

黄土丘陵沟壑区红砂灌丛土壤种子库及其自然更新潜力评估

杨彩红, 李毅, 单立山, 段雅楠

(甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 对黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被土壤种子库的特征及红砂灌丛植被自然更新潜力进行分析和评估, 以说明红砂灌丛土壤种子库在植被恢复与重建中的重要作用。[方法] 采用土壤种子库“萌发法”(每个地段 10 个 2 m×2 m 样方内分表土层 0—2 cm 和 2—5 cm 土层采集土样)及野外植被调查方法, 对黄土丘陵沟壑不同坡位红砂灌丛土壤种子库进行研究。[结果] 黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被土壤种子库发芽试验共观察到的 4 251 株幼苗, 分属于 9 个物种。土壤种子库密度在 100~1 000 粒/m², 物种数在 0.8~1.2 种/0.01 m², 下坡段的土壤种子库平均种子密度和平均物种数均比上坡段高。3 个坡段的 2 个层次的平均种子密度和平均物种数均随土层加深而减小。3 个坡段土壤种子库和地上植被的组成物种多为草本植物和红砂灌丛, 地上植被与其土壤种子库的密度及物种数均呈不显著相关; 物种组成的 Sorensen 相似性指数较高, 均达到 0.60 以上, 且土壤种子库比地上植被具有更高的物种丰富度。[结论] 黄土丘陵沟壑区红砂灌丛具有依靠土壤种子库实现自然更新的潜力, 但由于物种组成种类较少, 现存灌丛植被一旦遭到破坏, 仅靠土壤种子库恢复现存植被是困难的, 需要在对自然恢复潜力评估的基础上, 积极采取人工保护促进自然恢复的策略。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 红砂; 土壤种子库; 植被恢复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0105-05

中图分类号: S714.3

文献参数: 杨彩红, 李毅, 单立山, 等. 黄土丘陵沟壑区红砂灌丛土壤种子库及其自然更新潜力评估[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 105-109. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.020

Soil Seed Bank and Natural Regeneration Potential of *Reaumuria Soongorica* Shrubs at Different Slope Positions in Loess Hilly and Gully Region

YANG Caihong, LI Yi, SHAN Lishan, DUAN Yanan

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] To evaluate and predict the natural regeneration potential of *Reaumuria soongorica* shrub vegetation in the hilly-gullied loess plateau region, we investigated the soil seed bank and its associated vegetation in the upper, middle and the lower slope site. [Methods] Seed germination method and field vegetation survey were both used. Ten plots(2 m×2 m) at each site were established for vegetation investigation and seed bank sampling at layers of 0—2 cm and 2—5 cm. [Results] A total of 4 251 seedlings belonging to 9 species of the soil seed banks were recorded. The soil seed bank density was 100~1 000 seed/m² and the number of species was 0.8~1.2 species/0.01 m². Both the mean seed density(seed/m²) and the mean number of species(species/0.01 m²) were found to be higher in the lower slope site than that in the upper slope site. The mean values of the seed density and the species number for soil seed bank at 0—2 cm soil layer were significant higher than that of 2—5 cm soil layer for all three slope sites. Most of the species found in the soil seed banks and in aboveground vegetations at the three slope sites were herb and *Reaumuria soongorica* shrub vegetation. The mean density and the mean number of species in the soil seed banks were not correla-

收稿日期: 2015-09-30

修回日期: 2015-12-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“‘红砂自然更新过程的生态学研究(31360205)’”, “红砂幼苗发生及根系生长对降水变化的响应(41361100)””; 甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金(GSAU-STS-1425); 国家国际科技合作专项(2012DFR30830); 甘肃省科技支撑计划项目(1204NKCA084)

第一作者: 杨彩红(1981—), 女(汉族), 甘肃省白银市人, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治、节水农业等方面研究。E-mail: yangch@gsau.edu.cn.

通信作者: 李毅(1962—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 教授, 博士生导师, 主要从事林木遗传育种和抗旱树种研究。E-mail: liyi@gsau.edu.cn.

ted with the ones of vegetation. Soil seed bank was found had high similarity(Sorensen's index >0.60) to its associated vegetation in species composition. And the species richness of soil seed banks was higher than that of aboveground vegetations. [Conclusion] Natural regeneration potential of *Reaumuria soongorica* shrub vegetation by germination of soil seed banks in the hilly-gullied loess plateau region was low. Once the present vegetation is destroyed, the natural restoration of vegetations is hardly possible. Therefore, artificial restoration strategy in combination with natural regeneration should be applied to promote vegetation recovery.

Keywords: hilly-gullied Loess plateau region; *Reaumuria soongorica* shrub vegetation; soil seed bank; vegetation restoration

土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部存活种子的总和^[1],是繁殖体的储备库,很大程度上决定了植被恢复的进度和方向,是植被发生、发展和演替的基础^[2]。在群落自然更新过程中,种子库的种子数量、质量、组成及其空间格局,对群落组成、结构、多样性和生产力都有关键性的影响^[3]。近 10 a 多来,随着对干旱区植被自然更新生态过程认识程度的深入以及研究技术和方法的不断完善,国内外学者开始在干旱区背景内围绕土壤种子库数量特征、物种结构特征、土壤种子库与地上植被的关系对自然更新潜力开展研究工作^[4-8],研究表明干旱区土壤种子库的数量特征、种类组成、空间分布格局以及与地上植被的关系是认识干旱区植被自然更新潜力的重要途径,可以为干旱区植被恢复提供科学依据。

黄土高原丘陵沟壑区位于黄土高原的北部,由于长期受地理位置、气候变化、地形地貌、土壤易蚀性及人类活动等多种因素对群落植被破坏的影响,使其水土流失加剧,植被稀疏,物种多样性衰减,生态环境恶化^[8];其中以红砂为优势种、建群种的灌丛植被作为中国西北荒漠地区的重要植被类型,受到自然和人类活动的长期胁迫,致使其分布面积缩小,种群数量减少,在更新上产生断层,严重影响到该区域的生态稳定性。因此,通过植被恢复和重建来改善生态环境、治理水土流失,已成为该地区最重要的治理措施之一。中国近年来在干旱区背景内围绕土壤种子库对自然更新潜力的影响开展了大量的试验研究^[9-15]。然而,有关红砂灌丛植被恢复演替进程中土壤种子库的研究报道很少。本研究以黄土丘陵沟壑区红砂种群典型分布区为研究对象,开展红砂灌丛植被土壤种子库的组成、密度特征及种子库的物种多样性等进行调查研究,以说明红砂灌丛土壤种子库在植被恢复与重建中的作用。

1 材料和方法

1.1 研究地区

研究区位于甘肃省兰州市南北两山,地理位置为 103°21'—104°00'E, 35°53'—36°33'N,属典型黄土丘

陵沟壑区,海拔 1 550~1 950 m,属暖温带半干旱大陆性季风气候,年太阳辐射 1.26×10^5 kW/m²,年平均光照时数为 2 607 h,年极端最高温 39.1 ℃,年极端最低温 -23.1 ℃,年平均气温 9.3 ℃,≥10 ℃ 的活动积温 3 354.6 ℃,无霜期 185~200 d,最大冻土层 1.2 m,年平均降水量 311.7 mm,多集中在 7—9 月,占全年降水量的 52%~66%,蒸发量是降水量的 5 倍多,干旱状况十分严重。土壤为黄土母质上发育起来的淡灰钙土,质地疏松,抗侵蚀能力弱,易崩塌,有机质含量 0.5%~1.5%,pH 值 8~9。山地植被类型基本属典型草原向荒漠草原的过渡类型,植被覆盖稀疏,种类贫乏,地表植被主要由旱生和盐生类型的植物组成。

1.2 样地设置

为了更好地了解黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被土壤种子库特征及其空间异质性,在种群水平上采用样方法调查取样,选择地貌、坡向和坡度相近的同一个直型山坡上的上坡、中坡、下坡 3 个样地,样地面积为 100 m×50 m。具体取样时,分别于每个地段设置 2 条长 50 m 的水平样线,垂直间隔 10 m 的平行样线,然后在每条样线上设置 5 个大小为 2 m×2 m 的样方,样方间隔 10 m。每个地段共设置 10 个样方,3 个地段共设置 30 个样方用于地上植被调查与种子库取样(表 1)。

表 1 研究样地基本情况

坡位	纬度	经度	海拔/m	坡向	坡度/(°)
上坡	36°05'99"	103°46'03"	1 743	阳坡	43
中坡	36°05'96"	103°46'07"	1 716	阳坡	35
下坡	36°05'93"	103°46'12"	1 697	阳坡	30

1.3 土壤种子库采样方法

土壤种子库调查在种子萌发前的 4 月初,土壤种子库取样的较佳时间进行。具体的土样采集是在每个 2 m×2 m 的样方内,利用两条水平线和一条垂直线将其均匀分割成 6 个等面积的小区,在每个小区的中央位置设置 1 个大小为 20 cm×20 cm 的小样方,用环刀(直径 20 cm)分层(0—2 cm,2—5 cm)取样,

最后共采集 360 份(3 个地段×2 条样线×5 个样方×2 个土层×6 个等面积小区)土壤种子库样品。取样时尽量减少对样方的破坏,取样后逐一标记各样地,以便进一步进行地上植被调查。

1.4 土壤种子库萌发试验

利用萌发法确定土壤种子库的密度、物种数、物种组成。将野外采集回的土样带回实验室后,在室温条件下自然干燥,过 5 mm 的土壤筛,去掉杂物,手工把土样碾开,使其尽量分散,并保证种子的完整性。然后将过筛土样置于铺垫 2 mm 厚无种子细沙(细沙置于 150 ℃烘箱内烘 4 h)的发芽盘(长 35 cm,宽 35 cm,高 5 cm)中,浇足水,然后将发芽盘置于试验台上让其自然萌发,每天定时(8:00,18:00)喷洒适量的水分,使发芽盘内土壤保持湿润状态,温度控制在 25 ℃左右,相对湿度变化平均为 60%。定期(每 2 d 为 1 周期)观测种子萌发状况,对已萌发的幼苗进行种类鉴定,种类鉴定主要以植物的形态特征为主,幼苗鉴定计数后及时清除,暂时不能鉴定的幼苗将其进行标记后移栽至盘外,直至幼苗长到能鉴定为止;整个过程持续至盘中不再有幼苗长出,然后将土样搅拌混合,继续观测,直至连续 6 周土样中不再有种子萌发后结束萌发试验。

1.5 地上植被特征调查

地上植被调查于当年夏季进行,此时,植物多样性通常达到一年中的最大值(\approx)。调查在土壤种子库取样的样地内进行,在每个土壤种子库取样的 2 m×2 m 样方中心设置 1 个 1 m×1 m 样方,调查 1 m×1 m 样方内所有植物种类及其个体数。

1.6 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 统计软件对所得的数据进行分析,采用单因素方差分析对植物种子库密度、物种多样性等进行差异显著性分析。(1) 种子库特征:种子密度、物种数和物种组成。(2) 种子库与地上植被相关性:Pearson 相关分析。(3) 种子库和地上植被物种组成的相似性:Sorensen 的相似系数计算,计算公式为:

$$SC=2w/(a+b)$$

式中:SC——相似性系数; w ——土壤种子库和地上植被共有的物种数; a,b ——土壤种子库和地上植被的植物种数。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库物种组成与密度

3 个坡段土壤种子库发芽试验共观察到 4 251 株幼苗,分属于 9 个物种。其中,上坡段观察到 1 242

株、6 个物种,中坡段 1 468 株、7 个物种,下坡段 1 541 株、9 个物种。土壤种子库平均种子密度在 100~1 000 粒/m²(表 2)。方差分析结果显示,下坡段的土壤种子库密度比上坡段的高,而与中坡段间的差异不显著;下坡段土壤种子库平均物种数也比上坡段的高,3 个地段的差异均不显著。在土壤种子库物种构成上,灌木种和草本种占据绝对优势,其中上坡段灌木亚菊(*Ajanía pallasiana*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、针茅(*Stipa capillata*)、红砂(*Reaumuria*)的相对多度较高,分别占种子总个体数的 24.5%,42.4%,13.9%,20.1%;中坡段狗尾草、针茅、红砂的相对多度较高,分别占种子总个体数的 37.8%,24.4%,14.5%;下坡段狗尾草、小萱草(*Hemerocallis dumortieri*)、针茅、红砂的相对多度较高,分别占种子总个体数的 42.8%,30.4%,24.0%,11.7%。3 个地段土壤种子库中的灌木种均以红砂为主。

表 2 土壤种子库的植物种类及密度

坡位	平均种子密度/ (粒·m ⁻²)	平均物种数 (种/0.01 m ²)
上坡段	1 241.7±213.1 ^a	0.8±0.16 ^b
中坡段	1 467.8±304.2 ^b	0.9±0.14 ^b
下坡段	1 541.3±289.5 ^a	1.2±0.21 ^a

注:表中数值为平均值±标准误($n=20$),数值后的字母表示进行 LSD 多重比较时在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性;同一列中不同字母表示差异显著。

2.2 种子库中植物种子数量及其在垂直方向上的分布

图 1 为研究区植物种子数量及其在垂直方向上的分布情况。由图 1 可以看出,上坡段的土样萌发出的 1 242 粒种子中,其中 0—2 cm 土层中有 877.5 粒种子,2—5 cm 土层有 364.9 粒种子,0—2 cm 土层种子密度显著大于 2—5 cm 土层;中坡段的土样萌发出的 1 468 粒种子中,0—2 cm 土层中有 980.3 粒种子,2—5 cm 土层有 487.8 粒种子,0—2 cm 土层与 2—5 cm 土层种子密度差异不显著;下坡段的土样萌发出的 1 541 粒种子中,0—2 cm 土层中有 1 031.3 粒种子,2—5 cm 土层有 509.7 粒种子,2 个层次间种子密度差异显著。3 个坡段的 2 个层次的平均种子库密度均随土层加深而减小。

上坡段的土样共萌发出 6 个种,其中 0—2 cm 层的土中有 4 个种,2—5 cm 土层中有 2 个种,0—2 cm 土层与 2—5 cm 土层物种数差异显著;中坡段的土样共萌发出 7 个种,其中 0—2 cm 层的土中有 4 个种,2—5 cm 土层中有 3 个种,0—2 cm 土层与 2—5 cm 土层物种数差异显著;下坡段的土样共萌发出 9 个

种,其中 0—2 cm 层的土中有 6 个种,2—5 cm 土层中有 3 个种,0—2 cm 土层与 2—5 cm 土层物种数差

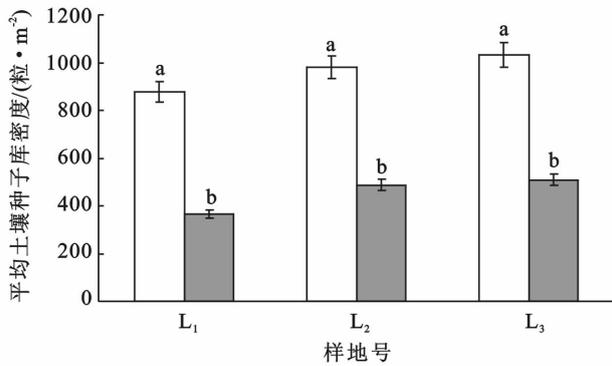
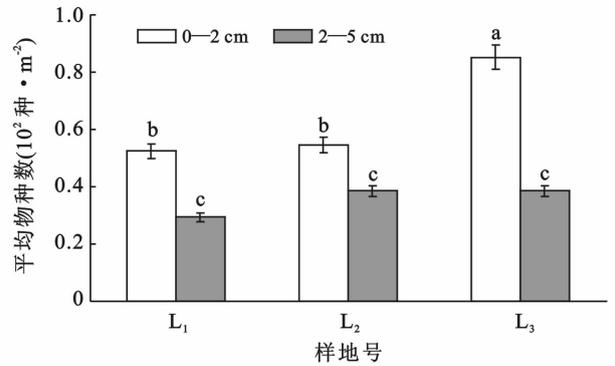


图 1 研究区植物种子数量及其在垂直方向上的分布

异显著。3 个坡段的两个层次的平均物种数均随土层加深而减小。



2.3 土壤种子库与地上植被的关系

上坡段、中坡段、下坡段 3 个地段的土壤种子库的物种丰富度分别为 6, 7 和 9, 相应地上植被的物种丰富度分别为 5, 5 和 8, 说明 3 个坡段的土壤种子库相对于地上植被均具有较高的物种丰富度。3 个坡段的土壤种子库和地上植被中的物种大多数为草本植物, 一年生草本和多年生草本在 3 个坡段的土壤种子库和地上植被中均占总种数的 50% 以上, 其次为灌木, 以红砂和灌木亚菊为主, 在 3 个坡段的土壤种子库和地上植被中可占总种数的 10% 左右。上坡段的土壤种子库和地上植被各生活型的共有种数分别为: 1, 0, 1, 1, 0, 中坡段的土壤种子库和地上植被各生活型的共有种数分别为: 1, 1, 1, 2, 0, 下坡段的土壤种子库和地上植被各生活型的共有种数分别为: 1, 1, 3, 2, 1; 3 个坡段的土壤种子库和地上植被的各个生活型的共有种数均较多(表 3)。

表 3 研究区 3 个坡段土壤种子库与地上植被的植物生活型组成

生活型组成	上坡段 (s/v)	中坡段 (s/v)	下坡段 (s/v)
灌木	1/1	1/1	1/1
亚灌木	1/0	1/1	1/1
多年生草本	1/2	2/1	3/3
一年生草本	3/1	3/2	3/2
藤本	0/1	0/0	1/1

注: s 代表土壤种子库; v 代表地上植被。下同。

Pearson 相关分析表明(表 4), 土壤种子库与相应地上植被的土壤种子库密度在上坡段($r=0.135$, $n=20$, $p=0.727$); 中坡段($r=0.014$, $n=20$, $p=0.534$)和下坡段($r=0.026$, $n=20$, $p=0.947$)均呈不显著相关; 土壤种子库与相应地上植被的物种数在上坡段($r=0.112$, $n=20$, $p=0.598$); 中坡段($r=$

0.026 , $n=20$, $p=0.893$)和下坡段($r=0.013$, $n=20$, $p=0.726$)也呈均不显著相关。利用 Sorensen 相似性指数对土壤种子库及地上植被的物种组成进行比较发现, 上坡段、中坡段和下坡段的地上现存植被物种组成具有较高的相似性, 土壤种子库物种组成也具有较高的相似性, 且中坡段的土壤种子库和地上植被的物种组成相似性较上坡段和下坡段的高。

表 4 研究区 3 个坡段土壤种子库与地上植被物种组成的 Sorensen 指数

坡段	上坡段	中坡段	下坡段
上坡段	0.909sv	0.923s	0.800s
中坡段	0.800v	0.833sv	0.750s
下坡段	0.769v	0.615v	0.824sv

注: v 前的数据表示不同的地上植被物种组成的相似性; s 前的数据表示不同的土壤种子库间物种组成的相似性; sv 前的数据表示土壤种子库与其相应的地上植被间物种组成的相似性。

3 讨论

土壤种子库密度可以反映潜在植被群落的数量特征, 不仅与地上植被类型有关, 也受到植物物种的繁殖方式、生境条件及演替条件等因素的影响。本研究发现, 黄土丘陵沟壑区红砂灌丛的土壤种子库密度在 $100\sim 1\ 000$ 粒/ m^2 , 略低于草地和耕地土壤种子库密度($103\sim 106$ 粒/ m^2), 大于沙漠地区短命植物的土壤种子库密度($10\sim 150$ 粒/ m^2)^[13]。本研究中, 红砂灌丛植被不同坡段的土壤种子库的密度和物种数也存在较大差异, 下坡段的水分和养分条件相对较好, 加之风沙把上坡段的植物种子吹散至下坡段, 使其土壤种子库的密度和物种数较高, 因为水分是影响黄土丘陵沟壑区植株生长与有性繁殖的关键因素^[16], 研究区域上坡段的干旱程度较为剧烈, 为保证亲代的存活, 植物会降低繁殖能力去减少延续后代的种子, 种

子的产量也会较低,向土壤种子库中输入的种子量也较低,因而土壤种子库的库容量较小。黄土丘陵沟壑区土壤种子库存在明显的垂直地段差异性,并与水分状况紧密相关。

成熟的种子扩散到土壤表面,受到其自身形态特征和外界干扰影响进入土层较深的部位,一般随着土壤深度的增加,单位面积种子数目下降,下降趋势与种子形状、土壤环境、干扰或其他物理因素有关^[17]。有研究^[18]表明,垂直方向上的这种梯度差异可能与土壤的物理性质密切相关,如果土壤的疏松程度高,则有利于种子在土壤中的移动。本项研究发现,土壤种子库平均密度及平均物种数随土层的垂直变化规律与其它针对黄土丘陵沟壑区土壤种子库的研究结果相一致^[19]。而从物种丰富度指数方面来看,下坡段地上植被和土壤种子库具有更高的物种丰富度,表明黄土丘陵沟壑区下坡段红砂灌丛植被的潜在更新能力更强。3个坡段的土壤种子库均高于地上植被,说明这些比地上植被多出来的植物种类可能是来自于历史植被的积累或其它地段群落的成熟种子随风扩散而来的,而且这些种子多具有抵抗土壤侵蚀的特性。此外,黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被土壤种子库及相应地上植被的物种大多为多年生植物,是土壤种子库中留存较多物种的原因之一。

土壤种子库与地上植被有着密切的关系,一方面地上植被是土壤种子库的直接来源,地上植物种子的产量影响着土壤种子库数量动态;另一方面,土壤种子库的种子通过参与群落的自然更新又影响着地上植物群落结构与组成及物种多样性的维持^[20]。本研究发现,黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被下的土壤种子库密度及物种数与相应地上植被的种子密度及物种数均无明显的相关性,同地上植被密度与土壤种子库密度之间存在显著的正相关的研究结果^[21]不一致。究其原因主要是由于黄土丘陵沟壑区水土流失严重,植被覆盖率低,春、秋季频繁的大风,使种子长距离扩散,加之严重干旱的制约,植物繁殖主要靠无性萌蘖来维持种群发展。

土壤种子库与其相应地上植被的物种组成及其相似性是判断植被潜在更新能力的重要依据^[16]。黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被土壤种子库和地上灌丛中组成相似性系数较高,均达到 0.600 以上,主要是因为不同坡段的土壤种子库中具有相同的草本植物种,其中,上坡段和中坡段土壤种子库之间的相似性系数最大,是因为上坡段和中坡段土壤种子库中具有近乎相同的植物种数,此外,样地相邻也对其产生一定的影响。综合分析表明,黄土丘陵沟壑区红砂灌丛

植被下的土壤种子库密度、物种多样性、丰富度都不是很高,植物种类相对较少,现存灌丛植被一旦遭到破坏,要依靠土壤种子库实现现存植被自然更新恢复是困难的。因此,黄土丘陵沟壑区植被恢复需要以现有植被潜在更新能力为基础,充分采用人工保护与促进植被恢复的策略。

4 结论

黄土丘陵沟壑区红砂灌丛植被演替过程中,土壤种子库共出现 6 科 9 种植物,包括一年生草本、多年生草本、半灌木和灌木,其中草本植物比例达到 70.2%~87.6%,是红砂灌丛植被土壤种子库的主体。不同坡段,土壤种子库平均种子密度和平均物种数以下坡段最高,分别达到 1 541.3 粒/m², 1.2 种/0.01 m²,上坡段、中坡段、下坡段间差异不显著。红砂灌丛植被土壤种子库主要分布在 0—2 cm 土层中,其土壤种子库密度是 2—5 cm 土层的 2.12 倍,其中以下坡段 0—2 cm 土壤种子库密度最高,达到 1 031.3 粒/m²。3 个坡段土壤种子库和地上植被的组成物种多为草本植物和红砂灌丛,物种组成的 Sorensen 相似性指数均在 0.60 以上,且土壤种子库比地上植被具有更高的物种丰富度。该研究结果进一步证明了红砂灌丛植被在植被恢复中的重要性。

[参 考 文 献]

- [1] 杨涛,王得祥,周金星,等. 陕北黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落演替规律及物种多样性动态研究[J]. 西北林学院报, 2009, 24(5): 10-15.
- [2] Baskin J M, Baskin C C. Ecology of Soil Seed Banks. Physiology of Dormancy and Germination in Relation to Seed Bank Ecology[M]//Leck M A, Parker V T, Simpson R L. San Diego: Academic Press, California, 1989.
- [3] 李秋艳,赵文智. 干旱区土壤种子库的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 350-358.
- [4] Pugnaire F I, Lazaro R. Seed bank and under storey species composition in a semi-arid environment: The effect of shrub age and rainfall[J]. Annals of Botany, 2000, 86(4): 807-813.
- [5] Wang Chenghuan, Tang Long, Fei Shenfeng, et al. Determinants of seed bank dynamics of two dominant helophytes in a tidal salt marsh[J]. Ecological engineering, 2009, 35(5): 800-809.
- [6] Qiu Jie, Bai Yuguang, Fu Yongbi, et al. Spatial variation in temperature thresholds during seed germination of remnant *Festuca hallii* populations across the Canadian prairie[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 67(3): 479-486.

- 生物数量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4):84-86.
- [5] 焦秀梅, 刘月敏, 马华继. 温度对蔬菜废弃物厌氧发酵的影响[J]. 农业环境与发展, 2013(3):82-85.
- [6] 刘芳, 邱凌, 李自林, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵产气特性研究[J]. 西北农业学报, 2013, 22(10):162-170.
- [7] 李鸣雷, 商鸿生, 谷洁, 等. 促进农业废弃物腐解的复合微生物菌剂的筛选[J]. 西北农业学报, 2005, 14(2):101-104.
- [8] 张相锋, 王洪涛, 聂永丰, 等. 高水分蔬菜废物和花卉、鸡舍废物联合堆肥的中试研究[J]. 环境科学, 2003, 24(2):147-151.
- [8] 殷培杰, 孙军德, 石星群, 等. 微生物菌剂在鸡粪有机肥料堆制发酵中的应用[J]. 微生物学杂志, 2004, 24(6):43-46.
- [9] 李吉进, 邹国元, 孙钦平, 等. 蔬菜废弃物沤制液体有机肥的理化性状和腐熟特性研究[J]. 中国农学通报 2012, 28(13):264-270.
- [10] 黄国锋, 钟流举, 张振钿, 等. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5):813-818.
- [11] 胡国平, 曹靖, 杨海兴, 等. 无机氮与蔬菜废弃物耦合对土壤氮矿化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6):739-745.
- [12] 王洪涛, 陆文静. 农业固体废物处理处置与资源化技术[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2006.
- [13] 徐小军, 管锡军. 农村固体废物污染控制原理与资源化技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.
- [14] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2):98-100.
- [15] 陈世和, 张所明. 城市生活垃圾堆肥处理的微生物特性研究[J]. 上海环境科学, 1989, 8(8):17-20.
- [16] 刘艳伟, 吴景贵. 有机栽培基质的研究现状与展望[J]. 北方园艺, 2011(10):172-176.
- [17] 田赟, 王海燕, 孙向阳, 等. 农林废弃物环保型基质再利用研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2011(2):497-501.
- [18] 徐明磊. 番茄高可溶性固形物种质的创造及相关基因表达研究[D]. 重庆:西南大学, 2006.
- [19] 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性固形物含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(5):893-901.
- [20] 赵娜, 林威鹏, 蔡昆争, 等. 农畜粪便堆肥对番茄青枯病、土壤酶活性及土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(19):5327-5337.
- [21] Bending G D, Turner M K, Jones J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(8):1073-1082.

(上接第 109 页)

- [7] 张涛, 何明珠, 陈智平, 等. 干旱矿区废弃地重金属生境土壤种子库时空动态[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4):296-300, 307.
- [8] Erfanzadeh R, Hendrickx F, Maelfait J P, et al. The effect of successional stage and salinity on the vertical distribution of seeds in salt marsh soils [J]. Flora, 2010, 205(7):442-448.
- [9] 黄茂林, 梁银丽, 周茂娟, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区水土保持耕作及施肥下农田土壤种子库特征[J]. 生态学报, 2009, 29(7):3987-3994.
- [10] 陈宇, 焦菊英, 王宁, 等. 黄土丘陵区撂荒地不同侵蚀带土壤种子库特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1):1-5.
- [11] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库与地上植被的关系[J]. 草业学报, 2007, 16(6):30-38.
- [12] 张进虎, 王翔宇, 张亮霞, 等. 天然沙冬青土壤种子库特征研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(22):78-82.
- [13] 张涛, 田长彦, 孙羽, 等. 古尔班通古特沙漠地区短命植物土壤种子库研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5):675-681.
- [14] 赵丽娅, 李兆华, 李锋瑞, 等. 科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究[J]. 生态学报, 2005, 25(12):3204-3211.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Csontos P. Seed banks: Ecological definitions and sampling considerations [J]. Community Ecology, 2007, 8(1):75-85.
- [18] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4):552-560.
- [19] 袁宝妮, 李登武, 李景侠, 等. 黄土丘陵沟壑区植被自然恢复过程中土壤种子库特征[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6):215-222.
- [20] 袁玉欣, 王颖. 不同土地利用状况下土壤种子库与地表植被变化特征[J]. 中国造纸学报, 2004(S):400-403.
- [21] 赵凌平, 程积民, 王占彬. 持久种子库在黄土高原植被恢复中的作用[J]. 草业科学, 2013, 30(1):104-109.