

# 牛羊粪沙障对高寒区沙化草地恢复的影响

## ——以甘肃省玛曲县为例

赵增新<sup>1</sup>, 唐进年<sup>1,2</sup>, 李银科<sup>2</sup>, 王祺<sup>2</sup>, 刘有军<sup>2</sup>, 杨雪梅<sup>3</sup>, 袁宏波<sup>2</sup>, 曹晓涛<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站/甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 3.兰州文理学院 旅游学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 研究植物纤维沙障、牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障对甘肃省玛曲县沙化草地恢复效果, 为玛曲县沙化草地治理提供有效沙障。[方法] 以玛曲县未布设沙障沙化草地为对照, 比较了植物纤维沙障、牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障布设后沙化草地植物和土壤性质的变化。[结果] ①牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障对植被恢复效果较好。物种数由4种均增加为11种, 植物群落平均盖度由7.28%依次增加到48.21%和58.29%; 植物平均高度由6.67 cm依次增长到35.17和30.70 cm; 植物平均干重由4.46 g/m<sup>2</sup>依次增加到81.17和80.70 g/m<sup>2</sup>; 植物平均枯死率由9.55%依次降为7.00%和6.80%。②牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障对0—5 cm土壤养分提升显著。全氮由0.154 g/kg依次增加到0.370和0.491 g/kg; 土壤碱解氮由4.78 mg/kg依次增加到13.99和19.78 mg/kg; 速效磷由1.64 mg/kg依次增加到5.54和6.20 mg/kg; 速效钾由21.07 mg/kg依次增加为55.37和56.90 mg/kg。[结论] 综合考虑恢复效果、成本和降解因素等, 牛羊粪沙障为玛曲县沙化草地治理较理想的沙障布设方式。

**关键词:** 牛羊粪沙障; 沙化草地; 植被恢复; 土壤养分; 高寒区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0068-09

中图分类号: S157, X144

**文献参数:** 赵增新, 唐进年, 李银科, 等. 牛羊粪沙障对高寒区沙化草地恢复的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 68-76. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.009; Zhao Zengxin, Tang Jinnian, Li Yinke, et al. Effects of a cattle and sheep dung sand barrier on desertified grassland restoration in alpine area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 68-76.

## Effects of a Cattle and Sheep Dung Sand Barrier on Desertified Grassland Restoration in Alpine Area

### —A Case Study at Maqu County, Gansu Province

Zhao Zengxin<sup>1</sup>, Tang Jinnian<sup>1,2</sup>, Li Yinke<sup>2</sup>,  
Wang Qi<sup>2</sup>, Liu Youjun<sup>2</sup>, Yang Xuemei<sup>3</sup>, Yuan Hongbo<sup>2</sup>, Cao Xiaotao<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem/Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. College of Tourism, Lanzhou University of Arts and Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of plant fiber sand barriers, cattle and sheep dung barriers, and sand barriers comprised of cattle and sheep dung combined with plant fiber were studied in order to create effective sand barriers for the restoration of desertified grassland in the alpine area at Maqu County, Gansu Province. [Methods] Sand barriers made of plant fiber, cattle and sheep dung, and cattle and sheep dung combined with plant fiber were installed in the alpine area at Maqu County. Plant and soil characteristics in the grassland before and after installing the sand barriers were compared. [Results] ① Sand barriers made of cattle and sheep dung, and made of cattle and sheep dung combined with plant fiber produced good effects with regard to vegetation restoration. The average plant community cover grew from 7.28% to 48.21% and 58.29%, respectively, and the number of species increased from 4 to 11. Plants grew taller, increasing from

收稿日期: 2023-01-04

修回日期: 2023-03-05

资助项目: 甘肃省重点研发计划项目“黄河首曲高寒沙化草地恢复措施评价与精准治理范式建立”(21YF5FA037)

第一作者: 赵增新(1999—), 男(汉族), 河南省新乡县人, 硕士研究生, 研究方向为资源利用与植物保护。Email: zzx15236495910@163.com。

通讯作者: 唐进年(1970—), 男(汉族), 甘肃省古浪县人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事干旱区环境、沙漠与沙漠化治理等方面的研究。Email: tangings@126.com。

an average of 6.67 cm to 35.17 cm and 30.70 cm, respectively. Average plant dry weight increased from 4.46 g/m<sup>2</sup> to 81.17 g/m<sup>2</sup> and 80.70 g/m<sup>2</sup>, respectively. The plant dieback rate dropped from 9.55% to 7.0% and 6.80%, respectively; ② Cattle and sheep dung sand barriers as well as cattle and sheep dung sand barriers combined with plant fiber greatly boosted soil nutrients at the 5 cm depth. Total nitrogen increased from 0.154 g/kg to 0.370 g/kg and 0.491 g/kg, respectively. Soil alkaline hydrolyzed nitrogen rose from 4.78 mg/kg to 13.99 mg/kg and 19.78 mg/kg, respectively. Available phosphorus increased from 1.64 mg/kg to 5.54 mg/kg and 6.20 mg/kg, respectively. Available potassium increased from 21.07 mg/kg to 55.37 mg/kg and 56.90 mg/kg, respectively. [Conclusion] Considering the vegetation restoration effects, costs, and degradation factors, cattle and sheep dung sand barriers are the ideal technique for vegetation restoration of desertified grassland in alpine area of Maqu County.

**Keywords:** cattle and sheep dung sand barrier; desertified grassland; vegetation restoration; soil nutrient; alpine area

玛曲高寒草原是青藏高原生态系统中重要的组成部分。近 20~30 a 来,受到全球气候变暖和人类活动的影响,该地区生态环境问题日益凸显<sup>[1-2]</sup>。特别是 20 世纪 80 年代中后期以来,玛曲县大面积的天然草地开始退化<sup>[3-4]</sup>,到 90 年代已经十分严重,全县草地沙化土地面积已超过  $7.00 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,黄河沿岸 5 km 范围内出现长达 220 km 的沙丘带<sup>[5-6]</sup>,沙丘面积还以约 300 hm<sup>2</sup>/a 的速度递增。草地退化不仅严重制约了当地畜牧业的可持续发展,而且影响到黄河中下游地区经济社会的协调发展,威胁着国家的生态安全。近年来,高寒区沙化草地治理成为退化生态系统修复理论研究及治理实践的重点。目前,国内高寒沙化草地恢复的技术包括机械沙障、草场围封和人工促进植被恢复等方法,但对于高寒沙化草地的治理还不太成熟,截至目前,还没有一套适合玛曲沙化草地治理较为有效的技术和模式<sup>[7]</sup>。为了缓解高寒沙化草地退化的进程,已有研究者采取了包括降低草地载畜量<sup>[8]</sup>、补播和封育<sup>[9]</sup>的方法,甚至搬用干旱区设置沙障、生物治沙以及综合治理等技术措施<sup>[10-12]</sup>,虽然取得了一定的成效,但干旱区的治沙模式并不完全适用于高寒区沙化草地治理<sup>[13-14]</sup>。同干旱区相比,高寒区水分相对充足,有利于该地区沙化草地的恢复<sup>[15]</sup>,但裸沙地蒸发量高,表层水分无法得到有效的保持。因此,在该地区简单照搬干旱区的治沙技术是不合理的<sup>[16-18]</sup>。在玛曲沙化草地治理中,现在使用较为普遍沙障为植物纤维沙障,对于沙化草地的恢复具有一定的促进作用,而且可降解,绿色无污染,受到当地牧民一致好评。牛羊粪便通常由水、未消化的牧草、牧草种子、微生物及其代谢产物等组成<sup>[19]</sup>。许多学者<sup>[20-24]</sup>研究表明牛羊粪可以改善土壤的理化性质,增强土壤肥力,从而促进植物生长。但是,牛羊粪覆盖作为一种新型沙障,它对沙化草地的具体治理效果未见报道。因此,如果能够将牛羊粪沙障和当地使用的植物纤维沙障以不同方式结合起来,是否会发挥更好

的沙化草地治理效果呢?基于此,本研究在甘肃省玛曲县高寒沙化草甸中选取一处小型流动沙丘,以无沙障为对照,分别设置牛羊粪沙障+植物纤维沙障、牛羊粪沙障、植物纤维沙障 3 种处理,通过对比分析 3 种不同处理样地植被恢复和土壤理化性质变化,最后筛选出适合玛曲沙化草地治理有效的沙障,从而为该区沙化草地治理提供参考。如果牛羊粪沙障具有良好的植被恢复效果,将在高寒沙化草地治理中具有更为广阔的前景。牛羊粪沙障不但充分利用了当地大量的牛羊粪资源,而且还净化了牧区的生态环境。同时,该沙障还具有绿色、无污染、成本低的特点。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

玛曲县隶属于甘肃省甘南藏族自治州(33°06'30"—34°30'15"N,100°45'415"—102°29'00"E)。气候为高原大陆性气候,年均气温 1.26 °C,冬季最低气温 -20.7 °C,夏季最高气温 20.9 °C,年均降水量 606.05 mm,年日照时数 2 583.9 h。土壤类型有草甸土、高山草甸土、亚高山草甸土、沼泽土、泥炭土和暗棕土<sup>[25-27]</sup>,主要类型是亚高山草甸土。草场类型多样,以亚高山草甸为主,山地周围分布有灌木林和冷杉林<sup>[28]</sup>。境内分布着黄河上游支流 330 余条,补给黄河径流量 45%<sup>[29]</sup>,是黄河源区主要水源补给区。根据第 5 次全国荒漠化和沙化监测结果显示,玛曲县全县共有沙化土地面积 8 154.10 hm<sup>2</sup>,占玛曲县草地总面积的 2.24%。按沙化程度分有极重度沙化土地 2 429.8 hm<sup>2</sup>,占沙化土地面积的 29.80%;重度沙化土地面积 1 229.1 hm<sup>2</sup>,占 15.07%;中度沙化土地面积 2 385.4 hm<sup>2</sup>,占 29.25%;轻度沙化土地面积 2 109.8 hm<sup>2</sup>,占 25.87%,并有明显沙化趋势土地面积 7 341.06 hm<sup>2</sup>,占玛曲县草地总面积的 2.02%。20 a 间沙化土地面积增加了一倍多,面积的增加主要以黄河岸边沙化类型为主,沙化严重的区域主要集中在黄河西南岸的河曲马场境内,并形成了长达

223 km 的沙丘带,沙丘分布由斑点状分布的半固定半沙化沙丘向集中连片、全沙化和流动沙丘演变。玛曲县理论最大载畜量为 246 万羊单位,适宜载畜量为 168 万羊单位,现实载畜量为 304 万羊单位。玛曲县全年牛羊粪产量约为  $5.00 \times 10^6$  t。牛羊粪以前大多用作牧民家燃料,近年来,由于玛曲县电力设施快速发展,以牛羊粪作为燃料已被取代。大量的牛羊粪堆积造成了一定的环境污染。近几年用于沙化草地治理和牛羊粪有机肥加工。

## 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 在玛曲县高寒沙化草地中选取一处小型流动沙丘( $33^{\circ}55'00''N$ ,  $102^{\circ}09'06''E$ )作为本次研究试验区域,该沙丘长 55 m,宽 40 m,高 5 m,海拔高度为 3 434 m。本次试验分别设置牛羊粪沙障+植物纤维沙障、牛羊粪沙障和植物纤维沙障 3 种处理。以没有沙障的区域为对照,共设置 4 个  $30 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  的大样地,每个样地面积约为  $360 \text{ m}^2$ ,原始地表环境为高寒草原,区域积沙体来源于沙化草地,气候与环境变暖是导致草地沙化的主要原因。此外,过度放牧等不合理的人为干预加剧了草地的退化。试验播种草种由垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、青海燕麦(*Avena sativa*)和中华羊茅(*Festuca sinensis*)构成,比例为垂穗披碱草:无芒雀麦:中华羊茅=1:0.5:0.5,草种播种量为  $200 \text{ kg/hm}^2$ 。草种由青海同德高寒牧草良种繁育基地提供,牛羊粪取自流动沙丘旁的牧民家。植物纤维沙障规格为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,孔隙度 50%,可降解,高度 20 cm,减风速效率  $\geq 60\%$ 。所有试验区域均播种一年生青海燕麦作为优势保护种,为帮助草种出苗及避免草种被强光灼伤,青海燕麦播种量为  $75 \text{ kg/hm}^2$ 。

1.2.2 试验布置 ①种子播种。2018 年 6 月初,选择晴朗的天气进行播种。分别将青海燕麦种子和试验草种(比例为垂穗披碱草:无芒雀麦:中华羊茅=1:0.5:0.5 的混合草种)均匀地撒在沙丘表面,播种结束后用耙子轻耙 2~3 遍,使种子均匀和表层沙子混合;②牛羊粪的布设:牛羊粪来源于试验沙丘旁牧民家,自然堆放腐熟,无需风干和粉碎,在布设之前,先将牛羊粪装在编织袋中,然后人工运往试验样地,将腐熟牛羊粪均匀平铺在牛羊粪沙障处理样地和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地,厚度约为 2 cm;③植物纤维网方格沙障(简称植物纤维沙障,下同)的布设:在牛羊粪沙障+植物纤维沙障和植物纤维沙障试验区布设沙障,设置规格  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,高度 20 cm;④围栏封育:设置围栏围封整个试验区,围栏要设置距离沙丘迎风坡坡脚 100 m 以外的区域,避免围栏过近影响试验效果。

1.2.3 测定指标及方法 2021 年 8 月中旬对试验区植被恢复情况进行调查。在试验区每种沙障组合区样地随机选取 5 个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的样方调查植物的种类、个体数、平均高度、平均干重和枯死率以及植物群落盖度和密度。其中,植物高度用卷尺测量,从地面测量至伸直叶片或茎、花序的顶端之间的距离,测量 10 株植物的高度,后期统计其平均值,盖度采用目测法,植物平均干重指标将样品带回实验室进行测量;于 2021 年 12 月前往试验区,在试验区 3 种沙障处理样地和对照区试验样地采集 0—5,5—10,10—20 cm 层土壤样品,每层土样均采取 3 组作为重复,混合均匀,后期带回实验室测定土壤理化性质。全氮含量采用半微量凯氏法测定;速效磷含量采用钼锑抗比色法—紫外 UV-2450 测定;速效钾含量采用火焰光度法—火焰光度计测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定<sup>[30]</sup>。植物在群落中的优势度指标用重要值来表示,表示不同植物在群落中的功能地位。统计调查各个样地植物的高度、盖度、频度及密度,计算各物种的重要值<sup>[31]</sup>,计算公式为:

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度}) / 4$$

式中:相对高度=(某物种的高度/所有物种的高度之和) $\times 100\%$ ;相对盖度=(某物种的盖度/所有物种的盖度之和) $\times 100\%$ ;相对频度=(某物种的频度/所有物种的频度之和) $\times 100\%$ ;相对密度=(某物种的密度/所有物种的密度之和) $\times 100\%$ 。

根据样地物种数量,采用 Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数及 Pielou 均匀度指数进行计算来表示物种多样性<sup>[32]</sup>,相关公式包括:Simpson 优势度指数( $D$ ):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ ):

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数( $R$ ):

$$R = \frac{S-1}{\ln N} \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数( $E$ ):

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

式中: $S$  为样地中观察到的植物物种数总和; $N$  为物种的个体总数; $i$  为样地内第  $i$  个物种; $P_i$  为第  $i$  个物种的个体数占有物种的个体总数的比例。

## 1.3 数据统计分析

本文观测和统计数据包括在对照和 3 种沙障和对照处理下植物群落盖度、枯死率、平均高度和平均干

重;多样性指数、重要值以及土壤碱解氮、全氮、速效磷和速效钾。采用了单因素方差分析(one-way ANOVA)的方法分析了 3 种沙障和对照处理后植被恢复和土壤养分的影响。在 0.05 的显著水平上,采用新复极差法比较了 3 种沙障和对照处理下植被恢复和土壤养分各参数平均值的差异。数据分析采用 SPSS 26.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同沙障处理对植被恢复的影响

2.1.1 不同沙障处理样地植物组成 如表 1 所示,3 种沙障处理样地和对照区样地植物组成存在差异。对照区共有 4 种植物,隶属于 2 科;植物纤维沙障处理样地有 7 种植物,隶属于 4 科;牛羊粪沙障处理样

地有 11 种植物,隶属于 7 科;牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地有 11 种植物,隶属于 6 科。由此可见,布设牛羊粪沙障样地植物群落组成要比未布设牛羊粪沙障样地丰富。同对照相比,植物种由 2 科 4 种增加到 7 科 11 种。但是,布设牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障之间物种数没有显著变化。而只布设植物纤维沙障,植物种类增加较少,仅由 4 种增加为 7 种。因此,在布设牛羊粪沙障情况下,再组合植物纤维沙障对植物种的增加没有显著作用。

3 种沙障处理样地和对照区样地植物重要值如表 2 所示,披碱草、赖草和灰绿藜是所有样地中重要值排前三的物种,说明这 3 种植物是各沙障样地的主要物种,其中披碱草在整个沙障样地相对最重要。

表 1 不同沙障处理样地植物群落组成

Table 1 Plant community composition at different sand barrier treatment sample plot

沙障	群落组成
对照	披碱草、赖草( <i>Leymus secalinus</i> )、灰绿藜( <i>Chenopodium glaucum</i> )、冰草( <i>Agropyron cristatum</i> )
植物纤维沙障	披碱草、赖草、灰绿藜、高山豆( <i>Tibetia himalaica</i> )、米口袋( <i>Gueldenstaedtia verna</i> )、露蕊乌头( <i>Aconitum gymnantrum</i> )、早熟禾( <i>Poa annua</i> )
牛羊粪沙障	披碱草、赖草、灰绿藜、苔草( <i>Carex spp</i> )、高山豆、委陵菜( <i>Potentilla chinensis</i> )、露蕊乌头、臭蒿( <i>Artemisia hedinii</i> )、草玉梅( <i>Anemone rivularis</i> )、三叶委陵菜( <i>Potentilla freyniana</i> )、早熟禾
牛羊粪沙障+植物纤维沙障	披碱草、赖草、灰绿藜、苔草、米口袋、羊茅、燕麦、多枝黄耆( <i>Astragalus polycladus</i> )、花苜蓿( <i>Medicago ruthenica</i> )、无芒雀麦、麻花芫( <i>Gentiana straminea</i> )

表 2 不同沙障处理样地植物的重要值

Table 2 Important values of plants at different sand barrier treatment sample plot

植物物种	沙障			
	对照	植物纤维沙障	牛羊粪沙障	牛羊粪沙障+植物纤维沙障
披碱草	0.72	0.386	0.42	0.39
赖草	0.12	0.269	0.18	0.17
灰绿藜	0.1	0.221	0.13	0.11
高山豆		0.027	0.031	
冰草	0.04			
委陵菜			0.044	
三叶委陵菜			0.054	
早熟禾		0.036	0.014	
燕麦				0.032
无芒雀麦				0.082
羊茅				0.078
臭蒿			0.044	
苔草			0.034	0.019
草玉梅			0.017	
露蕊乌头		0.034	0.029	
米口袋		0.025		0.014
多枝黄耆				0.037
花苜蓿				0.019
麻花芫				0.041

披碱草和赖草属于多年生草本,而灰绿藜属于一年生草本。在布设不同沙障后,冰草消失,其他植物种类增多。布设植物纤维沙障后增加了高山豆、早熟禾、露蕊乌头和米口袋;布设牛羊粪沙障后增加了三叶委陵菜、委陵菜、臭蒿、苔草、高山豆等 7 种植物;布设牛羊粪沙障+植物纤维沙障后增加了无芒雀麦、羊茅、麻花芫、燕麦等 7 种植物。布设牛羊粪后,披碱草、赖草和灰绿藜仍然是各沙障样地的优势种,它们在 3 种沙障中的重要值总和依次分别是 0.876,0.73,0.67。这表明虽然布设沙障后物种数增加较多,但是,它们在群落中的相对重要性逐渐降低。

2.1.2 植物的生长情况 如表 3 所示,不同沙障处理样地植物群落平均盖度差异显著( $p < 0.05$ ),且呈现牛羊粪沙障+植物纤维沙障>牛羊粪沙障>植物纤维沙障>对照;各沙障样地之间植物平均高度和植物平均干重也表现差异显著( $p < 0.05$ ),且呈现牛羊粪沙障>牛羊粪沙障+植物纤维沙障>植物纤维沙障>对照;各沙障样地之间植物枯死率也表现差异显著( $p < 0.05$ ),但它们之间的大小表现为:对照>植物纤维沙障>牛羊粪沙障>牛羊粪沙障+植物纤维沙障。这表明布设沙障后,试验区植物群落平均盖度、植物

平均高度和植物平均干重会显著增加, 枯死率显著减少。但是, 布设牛羊粪的沙障样地植物群落平均盖度、植物平均高度和平均干重增加更为明显, 枯死率最低。牛羊粪沙障样地比牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地植物群落平均盖度小, 枯死率没差别, 植物平均高度和平均干重比牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地要大。

2.1.3 植物多样性 如表 4 所示, 各沙障处理样地之间的优势度指数差异显著( $p < 0.05$ ), 且表现为: 对照 < 植物纤维沙障 < 牛羊粪沙障 < 牛羊粪沙障+植物纤维沙障。各沙障处理样地之间多样性指数和丰富

度指数差异显著( $p < 0.05$ ), 且变化一致, 均表现为: 对照 < 植物纤维沙障 < 牛羊粪沙障 < 牛羊粪沙障+植物纤维沙障, 说明布设不同沙障可以显著增加该区域物种多样性和丰富度, 特别是布设牛羊粪沙障后, 效果更为明显。各沙障区域之间均匀度指数没有显著差异( $p > 0.05$ ), 且均显著低于未布设沙障区域( $p < 0.05$ )。另外, 牛羊粪沙障区域和牛羊粪沙障+植物纤维沙障区域之间优势度指数、多样性指数、丰富度指数和均匀性指数均没有差异。说明在布设牛羊粪沙障的条件下再布设植物纤维沙障, 对植物的物种多样性增加没有效果。

表 3 不同沙障处理样地植物生长情况

Table 3 Plant growth at different sand barrier treatment sample plot

沙障	平均盖度/%	平均枯死率/%	平均高度/cm	平均干重/(g·m <sup>-2</sup> )
对照	7.28±2.82 <sup>d</sup>	9.55±1.43 <sup>a</sup>	6.67±2.25 <sup>d</sup>	4.46±1.68 <sup>d</sup>
植物纤维沙障	16.33±6.83 <sup>c</sup>	8.61±1.72 <sup>b</sup>	16.95±5.38 <sup>c</sup>	15.10±7.30 <sup>c</sup>
牛羊粪沙障	48.21±7.81 <sup>b</sup>	7.00±2.15 <sup>c</sup>	35.17±3.56 <sup>a</sup>	80.19±29.22 <sup>a</sup>
牛羊粪沙障+植物纤维沙障	53.79±8.94 <sup>a</sup>	6.80±2.17 <sup>c</sup>	30.70±1.94 <sup>b</sup>	71.70±25.80 <sup>b</sup>

注: 表中同列不同小写字母表示不同沙障组合样地间在 0.05 水平上差异显著。下同。

表 4 不同沙障处理样地植物的物种多样性

Table 4 Species diversity of plant at different sand barrier treatment sample plot

沙障	优势度指数	多样性指数	丰富度指数	均匀度指数
对照	0.34±0.03 <sup>c</sup>	0.32±0.11 <sup>c</sup>	0.26±0.15 <sup>c</sup>	0.80±0.02 <sup>a</sup>
植物纤维沙障	0.44±0.06 <sup>b</sup>	0.82±0.01 <sup>b</sup>	0.78±0.01 <sup>b</sup>	0.31±0.16 <sup>b</sup>
牛羊粪沙障	0.64±0.16 <sup>a</sup>	1.14±0.26 <sup>a</sup>	1.50±0.29 <sup>a</sup>	0.26±0.06 <sup>b</sup>
牛羊粪沙障+植物纤维沙障	0.72±0.28 <sup>a</sup>	1.20±0.22 <sup>a</sup>	1.58±0.31 <sup>a</sup>	0.22±0.13 <sup>b</sup>

## 2.2 不同沙障处理对土壤理化性质的影响

由表 5 可以看出, 布设牛羊粪沙障后, 0—5 cm 土壤全氮含量显著升高( $p < 0.05$ ), 而且牛羊粪沙障+植物纤维沙障土壤全氮含量显著高于牛羊粪沙障( $p < 0.05$ )。对照和植物纤维沙障土壤全氮含量较低, 且二者没有显著差异( $p > 0.05$ )。即布设植物纤维沙障对 0—5 cm 土壤全氮没有增加反而减少。

在 5—10 cm 和 10—20 cm 土层, 对照和牛羊粪沙障+植物纤维沙障土壤全氮含量均显著高于植物纤维沙障和牛羊粪沙障( $p < 0.05$ )土层, 牛羊粪沙障+植物纤维沙障大于对照, 而且显著低于 0—5 cm ( $p < 0.05$ )。因此, 牛羊粪沙障对土壤全氮的增加仅限于 0—5 cm, 且土壤全氮含量由 0.154 kg 增加到 0.491 g/kg。

表 5 不同沙障处理样地土壤全氮含量

Table 5 Soil total nitrogen content at different sand barrier treatment sample plot

土层/cm	土壤全氮含量			
	对照	植物纤维沙障	牛羊粪沙障	牛羊粪沙障+植物纤维沙障
0—5	0.154±0.076 <sup>ca</sup>	0.113±0.013 <sup>da</sup>	0.370±0.011 <sup>ba</sup>	0.491±0.126 <sup>aa</sup>
5—10	0.105±0.004 <sup>ab</sup>	0.076±0.001 <sup>bb</sup>	0.088±0.005 <sup>bb</sup>	0.110±0.020 <sup>ab</sup>
10—20	0.098±0.001 <sup>ab</sup>	0.080±0.003 <sup>bb</sup>	0.085±0.003 <sup>bb</sup>	0.101±0.048 <sup>ab</sup>

注: 表中第一个字母表示同一土层之间差异, 第 2 个字母表示不同土层之间的差异, 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

从表 6 可以看出, 在同一土层随着布设沙障不同, 土壤碱解氮差异较大。在 0—5 cm 土层, 牛羊粪

沙障+植物纤维沙障样地碱解氮最高, 显著高于其他 3 种类型( $p < 0.05$ )。它们的碱解氮大小依次为: 牛羊

粪沙障+植物纤维沙障>牛羊粪沙障>植物纤维沙障>对照,其中,牛羊粪沙障也显著高于对照和植物纤维沙障( $p<0.05$ )。在 5—10 cm 和 10—20 cm 土层,牛羊粪沙障+植物纤维沙障土壤碱解氮仍然最高,且显著高于其他 3 种处理( $p<0.05$ ),牛羊粪沙障与植物纤维沙障和对照之间碱解氮没有显著差异( $p>0.05$ )。这说明布设牛羊粪沙障仅对 0—5 cm 土

层碱解氮增加有显著作用,而对 5—10 cm 和 10—20 cm 土层没有显著影响。相反,布设牛羊粪沙障+植物纤维沙障不但对 0—5 cm 土层碱解氮增加最快,而且还显著增加了 5—10 cm 和 10—20 cm 土层的碱解氮含量( $p<0.05$ )。同对照样地相比,牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地土壤碱解氮由 4.78 mg/kg 依次增加为 13.99 和 19.14 mg/kg。

表 6 不同沙障处理样地土壤碱解氮含量

Table 6 Soil alkali-hydrolyzed nitrogen content at different sand barrier treatments sample plot mg/kg

土层/cm	土壤碱解氮含量			
	对照	植物纤维沙障	牛羊粪沙障	牛羊粪沙障+植物纤维沙障
0—5	4.78±1.49 <sup>ca</sup>	4.79±0.47 <sup>ca</sup>	13.99±1.09 <sup>ba</sup>	19.14±2.98 <sup>aa</sup>
5—10	3.16±0.16 <sup>bb</sup>	2.98±0.00 <sup>bb</sup>	3.34±0.16 <sup>bb</sup>	3.61±1.13 <sup>ab</sup>
10—20	2.80±0.16 <sup>bb</sup>	2.89±0.16 <sup>bb</sup>	2.92±0.16 <sup>bb</sup>	3.34±1.80 <sup>ab</sup>

如表 7 所示,在 0—5 cm 土层,牛羊粪沙障区域和牛羊粪沙障+植物纤维沙障区域土壤速效磷显著高于对照和植物纤维沙障区域,其中,在含有牛羊粪的两种沙障中,牛羊粪沙障+植物纤维沙障区域土壤速效磷含量也显著高于牛羊粪沙障区域。土层深度增加,这种牛羊粪沙障对土壤速效磷提升作用在逐步

减弱,5—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤速效磷含量与有无沙障没有关系,同对照一样低。因此,布设牛羊粪沙障对土壤速效磷增加作用主要作用在 0—5 cm 土层,且牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障效果最好,土壤速效磷含量由 1.64 mg/kg 依次增加为 5.54 和 6.20 mg/kg。

表 7 不同沙障处理样地土壤速效磷含量

Table 7 Soil available phosphorus content at different sand barrier treatment sample plot mg/kg

土层/cm	土壤速效磷含量			
	对照	植物纤维沙障	牛羊粪沙障	牛羊粪沙障+植物纤维沙障
0—5	1.64±0.96 <sup>ca</sup>	1.98±0.16 <sup>ca</sup>	5.54±0.53 <sup>ba</sup>	6.20±1.40 <sup>aa</sup>
5—10	1.17±0.03 <sup>ab</sup>	1.25±0.03 <sup>ab</sup>	1.29±0.05 <sup>ab</sup>	1.28±0.28 <sup>ab</sup>
10—20	1.03±0.14 <sup>ab</sup>	1.02±0.05 <sup>ab</sup>	1.10±0.11 <sup>ab</sup>	1.05±0.20 <sup>ab</sup>

表 8 为不同沙障处理样地土壤速效钾含量。从表 8 可以看出,在相同土层,牛羊粪沙障区域和牛羊粪沙障+植物纤维沙障区域的速效钾含量显著高于植物纤维沙障区域和对照( $p<0.05$ ),而且牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障之间没有显著差异( $p>0.05$ ),对照与植物纤维沙障之间也没有显著差异( $p>0.05$ ),同时,随着土层深度增加,各沙障处理

样地之间土壤速效钾含量的差异变小,因此,布设牛羊粪沙障对土壤速效钾的改良效果在 0—5 cm 表现较为突出,且牛羊粪沙障+植物纤维沙障的效果大于牛羊粪沙障。可见,牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障对沙化草地速效钾含量提升效果较好,土壤速效钾含量由 21.09 mg/kg 依次增加到 55.37 和 56.90 mg/kg。

表 8 不同沙障处理样地土壤速效钾含量

Table 8 Soil available potassium content at different sand barrier treatment sample plot mg/kg

土层/cm	土壤速效钾含量			
	对照	植物纤维沙障	牛羊粪沙障	牛羊粪沙障+植物纤维沙障
0—5	21.07±7.86 <sup>ba</sup>	21.93±8.82 <sup>ba</sup>	55.37±4.56 <sup>aa</sup>	56.90±10.22 <sup>aa</sup>
5—10	16.17±1.15 <sup>bb</sup>	16.34±0.30 <sup>bb</sup>	26.82±1.83 <sup>ab</sup>	29.33±10.53 <sup>ab</sup>
10—20	13.27±0.49 <sup>bc</sup>	13.67±1.10 <sup>bc</sup>	15.73±0.32 <sup>bc</sup>	15.57±2.82 <sup>bc</sup>

由表 9 可以看出,玛曲流动沙地无论是否布设沙障土壤整体呈现酸性。在同一沙障布设后,0—5 cm,

5—10 cm 和 10—20 cm 土层 pH 值均没有显著变化( $p>0.05$ )。

在同一土层,布设牛羊粪的沙障土壤 pH 值显著低于无沙障和植物纤维沙障( $p < 0.05$ ),而牛羊粪沙障处理样地和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地

土壤 pH 值之间没有显著差异( $p > 0.05$ )。这表明牛羊粪沙障具有降低 0—20 cm 土层 pH 值的作用。即牛羊粪布设后,土壤酸性增强。

表 9 不同沙障处理样地土壤 pH 值

Table 9 Soil pH value at different sand barrier treatment sample plot

土层/cm	土壤 pH 值			
	对照	植物纤维沙障	牛羊粪沙障	牛羊粪沙障+植物纤维沙障
0—5	6.01±0.01 <sup>aa</sup>	6.11±0.03 <sup>aa</sup>	5.75±0.00 <sup>ba</sup>	5.72±0.05 <sup>ba</sup>
5—10	6.04±0.03 <sup>aa</sup>	6.23±0.02 <sup>aa</sup>	5.65±0.03 <sup>ba</sup>	5.70±0.09 <sup>aa</sup>
10—20	6.09±0.01 <sup>aa</sup>	6.18±0.03 <sup>aa</sup>	5.72±0.08 <sup>ba</sup>	5.69±0.10 <sup>ba</sup>

### 3 讨论

牛羊粪除了含有丰富的营养、水分、有机酸、微生物等外,还有来自于牧区草甸上植物种子,这些种子经过牛羊胃消化后打破种子休眠,在牛羊粪堆积过程中在适宜温度、水分和养分和沙面固定的情况下就会迅速萌发、定居和生长,从而促进了植被恢复。

本文通过 3 种沙障对玛曲流动沙丘沙化草地治理研究发现:沙障内植物种类及物种多样性,群落平均盖度、平均高度和平均干重都有不同程度的提高。植物纤维沙障同牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障相比,虽然有一定的恢复效果,但牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障效果更好。这是因为牛羊粪覆盖增加了样地土壤温度和养分,有效促进种子萌发和幼苗生长。这一点与前人<sup>[33-34]</sup>研究结果一致。牛羊粪沙障处理和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理虽然均对植被恢复有良好效果,但牛羊粪沙障处理样地的植物平均高度和干物质积累要比牛羊粪沙障+植物纤维沙障多,牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地比牛羊粪沙障处理样地的植物群落平均盖度要大。

牛羊粪沙障处理样地没有植物纤维沙障阻挡,沙障区内的植物通风透光,有利于光合作用,所以植物高度和干物质积累较大。而牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理由于植物纤维沙障的阻挡,对于保持种子萌发和幼苗生长环境条件较牛羊粪沙障好,因此,植物群落平均盖度较大。而当随着幼苗进一步生长,受沙障阻挡,沙障内光合条件较牛羊粪沙障差,生长受到影响。同时,由于铺设牛羊粪数量相同,牛羊粪沙障+植物纤维沙障中植物盖度大,植物间营养竞争较牛羊粪沙障大。另外,牛羊粪沙障处理样地和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地物种数相同,且牛羊粪沙障的植物平均高度和干重显著高于牛羊粪沙障+植物纤维沙障。因此,在布设牛羊粪沙障后增加植物纤

维沙障没有必要。

植物纤维沙障布设提升了沙面温度和土壤含水量,有利于沙障内土壤微生物活动和土壤分化。同时,随着时间延长,沙障内物种数增加也对土壤具有改良作用,因此,植物纤维沙障对提升土壤肥力有一定作用,但是,3 a 后,植物纤维沙障大部分被降解,防风固沙效果也减弱,不能使土壤结皮得到很好固定,植物生长也受到威胁。牛羊粪覆盖对土壤肥力提升是众所周知。牛羊粪沙障处理和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理含有牛羊粪使得样地内全氮、碱解氮、速效磷和速效钾显著提升,特别是 0—5 cm 土壤表层,使得土壤 pH 值减小,土壤酸性增强。牛羊粪中除了提供土壤养分之外,还有增强土壤微生物活性,固定流沙,分泌有机酸作用,这使得土壤酸化。牛羊粪作为有机肥,全氮含量可达 0.7% 左右,可提高土壤的全氮及有机质含量,土壤有机质的部分来源为植物凋落物的输入<sup>[35-36]</sup>,而在牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地,有机质主要来源于牛羊粪和植物根系及植物枯死的叶片,其植物种类均高于植物纤维沙障和对照样地。所以,牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地的植物凋落物要多于植物纤维沙障和对照样地,这导致牛羊粪沙障和牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地碱解氮含量要高于植物纤维沙障和对照样地。在流动沙丘土壤中,速效磷主要来源于植物归还于土壤的磷<sup>[37]</sup>,所以,土壤速效磷含量受植被影响较大。根据不同沙障处理样地植物生长状况,牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地中的植物群落平均盖度高于牛羊粪沙障处理样地,导致牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地的速效磷大于植物纤维沙障处理样地。

布设不同牛羊粪沙障后,沙面得到固定,土壤温度增加,为种子萌发和定居创造了条件,同时促进了样地土壤分化和土壤微生物的活动,从而植物多样性增加,植物多样性的增加反过来改良了土壤。这与张

继义<sup>[38]</sup>研究结果一致。牛羊粪沙障处理样地和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地由于植物群落盖度较大和牛羊粪覆盖作用,植被恢复更为明显。但是牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地经过3 a后,植物纤维沙障降解,沙障微生境回到牛羊粪沙障处理样地的状态,这样,部分植物由于微生境变化逐步退出牛羊粪沙障+植物纤维沙障样地。导致牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理样地物种多样性,植物平均高度和平均干重以及植物群落平均盖度均低于牛羊粪沙障处理样地。因此,考虑长期恢复效果、成本和降解等因素,牛羊粪沙障是高寒区沙化草地和流动沙丘治理较为理想的工程措施。

## 4 结论

(1) 布设牛羊粪沙障可以显著提高沙化草地物种数、物种多样性、植物群落平均盖度、植物平均高度和干重,降低植物的枯死率,从而快速促进其植被恢复。

(2) 布设牛羊粪沙障可以显著提高沙化草地表层0—5 cm土壤的全氮、碱解氮、速效磷和速效钾,降低土壤pH值,增强了土壤肥力。

(3) 牛羊粪沙障处理和牛羊粪沙障+植物纤维沙障处理相比,前者植被恢复效果稍好一些,而后者对0—5 cm土壤理化性质提升强一些,但二者差别不是很大。因此在布设牛羊粪沙障后再增加植物纤维沙障的意义不大。

使用牛羊粪沙障是高寒区流动草地沙化和流动沙丘治理的较为理想的工程措施和有效途径。牛羊粪沙障就地取材,是一种环境友好型工程固沙材料,不仅克服了传统沙障治沙可能产生的二次污染,而且能够改良沙化土壤和增加土壤养分,应用前景极为广泛。

### [参 考 文 献]

[1] 孙建,张振超,董世魁.青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理[J].草业科学,2019,36(4):933-938,915-916.

[2] 宋清洁,崔霞,张瑶瑶,等.基于小型无人机与MODIS数据的草地植被覆盖度研究:以甘南州为例[J].草业科学,2017,34(1):40-50.

[3] 魏振海,董治宝,胡光印,等.近40年来若尔盖盆地沙丘时空变化[J].中国沙漠,2010,30(1):26-32.

[4] 后源,尚占环,欧阳峰,等.甘肃省玛曲县湿地环境问题及威胁因素的层次分析[J].湿地科学,2009,7(1):11-15.

[5] 徐先英,唐进年,金红喜.黄河首曲高寒草地沙化防治研究[M].甘肃兰州:甘肃科学技术出版社,2019:11-129.

[6] 王伟军,赵雪雁,万文玉,等.2000—2014年甘南高原植

被覆盖度变化及其对气候变化的响应[J].生态学杂志,2016,35(9):2494-2504.

- [7] 张登山,田丽慧,吴汪洋,等.青海高原沙化土地综合治理研究进展[C]//青海格尔木:中国治沙暨沙业学会2018年学术年会论文集,2018.
- [8] 冯云飞,李猛,李少伟,等.2010—2017年藏北高寒退化草地禁牧恢复效果评价[J].草业科学,2019,36(4):1148-1162.
- [9] 陈子萱,田福平,武高林,等.补播禾草对玛曲高寒沙化草地各经济类群地上生物量的影响[J].中国草地学报,2011,33(4):58-62.
- [10] 任艳丽.流动沙丘治理技术[J].现代农村科技,2022(7):49.
- [11] 刘振恒,武高林,仁青草,等.发展以燕麦为支柱产业的可持续高寒草地畜牧业[J].草业科学,2007,24(9):67-69.
- [12] 孙华方,李希来,金立群,等.黄河源区建植17年栽培草地退化响应因子分析[J].草业科学,2019,36(5):1240-1248.
- [13] 李银科,唐进年,王祺,等.高寒草原不同种草方式对流动沙丘植被恢复的影响[J].水土保持通报,2021,41(1):22-28.
- [14] 王祺,唐进年,李银科,等.甘南州沙化草地流动沙丘治理与恢复关键技术:以黄河首曲为例[J].草业科学,2020,37(9):1719-1728.
- [15] 柳小妮,孙九林,张德盟,等.东祁连山不同退化阶段高寒草甸群落结构与植物多样性特征研究[J].草业学报,2008,17(4):1-11.
- [16] 邹丽娜,周志宇,颜淑云,等.玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应[J].中国草地学报,2009,31(6):80-87.
- [17] 马玉寿,郎百宁,李青云,等.江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J].草业科学,2002,19(9):1-5.
- [18] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40.
- [19] 杜子银,蔡延江,王小丹,等.放牧牲畜粪便降解及其对草地土壤养分动态的影响研究进展[J].生态学报,2019,39(13):4627-4637.
- [20] 姜世成,周道玮.牛粪堆积对草地影响的研究[J].草业学报,2006,15(4):30-35.
- [21] 韩雨航,马玉涛,苑佰飞,等.粪肥对苏打盐碱地土壤有机碳组分特征的影响[J].福建农业学报,2022,37(3):390-397.
- [22] 何瑞成,吴景贵,李建明.不同有机物料对原生盐碱地水稳性团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):310-316.
- [23] 全利红,祝凌,赵楠,等.不同比例有机无机肥配施土壤



- 腐殖质组分的光谱学特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(2): 523-528.
- [24] Moe S R, Wegge P. Effects of deposition of deer dung on nutrient redistribution and on soil and plant nutrients on intensively grazed grasslands in Lowland Nepal [J]. *Ecological Research*, 2007, 23(1): 227-234.
- [25] 逯军峰, 董治宝, 胡光印, 等. 甘肃省玛曲县土地沙漠化发展及其成因分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 604-609.
- [26] 袁宏波, 王辉, 李晓兵, 等. 玛曲县天然草地沙化动态及现状分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2006, 41(1): 73-78.
- [27] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1079-1086.
- [28] 张余, 张克存, 孟宪红, 等. 高寒草地沙化过程的气候因子分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(1): 187-195.
- [29] 柴成武, 徐先英, 张莉, 等. 玛曲县气候特征分析[J]. *草原与草坪*, 2012, 32(2): 74-77.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
- [31] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 近 10 年青海湖东沙地人工植被群落特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2109-2121.
- [32] Magurran A E. *Ecological Diversity and Its Measurement* [M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 1988.
- [33] 田福平, 陈子萱, 石磊. 施肥对玛曲高寒沙化草地地上生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 35-38.
- [34] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. *草业通报*, 2007, 16(5): 34-39.
- [34] 燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(9): 303-307.
- [35] 陈春良, 鲍凯强, 王梦莹, 等. 植被去除对侵蚀环境土壤有机质和养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 131-136.
- [36] 丁越岩, 杨劫, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(2): 18-25.
- [37] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 153-163.
- [38] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 86-92.

(上接第 60 页)

- [16] 廖娇娇, 窦艳星, 安韶山. 黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 75-82.
- [17] 林国伟, 李志, 李晨曦, 等. 黄土高原白草原土壤水分特征及对土地利用变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 32-38.
- [18] 黄亚楠, 林国伟, 李志. 黄土高原白草原土地利用变化对地下水补给的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 250-255.
- [19] Hu Ya, Li Xiangyun, Guo Aixia, et al. Species diversity is a strong predictor of ecosystem multifunctionality under altered precipitation in desert steppes [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108762.
- [20] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2014, 116: 51-59.
- [21] Deng Lei, Wang Kaibo, Li Jianping, et al. Effect of soil moisture and atmospheric humidity on both plant productivity and diversity of native grasslands across the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 525-531.
- [22] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, et al. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 185(1/4): 221-240.
- [23] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [24] Yang Yang, Cheng Huan, Dou Yanxing, et al. Plant and soil traits driving soil fungal community due to tree plantation on the Loess Plateau [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 708: 134560.
- [25] Yang Yang, Liu Bingru, An Shaoshan. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China [J]. *Catena*, 2018, 166: 328-338.
- [26] 吕渡. 不同恢复类型植被细根分布特征及其与土壤理化性质耦合关系[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.