一致^[32-33]。此

外,草本植物种子库优势种演替经历了五星蒿、盐生草、画眉(ND、SLD)→五星蒿、画眉草、虎尾草(MD)→画眉草、猪毛蒿(SD)3个阶段,木本植物种子优势种演替经历了沙蒿(ND)→红砂(SLD、MD、SD)两个阶段,这意味着林地种子库物种逐渐由沙生植物向沙旱生植物演替。

土壤种子库和地上物种共有种反映土壤种子库与地上植物的协调演替能力,揭示现阶段土壤种子库对地上植物的贡献能力,共有物种数的多少受研究区植被特征、生境条件以及外界干涉等因子的影响^[34-36]。很多研究认为在演替初期两者的相似程度较高,演替的后期土壤种子库与地上植物组成存在显著差异^[10]。在本研究中,在梭梭林从ND→SLD演替过程中,土壤种子库物种与地上植被物种相似性逐渐增大,但从SLD→SD演替过程中,土壤种子库物种与地上植被物种相似性越来越小,尤其是木本植物更为明显,这意味着人工梭梭林ND向SLD过渡阶段,林地植被演替处于演替初期,从SLD向SD阶段过渡过程中,林地木本植物演替已步入后期。随人工梭梭林衰败程度加剧,种子库中草本植物优势种与其地上植被优势种的相似性呈现出阶段性的减小趋势,但木本植物两者相似性急剧增大,并在MD阶段两者完全相同,这说明林地植物群落草本植物仍然处于不稳定状态,而木本植物在梭梭林中衰败期已达到一个阶段性稳定期。

土壤种子库数量特征是植被自然恢复的物质基础,也是判断地上植被恢复能力依据^[37]。研究资料表明:沙漠区最小的种子库密度大于1000粒/ m^2 ^[38],库布齐沙漠东段固定沙丘、半流动沙丘和流动沙丘土壤种子库分别为2276、2099、1183粒/ m^2 ^[37],腾格里南缘人工固沙区土壤种子库密度约为1516粒/ m^2 ^[39]。在本研究中,ND、SLD、MD、SD阶段种子库密度分别是1087、2539、2453、2178粒/ m^2 ,这与前人对其他沙漠区土壤种子库密度研究结果相一致。同时,随人工梭梭林衰败程度加剧草本植物土壤种子库密度先急剧增大再缓慢减小,木本植物种子库密度一直处于持续增大状态,这说明人工梭梭林衰败过程中土壤种子库并未出现衰败现象。

土壤种子库密度与地上植被密度间关系能有效地反映出植物种子成苗率、繁殖更新方式以及结实能力等。赵丽娅等对科尔沁沙地南部地上植被密度与土壤种子库密度间关系研究表明,二者间存在极显著正相关,其关系符合二次曲线^[36]。O'Connor和Pickett发现,地上植被密度与土壤种子库密度存在显著的相关性,而Lauenoth等人报道地上植被密度与种子库密度间无显著的相关性^[40-41]。在本研究中,在人工梭梭林衰败过程中土壤种子库密度与地上植被密度间一直存在一定的正相关关系,这与前人的研究具有一定相似性。研究结果也说明林地植被不仅以种子繁殖来实现种群更新,同时还具有较高的结实能力。此外,草本植物的相关系数先急剧增大后相对稳定,木本植物的相关系数一直持续增大,表明人工梭梭林衰败过程中地上植被与土壤种子库间的相互依赖性逐渐增大,特别是木本植物。

植物群落或土壤种子库多样性指数通常用于判断群落或生态系统的稳定性指标。在植物群落的变化过程中,土壤种子库与地上植被相比,通常具有更高的稳定性^[41-42]。刘庆艳等对三江平原沟渠土壤种子库及地上植被多样性指数开展了研究,结果表明种子库多样性指数动态变化幅度要小于地上植被^[43]。本研究中发现,人工梭梭林从SLD→MD过渡时草本植物土壤种子库多样性指数变化幅度小于地上植被,但ND→SLD、MD→SD过渡时草本植物种子库物种多样性指数变化幅度均大于其地上植被多样性指数;同时,木本植物除了ND→SLD过渡阶段种子库 D_{ma} 指数值及其变化幅度大于地上植被之外,种子库多样性指数在其它演替阶段的变化幅度均小于其地上植被。ND→SLD或MD→SD阶段土壤种子库部分指数变化幅度大于地上植被现象可能是由于ND林地表层未固定,长期受风蚀与沙埋的干预,地上植被结实率低、部分植物种子被风媒迁移或沙埋,最终导致0—10cm土壤种子库储藏量小,同时地上植被总株数也较小,最终呈现出了多样性指数异常变化。在干旱沙漠区,一年生草本植物属于机会主义者植物,植物群落的稳定性由木本及多年生草本决定,因此,在人工梭梭林衰败过程中,标志植物群落稳定性的物种土壤种子库多样性指数变化幅度小于其地上植被,这也与前人研究结果相一致^[43-44]。

基于以上研究结得出,民勤人工梭梭林衰败过程中林地植物群落发生了由沙生植物群落向沙旱生植物群落的演替,林地土壤种子库有能力维系植物群落的可持续发展。因此,建议对干旱沙区人工固沙林重建或者已形成土壤结皮的衰败林修复时,应该将诸如红砂之类的典型沙旱生植物作为造林材料,并认为为了梭梭林

复壮而采取破土或者破坏地上生物结皮的措施是不科学的。

4 结论

通过对民勤绿洲边缘人工梭梭林衰败过程中土壤种子库动态变化及其与地上植被关系研究,得出以下结论:1)人工梭梭林衰败过程中,林地土壤种子库物种优势种发生从沙生植物向沙旱生植物的演替,草本植物物种组成一直处于变化状态,木本植物物种组成在梭梭林衰败中后期已达到稳定状态。2)随梭梭林衰败程度加剧,草本植物和木本植物种子库密度均远远大于对照,且木本植物种子库密度仍处于持续增大趋势;种子库密度与地上植被密度间一直存在一定的正相关关系,地上植被与种子库的相互依赖性逐渐增大。3)梭梭林衰败初期(SLD)至后期(SD),植物群落中木本植物及其种子库 D_{ma} 、 D_{sim} 、 H' 、 J_{sw} 指数均逐渐减小,其种子库的变化幅度小于地上植被。4)梭梭林衰败中后期,植物群落处于稳定发育状态,同时建议红砂应作为干旱荒漠区人工植被建植的主要物种之一。

参考文献 (References):

- [1] Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *Journal of Ecology*, 1979, 67(3): 893-921.
- [2] Shaukat S S, Siddiqui I A. Spatial pattern analysis of seeds of an arable soil seed bank and its relationship with above-ground vegetation in an arid region. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(3): 311-327.
- [3] Milberg P, Hansson M L. Soil seed bank and species turnover in a limestone grassland. *Journal of Vegetation Sciences*, 1994, 5(1): 35-42.
- [4] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 552-560.
- [5] Vandvik V, Klanderud K, Meineri E, Måren I E, Töpper J. Seed banks are biodiversity reservoirs; species-area relationships above versus below ground. *Oikos*, 2016, 125(2): 218-228.
- [6] 赵成章, 张起鹏. 祁连山退化草地狼毒群落土壤种子库的空间格局. *中国草地学报*, 2010, 32(1): 79-85.
- [7] 李秋艳, 赵文智. 干旱区土壤种子库的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 350-358.
- [8] 马全林, 张德魁, 刘有军, 靳虎甲, 陈芳. 石羊河中游沙漠化逆转过程土壤种子库的动态变化. *生态学报*, 2011, 31(4): 989-997.
- [9] 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. *生态学报*, 2010, 30(2): 399-407.
- [10] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 吴承祯, 洪伟. 汶川地震生态治理区土壤种子库及其与地上植被的关系. *中国生态农业学报*, 2015, 23(1): 69-79.
- [11] 冯海云, 何利平, 朱明奕, 李胜业. 国内外土壤种子库研究情况对比分析. *环境科学与管理*, 2013, 38(3): 152-157.
- [12] 王俊, 白瑜. 土壤种子库研究的几个热点问题. *生态环境*, 2006, 15(6): 1372-1379.
- [13] 唐毅, 刘志民. 沙丘生态系统种子库研究现状、趋势与挑战. *植物生态学报*, 2012, 36(8): 891-898.
- [14] 赵丽娅, 李兆华, 李锋瑞, 赵哈林. 科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究. *生态学报*, 2005, 25(12): 3204-3211.
- [15] 李兴, 蒋进, 宋春武, 陈明, 殷文娟, 张恒. 不同坡向梭梭幼苗的生长状况和适应特征. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 101-105.
- [16] 田媛, 李建贵, 潘丽萍, 赵岩. 梭梭萌生与初期存活的关键影响因素. *生态学报*, 2010, 30(18): 4898-4904.
- [17] 常兆丰. 民勤人工绿洲的形成、演变及其可持续性探讨. *干旱区研究*, 2005, 25(1): 1-9.
- [18] 刘立超, 李守中, 宋耀选, 张志山, 李新荣. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 191-195.
- [19] 李守中, 肖洪浪, 罗芳, 宋耀选, 刘立超, 李守丽. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 228-233.
- [20] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选, 李金贵, 刘立超. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 612-616.
- [21] 陈荣毅, 张元明, 魏文寿, 王红玲, 吴楠, 张静. 不同沙丘部位和不同结皮类型对土壤种子库的影响. *干旱区研究*, 2008, 25(1): 107-113.
- [22] 苏延桂, 李新荣, 陈应武, 谭会娟, 贾荣亮. 生物土壤结皮对荒漠土壤种子库和种子萌发的影响. *生态学报*, 2007, 27(3): 938-946.
- [23] 陈芳, 纪永福, 张锦春, 丁峰, 刘有军, 刘虎俊, 王芳琳. 民勤梭梭人工林天然更新的生态条件. *生态学杂志*, 2010, 29(9): 1691-1695.
- [24] 王继和, 马全林. 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策. *西北植物学报*, 2003, 23(12): 2107-2112.
- [25] 张锦春, 纪永福, 王芳林, 陈芳, 王基金, 王功时, 曹虎. 民勤退化人工梭梭种群雨养恢复试验研究. *西北林学院学报*, 2010, 25(1):

77-81.

- [26] 赵明, 郭树江. 中国生态系统定位观测与研究数据集·草地与荒漠生态卷·甘肃民勤站(1961—2006). 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [27] 刘林馨. 小兴安岭森林生态系统植物多样性及生态服务功能价值研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012: 18-19.
- [28] 沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2821-2825.
- [29] 马全林, 卢琦, 魏林源, 靳虎甲. 干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征. 生态学报, 2015, 35(7): 2285-2294.
- [30] 赵文智, 白四明. 科尔沁沙地围封草地种子库特征. 中国沙漠, 2001, 21(2): 204-208.
- [31] 刘晓霞, 王明玖. 浑善达克沙地土壤种子库结构与动态特征. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(2): 42-46.
- [32] 党荣理, 潘晓玲. 西北干旱荒漠区种子植物科的区系分析. 西北植物学报, 2002, 22(1): 24-32.
- [33] 何芳兰, 刘世增, 李昌龙, 金红喜. 甘肃河西戈壁植物群落组成特征及其多样性研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 74-78.
- [34] Augusto L, Dupouey J L, Picard J F, Ranger J. Potential contribution of the seed bank in coniferous plantations to the restoration of native deciduous forest vegetation. *Acta Oecologica*, 2001, 22(2): 87-98.
- [35] Funes G, Basconcelo S, Díaz S, Cabido M. Edaphic patchiness influences grassland regeneration from the soil seed-bank in mountain grasslands of central Argentina. *Austral Ecology*, 2001, 26(2): 205-212.
- [36] 赵丽娅, 李锋瑞, 王先之. 草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化特征. 生态学报, 2003, 23(9): 1745-1756.
- [37] 于洁, 高丽, 闫志坚, 王育青. 库布齐沙漠东段不同演替阶段沙丘土壤种子库变化特征. 中国草地学报, 2015, 37(4): 80-85.
- [38] Brown J H, Reichman O J, Davinson D W. Granivory in desert ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1979, 10: 201-227.
- [39] 崔艳, 王新平, 冯丽, 苏延桂. 天然固定沙地与人工固沙植被区土壤种子库的比较研究. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1114-1119.
- [40] Coffin D P, Lauenroth W K. Spatial and temporal variation in the seed bank of a semiarid grassland. *American Journal of Botany*, 1989, 76(1): 53-58.
- [41] O'Connor T G, Pichett G A. The influence of grazing on seed production and seed banks of some African savanna grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(1): 247-260.
- [42] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 郭泉水, 封晓辉, 王瑞丽. 三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系. 生态学报, 2010, 30(21): 5821-5831.
- [43] 刘庆艳, 王国栋, 姜明, 吕宪国, 娄彦景. 三江平原沟渠土壤种子库特征及其与地上植被的关系. 植物生态学报, 2014, 38(1): 17-26.
- [44] 王国栋, 吕宪国, 姜明, 王铭, 赵魁义, 娄彦景. 三江平原恢复湿地土壤种子库特征及其与植被的关系. 植物生态学报, 2012, 36(8): 763-773.