

DOI: 10.20103/j.stxb.202312072672

苏宇航, 姜艳, 王永翠, 阿拉木萨. 基于捐赠土壤种子库方法的沙丘植被恢复模拟实验. 生态学报, 2024, 44(21): 9792-9804.

Su Y H, Jiang Y, Wang Y C, Alamusa. Simulation experiments on the restoration of dune vegetation based on the donated soil seed bank method. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9792-9804.

基于捐赠土壤种子库方法的沙丘植被恢复模拟实验

苏宇航^{1,2}, 姜 艳^{1,2}, 王永翠¹, 阿拉木萨^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:退化沙地土壤种子库数量不足限制了其自然恢复能力,传统的种子库添加植被恢复技术措施存在添加物种数量、配比难以确定的限制,针对上述问题,提出了捐赠土壤种子库的植被恢复方法,即从邻近植被生境相似的长期稳定群落转移包含土壤种子库的表层土壤进行受损区植被恢复的方法。该方法在受损湿地、草地和林地的恢复方面取得了较好的应用效果,但是该方法能否用于荒漠化区域的植被恢复尚未见报道。采用室内盆栽和模拟降雨相结合的实验办法,以长期稳定的固定沙丘为捐赠土壤种子库源区,以流动沙丘和半固定沙丘为受捐对象,对比分析了捐赠固定沙丘土壤种子库对流动沙丘和半固定沙丘植被恢复的效果,并模拟了降雨变化对恢复效果的影响作用。结果表明:1)捐赠土壤种子库显著提高了半固定沙丘和流动沙丘模拟处理的种子萌发数量和幼苗地上生物量,有利于促进流动沙丘和半固定沙丘向固定沙丘进行演替;2)捐赠土壤种子库方法在半固定沙丘的植被恢复效果优于流动沙丘;3)捐赠土壤种子库可以增加流动沙丘实现跨越式恢复的可能性,加快其向固定沙丘的演替进程;4)小幅度的降雨量增减对受捐区种子萌发数量和地上生物量无显著影响;5)极端降雨可以显著提高受捐区种子萌发数量和地上生物量。综上所述,在模拟实验条件下,捐赠土壤种子库技术可以有效地促进退化沙丘植被恢复,极端降雨事件对捐赠土壤种子库实施后的恢复效果影响更加显著。研究为捐赠土壤种子库在退化沙地植被恢复的野外实际应用提供了理论支持。

关键词:捐赠土壤种子库;模拟实验;种子萌发数量;生物量;降雨变化影响;沙地植被恢复

Simulation experiments on the restoration of dune vegetation based on the donated soil seed bank method

SU Yuhang^{1,2}, JIANG Yan^{1,2}, WANG Yongcui¹, Alamusa^{1,*}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The insufficiency of the seed bank in the degraded sandy lands limits their natural recovery capability. Traditional techniques for vegetation restoration by adding to the seed bank are constrained by difficulties in determining the number and ratio of added species. In response to these issues, researchers have proposed a method of vegetation restoration using donated soil seed banks, which involves transferring topsoil containing a soil seed bank from long-term stable communities with similar vegetation habitats to restore damaged areas. The method has shown good application effects in the restoration of the damaged wetlands, grasslands, and forests, but its applicability to restoration of desertification-prone areas has not yet been reported. This study combined indoor potted plant experiments and simulated rainfall to compare the effects of the donated soil seed bank method from a long-term stable fixed dune on the vegetation restoration of mobile and semi-fixed

基金项目:荒漠绿洲区水土生态安全提升与保障技术(2023YFF1304201);中国科学院战略先导科技专项子课题(XDA26020104)

收稿日期:2023-12-07; **网络出版日期:**2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: alamusa@iae.ac.cn

dunes, and to simulate the impact of rainfall changes on the restoration effects. The results indicated that: 1) The donated soil seed bank significantly increased the number of germinated seeds and aboveground biomass of seedlings in simulated treatments for semi-fixed and mobile dunes, which was beneficial for promoting the succession of mobile and semi-fixed dunes to fixed dunes; 2) The vegetation restoration effect of the donated soil seed bank method was better in semi-fixed dunes than in mobile dunes; 3) Donated soil seed bank could increase the possibility of leapfrog restoration in mobile dunes and accelerate their succession to fixed dunes; 3) The small increase or decrease in rainfall had no significant impact on the number of germinated seeds and aboveground biomass in the recipient area; 4) The extreme rainfall could significantly increase the number of germinated seeds and aboveground biomass in the recipient area. In summary, under the simulated experimental conditions, the technology of donated soil seed bank can effectively promote the restoration of degraded dune vegetation, and extreme rainfall events have more significant impact on the restoration effectiveness after implementing donated soil seed banks. The study provides theoretical support for the practical application of donated soil seed banks in the restoration of degraded sandy land vegetation.

Key Words: donated soil seed bank; simulation experiment; seed germination count; biomass; rainfall variations; sand land vegetation restoration

我国是世界上受到荒漠化影响较为严重的国家之一。根据 2020 年国家林业与草原局发布的第六次全国荒漠化与沙化调查报告显示,截止到 2019 年,全国荒漠化土地面积已经达到 257.37 km², 占我国国土面积的 26.81%。沙化土地面积达到 168.78 km², 占我国国土面积的 17.58%^[1]。土地荒漠化和沙化的问题严重影响着我国的生态环境和经济发展。科尔沁沙地是中国北方典型的荒漠化发展强烈的地区之一。由于风沙危害以及过度放牧,科尔沁沙地及周边区域植被退化、土壤沙化的问题依旧严峻^[2-3]。

针对科尔沁沙地治理需求,以往研究者提出了多种沙地治理技术模式,从最基本的草方格结合栽植固沙植物,再到纱网、滤风板、沙袋等多种材料的物理沙障的应用以及地表化学固沙等方法^[4]。土壤种子库添加是沙地植被恢复的有效方法之一,但是其容易受到添加种子的种类、数量以及添加的不同物种之间的比例的影响,同时还会受到生态受损区域的土壤、气候环境的限制,导致恢复效果不佳,甚至难以建立植被覆盖^[5-7]。近年来有学者提出捐赠土壤种子库的植被恢复方法^[8-11]。捐赠土壤种子库是以天然种子库收集技术为基础,从受损植被区域相邻或相似的生境转移表层土壤进行植被恢复的技术。利用捐赠土壤种子库进行植被恢复具有可以为植被退化区域同时引入种子、土壤、植物营养繁殖体、土壤生物群落的优点^[12-13]。这种方法被广泛运用于植被完全消失的采矿废弃地^[10,14]、退化山地^[15]、退化湿地^[16-17]、弃耕农田^[18]等退化严重区域,取得了良好的植被恢复效果。

土壤水分条件直接影响土壤种子库实施后的植被恢复效果。随着全球气候变化的加剧,降雨变化必然会引起荒漠生态系统的敏感响应^[19]。降雨变化会影响种子的生产、萌发以及土壤种子库的密度^[20],更直接影响到幼苗的生存和定居,最终会对群落产生剧烈影响^[21-22]。随着全球气候变化的进程,极端降雨事件频发,这将会对土壤种子库功能的发挥产生重要影响,同时也会对捐赠土壤种子库实施后的恢复效果产生重要影响。

目前对于捐赠土壤种子库在沙地治理方面应用的研究较为少见,对沙地捐赠土壤种子库实施过程中的水分限制了解有限,其恢复效果仍需明确。因此,本研究以科尔沁沙地这一典型的半干旱荒漠化区域为研究对象,选择天然稳定的典型固定沙丘作为捐赠土壤种子库源区,以流动沙丘和半固定沙丘为受捐区,并通过室内人工模拟降雨的方法,系统的研究了捐赠土壤种子库方法在沙地植被恢复中的应用效果,以及降雨变化对捐赠土壤种子库的影响,旨在为沙丘植被恢复与重建提供一种新的尝试。

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

研究区位于内蒙古自治区赤峰市翁牛特旗,地处科尔沁沙地西部地区,属温带半干旱气候,年均温 6.2 ℃,年均风速 3.19 m/s,年均降雨量 284.4 mm,无霜期 140 d。研究区域内沙丘起伏、坨甸相间,属于典型的沙地景观。研究区域的主要生境类型为流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、丘间低地等。主要土壤类型为风沙土、盐碱土、草甸土。常见植被包括小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、黄柳(*Salix gordejewii*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)等为主。

1.2 研究方法

研究采用盆栽控制实验方法,模拟受捐赠对象分别为流动沙丘和半固定沙丘,捐赠源为典型天然固定沙丘区表层土壤种子库。

实验材料收集:模拟受捐赠对象土壤获取于典型流动沙丘和半固定沙丘区,于 2023 年 5 月份别于半固定沙丘和流动沙丘获取表层 15 cm 的原状土壤作为模拟受捐赠底土。捐赠源区表土获取于受捐赠区域周边的典型固定沙丘区,获取深度为 5 cm 的表层土壤作为捐赠土壤种子库(表 1)。

表 1 实验样地基本情况
Table 1 Basic information of the experimental sites

区域 Region	地表状况 Surface conditions		物种 Species	植被盖度 Vegetation coverage
	坡向 Slope orientation	坡度 Slope		
半固定沙丘(受捐区) Semi-fixed sandy dune (receiver area)	西北 298°	10°	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i> 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i> 烛台虫实 <i>Corispermum mongolicum</i> 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> 小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	20%
流动沙丘(受捐区) Mobile sandy dune(receiver area)	西南 243°	14°	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i> 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i> 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> 烛台虫实 <i>Corispermum mongolicum</i>	4%
固定沙丘(捐赠区) Fixed sandy dune (donor area)	西北 332°	6°	画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i> 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> 虎尾草 <i>Chloris virgata</i> 三芒草 <i>Aristida adscensionis</i> 地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i> 烛台虫实 <i>Corispermum mongolicum</i> 山竹子 <i>Corethroedendron fruticosum</i> 柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> 小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	55%

捐赠土壤种子库实验方法:实验采用直径 45 cm,深度 25 cm 的圆形花盆作为实验容器,在花盆中填充使用上述方法获取于流动沙丘和半固定沙丘的原状实验底土,填充高度为 15 cm,分别填充 50 盆。从上述两种类型底土的花盆中各取 25 盆,分别将捐赠土壤种子库的原状表土覆盖在底土上,覆盖厚度为 5 cm,作为捐赠土壤种子库处理组,即流动沙丘底土+捐赠土壤种子库(M+D),半固定沙丘底土+捐赠土壤种子库(S+D);未做捐赠表土覆盖的花盆作为对照组,即:流动沙丘底土(M),半固定沙丘底土(S)。

模拟降雨实验方法:以 7 d 的降雨间隔频率来模拟自然降雨,标准降雨量(W)依据中国科学院沈阳应用生态研究所乌兰敖都荒漠化防治实验站多年(2000—2021 年)的气象资料,按照对应日期的 7 d 平均降雨量

确定,分别设置标准降雨组和在此基础上增减 20%降雨量的实验组,W 表示模拟标准降雨量处理,W-表示模拟减少 20%降雨量处理,W+表示模拟增加 20%降雨量处理,详见表 2。同时设置模拟极端降雨处理 We,模拟极端降雨是依据实验站多年降雨数据中的历年月降雨最大值的 80%设置为极端降水事件,将极端降雨事件的降雨量添加到模拟标准降雨量中作为模拟极端降雨处理。另外设置理想水分条件组,即:每间隔 2 d 将土壤水分补充至土壤饱和含水量的 80%,记作 Wi。模拟降雨实验是在捐赠土壤种子库实验的基础上进行的,对于捐赠土壤种子库实验的两种底土类型和两种添加处理方式(即 M+D 组;S+D 组;M 组;S 组)的各 25 个花盆,按照 5 个花盆一组设置用于模拟降雨实验。于 5 月 18 日进行第一次模拟降雨,最后一次模拟降雨时间为 7 月 20 日,并于每月 18 日进行极端降雨事件模拟的水分添加。

实验环境监测:本项实验在人工温室内进行,实验进行过程中记录温室内的温度、湿度。

表 2 模拟降雨处理的水分添加时间及水分添加量/mm

Table 2 Water addition time and amount of simulated rainfall treatment												
时间 Date	5/18	5/25	6/1	6/8	6/15	6/18	6/22	6/29	7/6	7/13	7/18	7/20
W-	3.72	5.30	6.23	15.27	8.18	-	18.97	7.38	25.23	13.47	-	12.19
W	4.65	6.63	7.79	19.09	10.22	-	23.71	9.22	31.54	16.84	-	15.24
W+	5.58	7.96	9.35	22.91	12.26	-	28.45	11.06	37.85	20.21	-	18.29
We	22.32	6.63	7.79	19.09	10.22	56	23.71	9.22	31.54	16.84	65.68	15.24
Wi	每间隔 2 d 将土壤水分补充至土壤饱和含水量的 80%											

W-: 减少 20%降雨 reduce rainfall; W: 标准降雨 standard rainfall; W+: 增加 20%降雨 increase rainfall; We: 极端降雨 extreme rainfall; Wi: 理想降雨 ideal rainfall;表中 5 月 18 日模拟极端降雨与第一次模拟增减雨事件重合,模拟极端降雨量是在标准降雨的基础上添加极端降雨事件的降雨量得到的,6 月 18 日和 7 月 18 日是模拟极端降雨的施加时间,因未到模拟增减雨事件的日期,故在图中用空白表示

1.3 观测方法与计算

种子萌发特征观测:在每个实验花盆的中心位置设置 10 cm×10 cm 的正方形标记区,用于萌发幼苗的种类和数量的统计测定。在实验进行第一次模拟降雨后开始观测各处理的幼苗萌发情况,即从 5 月 18 日起,每天统计一次各花盆的正方形标记中萌发的幼苗种类和数量,记录后摘除萌发的幼苗,直至连续 28 d 无新的幼苗萌发为止。花盆中除了正方形标记之外区域萌发的幼苗保持原状生长,以供生物量观测。

地上生物量测定:在最后一次模拟降雨后 7 d,即 7 月 27 日进行地上生物量测定。收割每个花盆的地上部分,烘干后测定每个花盆中的地上部分干重作为地上生物量。

数据处理:采用 Simpson 多样性指数(D)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H)来计算个样方的多样性,使用 Pielou 均匀性系数(E)计算样方的均匀度。公式如下:

$$D = 1 - \sum P_i^2$$
$$H = - \sum P_i \ln P_i$$
$$E = \frac{H}{\ln S}$$
$$P_i = \frac{N_i}{N}$$

式中:D 为 Simpson 多样性指数;H 为 Shannon-Wiener 多样性指数;E 为 Pielou 均匀性系数;S 为群落中的物种总数;P_i 为属于种 i 的个体在全部个体中出现的比例;N_i 为第 i 个物种的个体数;N 为种群中的个体总数。

采用 R 语言进行双因素方差分析(Two-way ANOVA) 评估差异并计算交互作用。采用 Duncan test 进行多重比较。对不同捐赠底土的样本、不同模拟降雨和不同捐赠条件的幼苗萌发数量以及地上生物量进行分析。完成数据分析后采用 R v4.3.2,Rstudio 2023 和 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 受捐区差异对捐赠土壤种子库效果的影响

研究发现所有实验处理之间的土壤种子库萌发物种数相同,即捐赠土壤种子库处理以及不同实验处理底土之间的萌发物种数相同,但是种子萌发数量差异显著。本研究发现在流动沙丘+捐赠土壤种子库实验组(M+D组)、半固定沙丘+捐赠土壤种子库实验组(S+D组)、流动沙丘实验组(M组)和半固定沙丘实验组(S组)观测到8个共同的萌发物种,全部是一年生草本植物。从捐赠土壤种子库处理的种子萌发数量比较发现,不同的处理之间存在差异,在模拟理想降雨(Wi)条件理发现,S+D组的幼苗萌发数量达到22280株/m²,M+D组的幼苗萌发数量达到12200株/m²,而S组和M组萌发幼苗数量仅为1520株/m²和1940株/m²。就单个物种萌发数量比较发现,画眉草(*Eragrostis pilosa*)萌发物种数最多,达到6440株/m²,菟丝子(*Cuscuta chinensis*)萌发数量最少(图1)。捐赠土壤种子库实验组(M+D组和S+D组)的总萌发数量以及各物种的萌发数量均显著高于未进行捐赠处理的对照组($P<0.001$,图2),萌发数量的增加主要体现在捐赠土壤种子库处理组中画眉草、狗尾草和马唐的大量萌发。在物种多样性比较中发现,施加捐赠土壤种子库处理后的Shannon-Wiener多样性指数高于未施加捐赠土壤种子库处理的对照组(表3),Shannon-Wiener指数的差异在半固定沙丘并未达到显著水平,在流动沙丘表现出显著差异($P<0.05$,表3)。但是施加捐赠土壤种子库处理后的Pielou均匀性系数低于未施加捐赠土壤种子库处理的对照组(表3)。同时地上生物量比较发现,施加捐赠土壤种子库的处理组(S+D组和M+D组)地上生物量显著高于对照组(S组和M组)($P<0.01$,图2)。

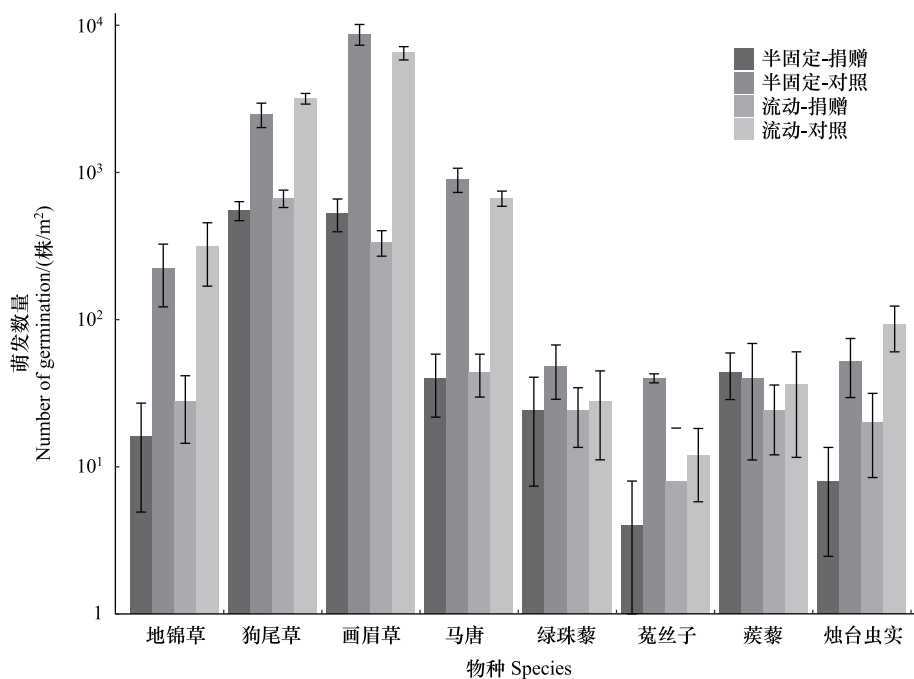


图1 不同受捐区的捐赠土壤种子库物种萌发数量对比

Fig.1 Comparison of species germination in donor soil seed banks in different donated regions

对不同的捐赠区种子萌发特征分析发现,不同的捐赠底土类型影响种子萌发的数量和地上生物量。在种子萌发数量比较中发现,采用半固定沙丘土壤作为受捐赠底土的处理总萌发数多于流动沙丘的处理,但差异并未达到显著水平($P>0.05$,图2)。但是仅对比未施加捐赠土壤种子库的处理,即半固定沙丘底土处理(M组)和流动沙丘底土(S组)的种子萌发数量,并未表现出显著差异($P>0.05$,图2)。但是地上生物量测定结果显示,半固定沙丘样方(M+D组和M组)地上生物量显著大于流动沙丘样方(S+D组和S组)地上生物量

($P<0.05$,图 2)。

表 3 不同捐赠土壤种子库处理条件下的多样性及均匀性指数

Table 3 Diversity and uniformity index under different donated soil seed bank conditions

	半固定底土 Semi fixed subsoil		流动底土 Mobile subsoil	
	捐赠 Donor	对照 Compare	捐赠 Donor	对照 Compare
Shannon\Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index	0.834ab	0.755b	0.929a	0.717b
Simpson 多样性指数 Simpson index	0.456ab	0.466ab	0.528a	0.425b
Pielou 均匀性系数 Pielou's Evenness index	0.606b	0.757a	0.661ab	0.688ab

不同字母代表处理间具有显著差异

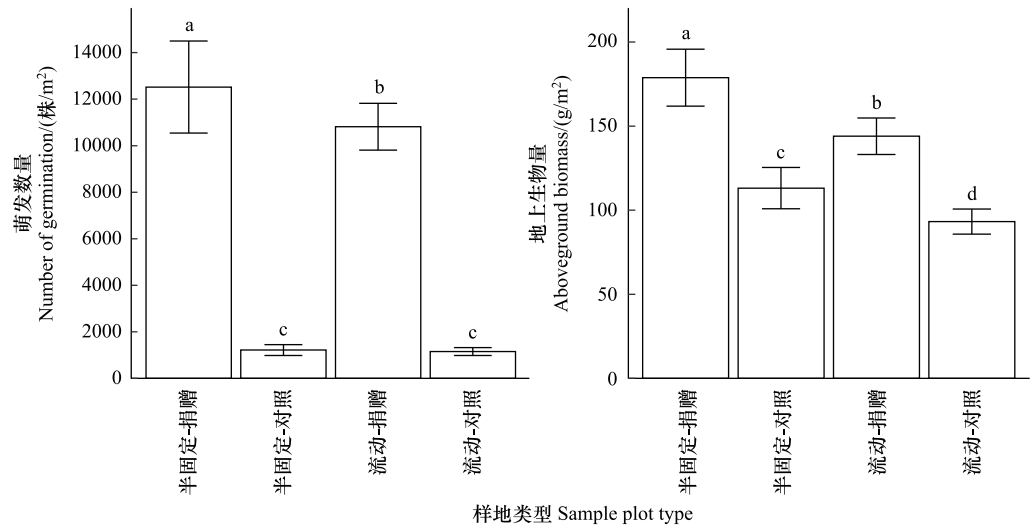


图 2 不同处理下的萌发数量和生物量对比

Fig.2 Comparison of gemination quantity and biomass under different treatments

图中不同的字母代表相互之间有显著差异

通过日萌发动态比较发现,实验中种子萌发共持续 36 d,所有物种的种子的大量萌发萌发集中于实验开始后 2 d 和 8 d(图 2),萌发数量分别占捐赠土壤种子库处理组和对照处理组总萌发数量的 66.12%和 69.30%。除绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)在 15 d 开始萌发和菟丝子(*Cuscuta chinensis*)在 27 d 开始萌发外,其余物种均从 2 d 开始萌发。同时除绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)和菟丝子(*Cuscuta chinensis*)外,其余物种都在前 10 d 达到萌发高峰期,前 10 d 种子萌发数量占萌发总数量的 62.71%。具体各物种的萌发高峰见表 4。

表 4 不同实验处理条件下各物种萌发高峰

Table 4 The germination peak of each species under the condition of donor soil seed banks

物种 Species	半固定底土 Semi fixed subsoil		流动底土 Mobile subsoil		模拟降雨 Simulated rainfall				
	捐赠 Donor	对照 Compare	捐赠 Donor	对照 Compare	W-	W	W+	We	Wi
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	2 d	2 d	2 d	2 d	24 d	16 d	10 d	2 d	2 d
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	8 d	8 d	2 d	8 d	25 d	27 d	10 d	8 d	8 d
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	2 d	2 d	10 d	8 d	24 d	16 d	10 d	2 d	8 d
地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i>	2 d	3 d	2 d	8 d	27 d	25 d	18 d	2 d	8 d
蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	2 d	3 d	3 d	3 d	27 d	17 d	8 d	8 d	2 d
烛台虫实 <i>Corispermum candelabrum</i>	10 d	8 d	10 d	9 d	28 d	10 d	11 d	10 d	10 d
绿珠藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	17 d	17 d	24 d	27 d	27 d	17 d	19 d	17 d	17 d
菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>	27 d	27 d	28 d	27 d	27 d	27 d	27 d	无萌发	无萌发

通过对各物种每日萌发数占总萌发数的比例进行比较,发现捐赠土壤种子库处理并未改变种子萌发动态的整体趋势。与对照处理相比较,尽管捐赠土壤种子库处理对种子的日萌发数量影响极显著($P < 0.001$, 图 3),但是对种子单日萌发数占总萌发数的比例影响并不显著,种子萌发的趋势并未改变。

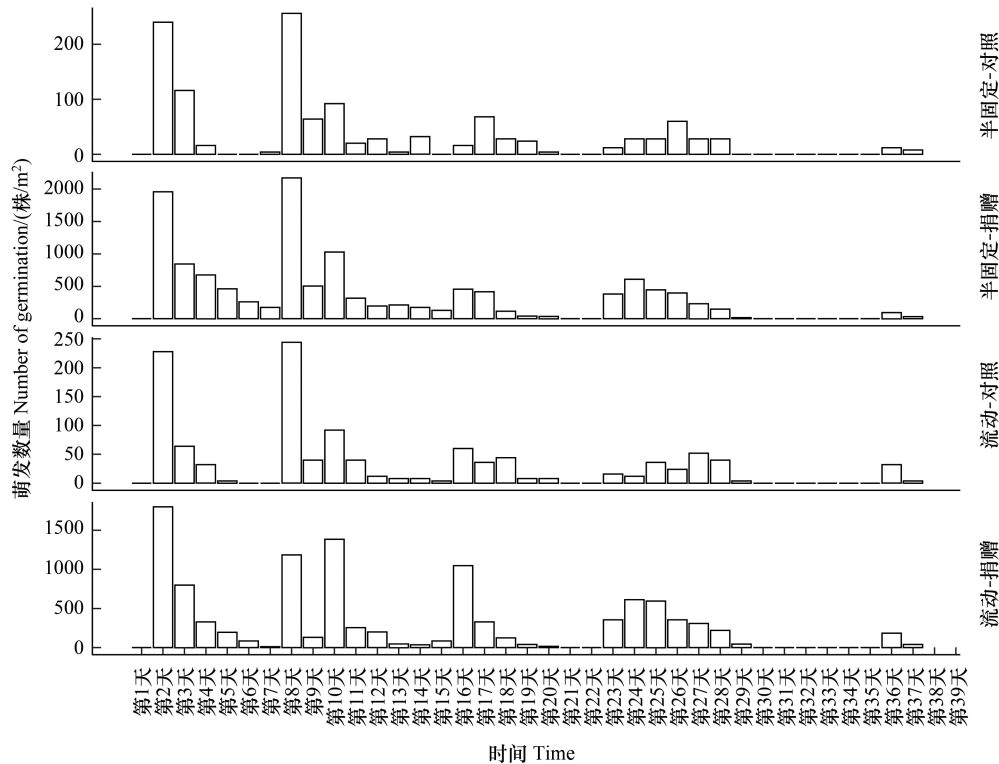


图 3 不同处理下种子萌发日动态

Fig.3 Daily dynamics of seed germination under different treatments

2.2 降雨对捐赠土壤种子库种子萌发的影响

增加和减少降雨量会影响捐赠土壤种子库种子萌发的数量和萌发动态。本研究在模拟降雨实验中发现,与模拟标准降雨(W)相比,模拟减少降雨(W-)会减少幼苗的萌发数量,模拟增加降雨(W+)会增加幼苗的萌发数量(图 4),但是增减降雨处理之间的差异并不显著($P > 0.05$, 图 5)。但增减降雨处理对种子萌发的动态产生影响,随着模拟降雨量的增加,幼苗萌发的高峰期均提前(表 4, 图 6),表现为平均提前了 7 d。地上生物量的分析结果显示,降雨增减对萌发植物的生物量产生影响,实验期间生物量顺序表现为:W+组>W 组>W-组(图 5),分别为 98.60 g/m^2 , 99.15 g/m^2 , 和 108.04 g/m^2 ,但是差异并不显著($P > 0.05$, 图 5)。

极端降雨事件显著改变了捐赠土壤种子库种子的萌发数量和萌发动态。本研究在模拟极端降雨实验中发现,极端降雨处理(We)的种子萌发数量高于模拟增减雨处理(W-, W, W+),存在极显著差异($P < 0.001$, 图 3)。并且与模拟理想降雨处理(Wi)相比,极端降雨处理(We)萌发幼苗数量多于理想降雨处理(Wi),存在显著差异($P < 0.05$, 图 5)。极端降雨事件使种子的萌发高峰期大幅度提前(表 4),除绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)和菟丝子(*Cuscuta chinensis*)以外,其他物种的萌发高峰期均在 10 d 之前。特别的是,在 We 组和 Wi 组中并未观察到菟丝子(*Cuscuta chinensis*)的萌发,可能由于菟丝子(*Cuscuta chinensis*)种子萌发对较多降雨的不适应,相关原因有待深入探究。生物量测定结果显示,极端降雨对植物地上生物量形成产生影响,极端降雨处理(We)的地上生物量显著高于 W-组、W 组和 W+组($P < 0.001$, 图 5)。但是极端降雨处理(We)的地上生物量显著低于 Wi 组($P < 0.001$, 图 5)。

降雨会对种子萌发有显著的激发效应。每间隔 7 日(即降雨间隔)出现一次萌发高峰期(图 6)。幼苗萌

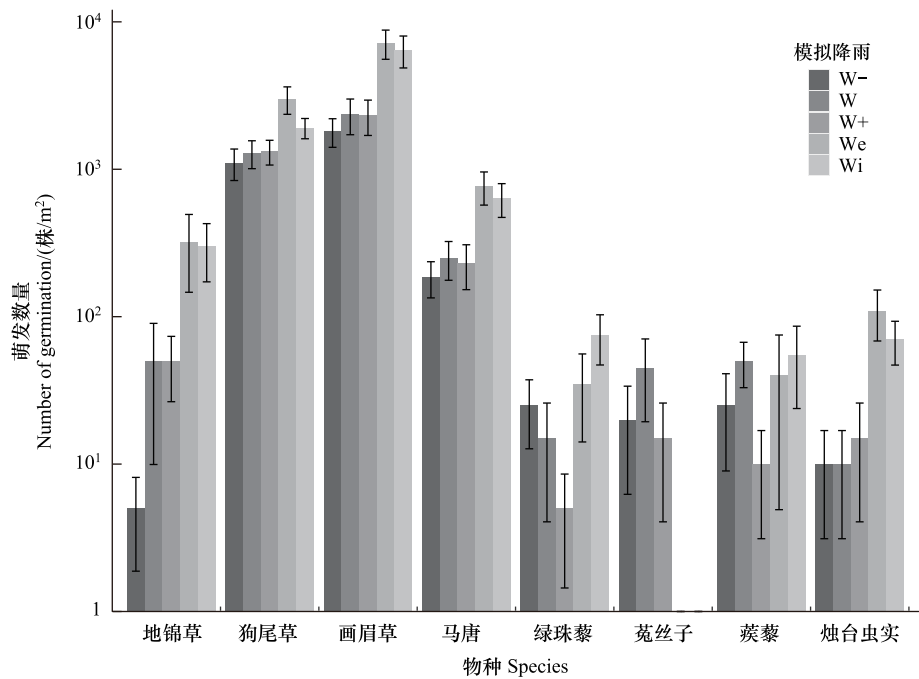


图 4 不同模拟降雨处理下各物种萌发数量对比

Fig.4 Comparison of germination quantity of different species under different simulated rainfall treatments

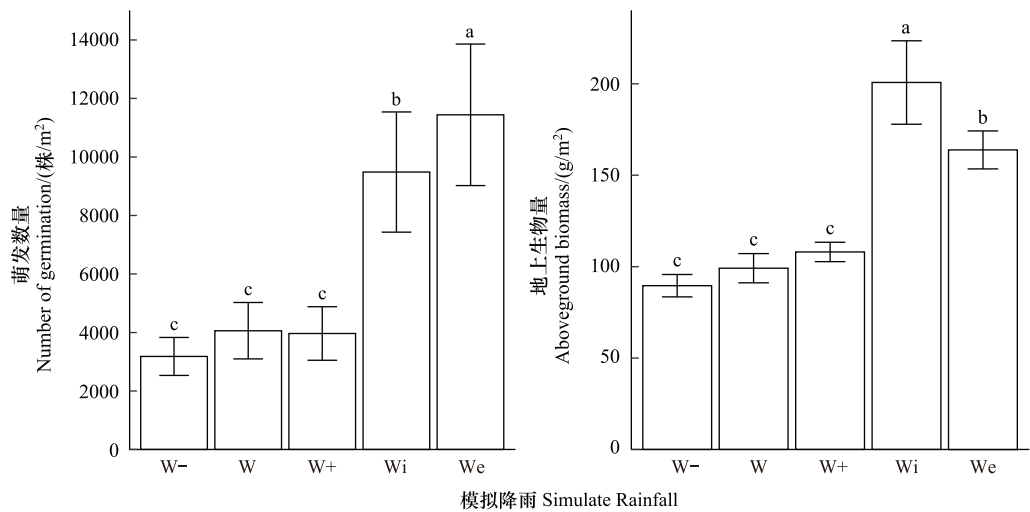


图 5 不同模拟降雨处理下萌发数量与生物量显著性对比

Fig.5 Comparison of gemination quantity and biomass under different simulated rainfall treatments

图中不同的字母代表相互之间有显著差异

发高峰期总是在模拟降雨后的第二天出现。降雨量不足限制种子的萌发和幼苗的生长。通过比较模拟标准降雨 W 组与模拟理想降雨 Wi 组,本研究发现,Wi 组的种子萌发数量、地上生物量均显著高于 W 组($P<0.001$)。同时相较于 W 组,Wi 组种子萌发高峰大幅度提前,各物种普遍在 10 d 前达到萌发高峰。说明降雨量的不足严重限制了实验中种子的萌发和幼苗生长。同时,对多样性和均匀度分析发现,模拟极端降雨(We)和模拟理想降雨(Wi)的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数显著高于 W 组和 W+组($P<0.05$,表 5),同时也高于 W-组,但是并未达到显著差异($P>0.05$,表 5)。在小幅度降雨改变(W-、W、W+)的条件

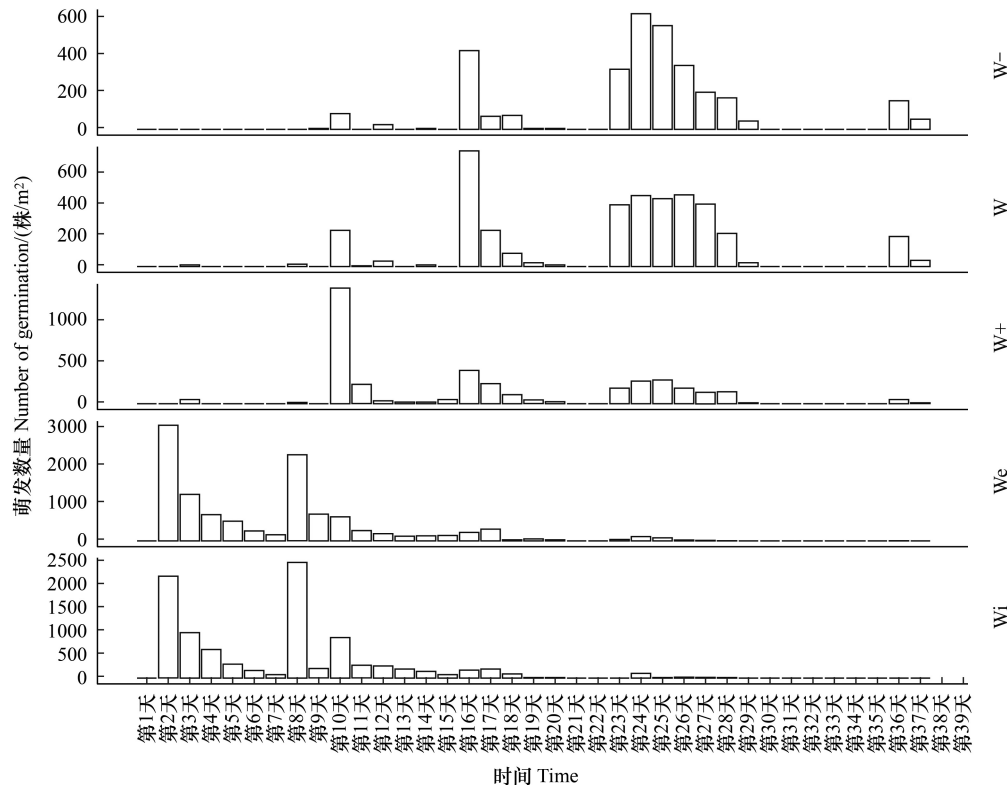


图6 不同模拟降雨条件下幼苗萌发日动态

Fig.6 Daily dynamics of seedling germination under different simulated rainfall conditions

下,Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数随降雨量增加而下降。对均匀度的分析发现,W-组 Pielou 均匀度系数最大,W 组最小,同时仅 W-组与 W 组之间差异显著($P<0.05$,表 5)。

表 5 不同降雨条件下的多样性及均匀性指数

Table 5 Diversity and homogeneity indices under different rainfall conditions

	W-	W	W+	We	Wi
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index	0.792bc	0.691c	0.698c	0.908ab	0.955a
Simpson 多样性指数 Simpson index	0.476ab	0.407b	0.418b	0.517a	0.527a
Pielou 均匀性系数 Pielou's evenness index	0.755a	0.596b	0.659ab	0.695ab	0.686ab

不同字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)

2.3 降雨变化与捐赠土壤种子库的交互作用

捐赠土壤种子库与模拟降雨量的变化之间具有显著的交互效应。本研究发现在种子萌发数量变化上,不同捐赠土壤种子库处理与模拟降雨量的组合之间差异极显著($P<0.001$,图 7),并且随模拟降雨量的增加,捐赠土壤种子库处理组的种子萌发数量的增加量显著高于对照组。捐赠土壤种子库处理结合模拟极端降雨(We)的处理组合、捐赠土壤种子库结合模拟理想降雨(Wi)的组合种子萌发数量显著高于其他的降雨处理组合($P<0.001$,表 6)。在未施加捐赠土壤种子库处理的对照组与各种模拟降雨处理的组合之间的种子萌发数量差异均不显著(表 6)。同时本研究发现,在地上生物量对比中,各处理组合间存在显著的交互作用($P<0.01$,图 7)。捐赠土壤种子库结合模拟理想降雨(Wi)的组合地上生物量显著大于其他的处理组合($P<0.01$,表 6),这与种子萌发数量之间的差异表现相似。但是捐赠土壤种子库结合极端降雨(We)的组合地上生物量显著小于赠土壤种子库结合模拟理想降雨(Wi)的处理组合,这与种子萌发数量表现出的显著性不一致($P<0.01$,表 6)。并且对照组结合理想降雨(Wi)或极端降雨(We)的组合与捐赠土壤种子库结合增减雨处理的组

合(W-,W,W+)之间的地上生物量差异也不显著($P<0.01$,表6),这与种子萌发数量表现出的差异性也不一致。

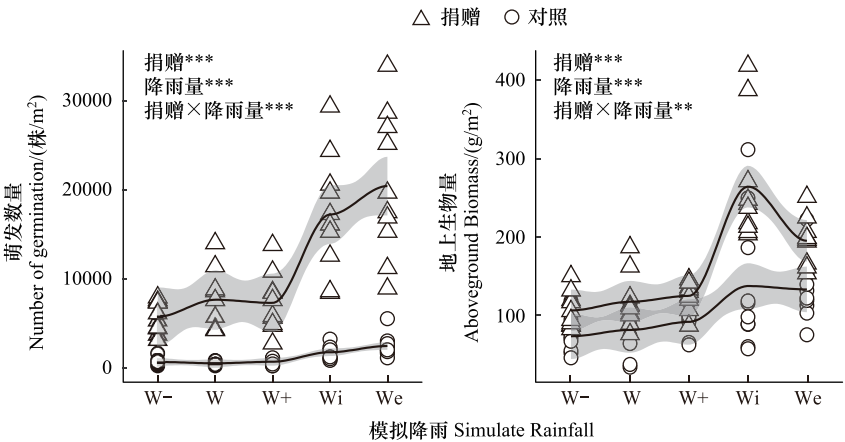


图 7 捐赠土壤种子库与降雨量变化的交互作用

Fig.7 The interaction between donated soil seed banks and changes in rainfall

图中 *** 表示处理间 $P < 0.001$, ** 表示处理间 $P < 0.01$

表 6 处理组合之间显著性对比

Table 6 Significant comparison between treatment combinations										
处理组合 Treatment combinations	捐赠×Wi Donor×Wi	捐赠×We Donor×We	捐赠×W+ Donor×W+	捐赠×W Donor×W	捐赠×W- Donor×W-	对照×We Compare×We	对照×Wi Compare×Wi	对照×W+ Compare×W+	对照×W Compare×W	对照×W- Compare×W-
萌发数量 Germination number	a	a	b	b	b	c	c	c	c	c
地上生物量 Aboveground biomass	a	b	cd	cde	cdef	cd	c	def	ef	f

不同字母代表处理间具有显著差异

3 讨论

3.1 受捐赠区域差异对捐赠土壤种子库效果的影响

研究发现采用捐赠土壤种子库的方法在半固定沙丘和流动沙丘进行植被恢复都可以显著地提高种子萌发数量和幼苗的地上生物量,有效地促进了退化沙地的植被恢复。这与 Ruwanza 等、Bulot 等、Wubs 等以及 Schmidt 等在其他生境中的研究结论一致^[12—13, 23—24],说明利用捐赠土壤种子库的方法可以有效地克服土壤种源不足的问题,促进流动沙丘和半固定沙丘向固定沙丘的演替。不同受捐赠底土下的种子萌发数量存在差异,但是并未达到显著水平。其原因可能是因为在进行捐赠土壤种子库处理之后,萌发的种子几乎全部来自于覆盖的捐赠表土。

受捐区条件影响捐赠土壤种子库的恢复效果。本研究中发现,采用半固定沙丘底土的捐赠土壤种子库实验样方的地上生物量要显著高于采用流动沙丘底土的捐赠土壤种子库实验样方。这与 Piqueray 等、Bulot 等的研究有所差异^[23,25]。Piqueray 等对比了较为肥沃的受捐赠区域和较贫瘠的受捐赠区域施加捐赠土壤种子库后的恢复效果,结果显示两种受捐赠区域物种丰度和丰富度都大幅增加,但是较贫瘠的受捐区物种组成更加接近捐赠源区^[25]。Bulot 等利用草原表土作为捐赠土壤种子库来源对废弃果园和输油泄漏区域进行捐赠土壤种子库处理,发现两种不同的受捐赠区域的物种多样性都显著提高,并且输油管道泄漏后的区域植被组成更加接近捐赠源区^[23]。导致这种差异的主要原因可能是由于本实验是在土壤贫瘠的沙地上进行的,土壤的理化性质差异影响了幼苗生长,半固定沙丘土壤养分、土壤微环境优于流动沙丘,而 Piqueray 等、Bulot 等的

研究是位于土壤结构较为完善的退化草地、林地,捐赠土壤种子库的实施效果很少受到土壤条件限制。

相比较于以往对土壤种子库结构特征的研究,本研究涉及的土壤种子库特征与以往的研究结果存在差异,种子库密度明显低于以往的研究结论。研究发现捐赠土壤种子库处理并未改变萌发的物种数。本研究,捐赠土壤种子库处理显著的改变了种子萌发的数量,但是并未改变不同处理之间的萌发物种数,所有处理中均萌发 8 个物种。这与前人的研究是不一致的,李雪华等认为流动沙丘土壤种子库中的物种数显著低于半固定沙丘和固定沙丘^[26]。但是刘晓霞等研究中发现流动沙丘土壤种子库物种数为 18 个物种,反而高于半固定沙丘的 13 个物种和固定沙丘的 16 个物种^[27]。导致这种差异的原因可能是因为李雪华等研究中土壤种子库取样厚度为 0—5 cm,而刘晓霞等研究中取样深度为 0—30 cm。受捐区(流动沙丘、半固定沙丘)的取土厚度为 15 cm,获取的土壤种子库中深层土壤种子的可能性较大。同时由于流动沙丘和半固定沙丘表土层活化,一年生植物种子大量入侵^[28],同时伴随着风沙的运移,可能使大量的土壤种子被掩埋到较深的土壤层,进入休眠期,在进行盆栽实验取土时休眠种子被激活,从而导致萌发物种差异不显著。捐赠土壤种子库处理中萌发物种较少的原因可能是由于本研究使用温室内盆栽实验的方法进行萌发,并且研究中并未去除盆栽中的所有幼苗,盆栽的使用降低了土壤水分的深层渗漏,促进周边幼苗的生长,由于周边幼苗生长速度快,大量消耗土壤养分,并且阻挡了太阳光的照射,从而抑制种子的萌发。在实验条件下,土壤种子库中的种子仅有部分萌发,其他种子可能由于环境条件限制和种子自身休眠生理要求等,导致其并未萌发,所以造成相关处理间物种结构相似。同时这也可能是导致本研究中土壤种子库中种子密度低于以往研究的主要原因。

3.2. 捐赠土壤种子库源区选择

捐赠源区的选择决定了捐赠土壤种子库方法的实施能否达到预期目标,是实施本方法的关键环节。在以往的研究中,对捐赠源区的选择主要考虑的是土壤、气候、植被类型和植被演替趋势。一般优先考虑相临近的顶级或次顶级群落^[15,29—30]。在临近区域无法作为捐赠土壤种子库来源时,需要有限考虑与受捐赠地土壤质地、水分供给、气候条件都相对接近的顶级、次顶级群落。同时在实施捐赠土壤种子库之前还需要进行土壤种子库调查和植被调查,以确定捐赠土壤种子库能用于待捐赠区域的植被恢复^[31—32]。

捐赠土壤种子库源区的选择主要考虑的是恢复目标和沙丘植被演替进程,在科尔沁沙地植被正向演替过程中,通常的顺序是流动沙丘-半固定沙丘-固定沙丘,长期稳定的固沙沙丘可以视为当地短期内的近顶级的自然植被群落,这也是沙地治理所需要实现的目标。因此,在受捐赠的区域周边寻找此类典型固定沙丘作为捐赠源区,源区的指标主要包括较高的植被盖度、稳定的物种结构、与受捐区较高的相似性,在实施过程中要考虑与受捐区的小环境的相似性,如坡度、坡向以及土壤结构等。

3.3 降雨特征对捐赠土壤种子库种子萌发的影响

降雨是影响沙地土壤种子萌发的重要限制因素之一。以往研究发现种子萌发数量随着降雨量的增加而增加^[20,33—34],同时也有研究得出相反的结论,马赞花等、蒋德明等研究发现降雨量的小幅改变并对种子萌发无显著影响^[35—36]。研究结论与以往在荒漠生态系统的研究结论一致,与 Ma 等、An 等、陈娟丽等的研究结论不一致。得出相互矛盾的结论可能是由于研究区域的差异导致的,与马赞花等、蒋德明等研究的区域相似,降雨严重不足且蒸发潜力巨大,但与 Ma 等、An 等、陈娟丽等的研究区域存在很大差异,其属于水分限制较弱或无水分限制区域,这可能是产生不同结论的原因之一。

自然降雨条件下,土壤水分的不足限制了土壤种子的大量萌发以及之后的植被建立。增减雨处理(W₋、W、W₊)种子萌发数量显著少于极端降雨和理想水分处理(W_e和W_i),说明在自然降雨条件以及增加 20%降雨的条件下,降雨量依旧不足以支撑土壤种子库的大量萌发,在自然条件下降雨量的缺乏是限制当地植被自然恢复的因素之一。

单次极端强降雨会显著提高土壤种子的萌发数量和植被地上生物量。以往研究发现极端降雨事件会打破种子的休眠^[37—38],从而导致种子萌发数量增加。同时由于沙地土壤保水能力较差,极端降雨在提供充足水分的同时难以在沙地土壤产生水分胁迫,这也可以解释极端降雨事件所导致的地上生物量增加。但是由于单

次极端降雨事件后土壤水分流失,部分幼苗由于干旱胁迫而死亡,所以导致极端降雨事件处理的样方地上生物量小于理想降雨。这与马赞花等研究发现的一年生植物不能充分利用极端降雨累计的土壤水分的结论是一致的^[35],与周双喜等研究中的较小的时间尺度上,仅仅通过降雨量解释不了地上净初级生产力的差异的结论也是一致的^[39]。

研究中极端降雨事件并未导致生物多样性的差异,这与马赞花等发现极端降雨事件会提高生物多样性的结论是不同的^[35]。这种差异的可能原因是所选择的受捐赠区域以及捐赠区域的植物多样性较低,极端降雨难以产生显著影响。

4 结论

捐赠土壤种子库的方法可以明显改善流动沙丘和半固定沙丘的种子萌发数量以及地上生物量,可以有效的促进流动沙丘和半固定沙丘向固定沙丘进行演替。同时捐赠土壤种子库的方法增加了流动沙丘植被恢复进程中实现跨越式恢复的可能性,促使其直接向固定沙丘阶段进行演替。降雨量的变化对沙地土壤种子萌发和幼苗生长都存在影响,但是极端降雨事件的影响更为强烈。极端降雨事件所导致的激发效应会促进种子大量萌发,同时大量补充土壤水分,有利于沙地土壤种子萌发和幼苗生长。

由于本次实验属于温室中的模拟控制实验,因此捐赠土壤种子库的方法对沙地植被的实际恢复效果还需要野外现场实验的进一步评估。同时实验中的极端事件未能考虑极端干旱的影响,可能会导致结论中对极端事件的预估与实际情况有所差异。

参考文献 (References):

- [1] 曾国盛,王翠萍,李锋,刘政,孙涛.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析.林业资源管理,2023(1):1-7.
- [2] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,路春燕,王荣林,张永生,于显双.基于遥感与地理信息数据的科尔沁沙地生态环境状况动态评价.生态学报,2022,42(14):5906-5921.
- [3] 郭亚娟,刘廷玺,童新,罗艳云,段利民,王冠丽.基于长时间序列 landsat 数据的科尔沁沙地土地利用演变分析.生态学报,2020,40(23):8672-8682.
- [4] 闫德仁,闫婷.内蒙古流动沙地治理技术发展回顾.中国沙漠,2022,42(1):66-70.
- [5] 宋创业,郭柯.浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系.植物生态学报,2007,31(1):40-49.
- [6] 张金鹏.呼伦贝尔沙化草地植被恢复模式效果评价及动态分析.北京林业大学,2010.
- [7] 任康.青藏铁路沿线严重沙害区植被恢复措施及恢复效果研究.北京林业大学,2019.
- [8] 尚占环,徐鹏彬,任国华,龙瑞军.土壤种子库研究综述——植被系统中的作用及功能.草业学报,2009,18(02):175-183.
- [9] Valk A G V D. The development of zonation in freshwater wetlands [OL]. (1988) [2023-02-02]. <https://library.wur.nl/WebQuery/groenekenis/889738>.
- [10] Tacey W H, Glossop B L. Assessment of topsoil handling techniques for rehabilitation of sites mined for bauxite within the jarrah forest of western australia. Journal of Applied Ecology, 1980, 17(1):195-201.
- [11] Waryszak P, Standish R J, Ladd P G, Enright N J, Brundrett M, Fontaine J B. Best served deep: The seedbank from salvaged topsoil underscores the role of the dispersal filter in restoration practice. Applied Vegetation Science, 2021, 24(1):e12539.
- [12] Wubs E R J, Putten W H van der, Bosch M, Bezemer T M. Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. Nature Plants, 2016, 2(8):16107.
- [13] Schmidt K T, Maltz M, Ta P, Khalili B, Weihe C, Phillips M, Aronson E, Lulow M, Long J, Kimball S. Identifying mechanisms for successful ecological restoration with salvaged topsoil in coastal sage scrub communities. Diversity, 2020, 12(4):150.
- [14] Onésimo C M G, Dias D D, Beirão M, Kozovits A R, Messias M C T B. Ecological succession in areas degraded by bauxite mining indicates successful use of topsoil. Restoration Ecology, 2021, 29(1):e13303.
- [15] 田启航.基于捐赠土壤种子库的植被近自然恢复技术研究.河北农业大学,2015.
- [16] Valk A G V D, Davis C B. A reconstruction of the recent vegetational history of a prairie marsh, eagle lake, iowa, from its seed bank. Aquatic Botany, 1979, 6:29-51.
- [17] Valk A G V D, Pederson R L, Davis C B. Restoration and creation of freshwater wetlands using seed banks. Wetlands Ecology and Management,

- 1992, 1(4): 191-197.
- [18] Pywell R F, Webb N R, Putwain P D. A comparison of techniques for restoring heathland on abandoned farmland. *The Journal of Applied Ecology*, 1995, 32(2): 400.
- [19] Knapp A K, Ciais P, Smith M D. Reconciling inconsistencies in precipitation-productivity relationships: Implications for climate change. *New Phytologist*, 2017, 214(1): 41-47.
- [20] Ma M, Ma Z, Du G. Effects of water level on three wetlands soil seed banks on the tibetan plateau. *PLOS ONE*, 2014, 9(7): e101458.
- [21] Craine J M, Nippert J B, Elmore A J, Skibbe A M, Hutchinson S L, Brunsell N A. Timing of climate variability and grassland productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(9): 3401-3405.
- [22] 关红杰. 毛乌素沙地生物土壤结皮对油蒿水分吸收的影响模拟. *生态学报*, 2023, 43(14): 5875-5889.
- [23] Bulot A, Provost E, Dutoit T. A comparison of different soil transfer strategies for restoring a mediterranean steppe after a pipeline leak (la crau plain, south-eastern france). *Ecological Engineering*, 2014, 71: 690-702.
- [24] Ruwanza S. Topsoil transfer from natural renosterveld to degraded old fields facilitates native vegetation recovery. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3833.
- [25] Piqueray J, Gilliaux V, Wubs E R J, Mahy G. Topsoil translocation in extensively managed arable field margins promotes plant species richness and threatened arable plant species. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110126.
- [26] 李雪华, 韩士杰, 宗文君, 李晓兰, 蒋德明. 科尔沁沙地沙丘演替过程的土壤种子库特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 66-69.
- [27] 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.
- [28] Ghermandi L. Seasonal patterns in the seed bank of a grassland in north-western Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35(2): 215-224.
- [29] Ruwanza S. Effects of topsoil removal and transfer on vegetation recovery in degraded oldfields. *Ecological Restoration*, 2020, 38(4): 210-214.
- [30] Pilon N A L, Buisson E, Durigan G. Restoring brazilian savanna ground layer vegetation by topsoil and hay transfer: Brazilian savanna ground layer restoration. *Restoration Ecology*, 2018, 26(1): 73-81.
- [31] Vécirin M P, Muller S. Top-soil translocation as a technique in the re-creation of species-rich meadows. *Applied Vegetation Science*, 2003, 6(2): 271-278.
- [32] Garrouj M, Alard D, Corcket E, Marchand L, Benot M. The effects of management on vegetation trajectories during the early - stage restoration of previously arable land after hay transfer. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(24): 13776-13786.
- [33] An H, Zhao Y, Ma M. Precipitation controls seed bank size and its role in alpine meadow community regeneration with increasing altitude. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): 5767-5777.
- [34] 陈娟丽, 赵学勇, 刘新平, 张雅秋, 罗永清, 张蕊, 张润霞, 于海伦. 降雨量对科尔沁沙地 3 种沙生植物生长和生理的影响. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 163-173.
- [35] 马赞花, 张铜会, 刘新平, 毛伟, 岳祥飞. 极端降水事件对科尔沁沙地一年生植被的影响. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 50-56.
- [36] 蒋德明, 周全来, 阿拉木萨, 唐毅, 押田敏雄. 科尔沁沙地植被生产力对模拟增加降水和氮沉降的响应. *生态学杂志*, 2011, 30(6): 1070-1074.
- [37] Hu D, Baskin J M, Baskin C C, Yang X, Huang Z. Ecological role of physical dormancy in seeds of *Oxytropis racemosa* in a semiarid sandland with unpredictable rainfall. *Journal of Plant Ecology*, 2018, 11(4): 542-552.
- [38] 马原, 郭小平, 罗超, 冯昶栋, 任胜男, 李峰. 不同降水条件对干旱矿区土壤表层种子库的激活效应. *草业科学*, 2022, 39(5): 876-887.
- [39] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 施慧秋. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1155-1164.