

# 高寒草原不同种草方式对流动沙丘植被恢复的影响

李银科, 唐进年, 王祺, 袁宏波, 杨雪梅, 何芳兰

(甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地,  
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)

**摘要:** [目的] 研究种草方式对流动沙丘植被恢复效果的影响, 为高寒草原沙化土地治理提供技术支持。[方法] 在甘肃省玛曲县流动沙丘, 设置不同播种方式、不同草种和不同种草模式试验, 分析不同种草方式对植被恢复的影响。[结果] 撒播和条播对植被恢复无显著影响。总体上草种对植被恢复影响不大, 流动沙丘植被恢复中只需种植垂穗披碱草(*Elymus nutans*)即可。种草模式对植被恢复影响很大。牧草种植第 2 年, 与没有铺施牛羊粪的种草模式相比, 铺施牛羊粪种草模式下牧草高度、密度、盖度、地上生物量鲜重和干重均显著且大幅增加, 同样铺施牛羊粪的模式中, 牛羊粪厚度约 2 cm 的牛羊粪+无沙障模式下牧草高度和盖度显著地高于牛羊粪厚度约 1 cm 的牛羊粪+沙障模式。牧草生长状况与土壤养分、持水能力具有良好的正相关关系。[结论] 牛羊粪+无沙障种草模式是研究区流动沙丘植被恢复的最优模式。铺施牛羊粪厚度达到约 2 cm, 就再无必要设置其他沙障进行固沙。

**关键词:** 流动沙丘; 植被恢复; 种草模式; 高寒草原

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)01-0022-07

**中图分类号:** S157.2

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.004; Li Yinke, Tang Jinnian, Wang Qi, et al. Effects of different grass planting methods on vegetation restoration of moving sand dune in alpine grassland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 22-28.

## Effects of Different Grass Planting Methods on Vegetation Restoration of Moving Sand Dune in Alpine Grassland

Li Yinke, Tang Jinnian, Wang Qi, Yuan Hongbo, Yang Xuemei, He Fanglan

(State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] To provide technical support for desertification control, the effects of grass planting methods on vegetation restoration of moving sand dunes in alpine grasslands were studied. [Methods] On a moving sand dune of Maqu County, Gansu Province, experiments involving different seeding modes, different grass species, and different grass planting modes were conducted to analyze the effects of different grass planting methods on vegetation restoration. [Results] Broadcast seeding and drill seeding had no significant effect on vegetation restoration. Overall, grass species had little effect on vegetation restoration, and it was only necessary for planting *Elymus nutans* in the vegetation restoration of moving dunes. The planting mode had a significant effect on vegetation restoration. In the second year of grass planting, the height, density, coverage, above-ground biomass fresh weight, and dry weight of grass were significantly increased in paving cow and sheep dung mode compared with no paving cow and sheep dung mode. In the same modes of paving cow and sheep dung, the height and coverage of grass were significantly higher in “cow and sheep dung + no sand barrier grass” mode with a thickness of cow and sheep dung of approximately 2 cm than in “cow and sheep dung + sand barrier grass” mode with a thickness of cow and sheep dung of approximately 1 cm. The grass growth status was positively correlated with soil nutrient and water holding capacity. [Conclusion]

收稿日期: 2020-09-13

修回日期: 2020-11-19

资助项目: 国家重点研发计划课题“高寒沙化土地综合治理关键技术研发与示范”(2017YFC0504804)

第一作者: 李银科(1982—), 男(汉族), 甘肃省徽县人, 副研究员, 硕士, 副研究员, 主要从事荒漠化防治方面的研究工作。Email: lyk819@163.com。

“Cow and sheep dung + no sand barrier” grass planting mode was the optimal mode of vegetation restoration of moving dunes in the study area. If the thickness of the cow and sheep dung was approximately 2 cm, it was no longer necessary to set other sand barriers for sand fixation.

**Keywords:** moving sand dune; vegetation restoration; grass planting mode; alpine grassland

玛曲高寒草原是黄河上游重要的水源涵养区和补给区。近几十年来,受全球气候变暖和人为活动的影响,草地退化严重,沙化土地面积不断扩大,已成为严重的生态环境问题<sup>[1-3]</sup>。高寒区草地沙化成因<sup>[4-6]</sup>及治理技术研究得到了众多学者的关注,但高寒沙化土地治理技术研究起步晚,基础理论研究相对薄弱,目前尚未形成适宜当地的系统、成熟的治理技术和模式<sup>[7]</sup>。关于高寒沙化土地治理,已开展了封育、补播、施肥<sup>[8-9]</sup>、植物种选择<sup>[10]</sup>、设置沙障<sup>[11-12]</sup>及综合治理等<sup>[13]</sup>方面的研究,取得了一些初步成效,如位于海拔较低的青海共和盆地的沙珠玉治沙站(海拔 2 871 m)采取“沙障+灌木”模式进行流动沙丘治理<sup>[14]</sup>。但对于高海拔的若尔盖草原(海拔 3 300 m 以上),“沙障+灌木”模式治理流动沙丘并不成功。相对于干旱半干旱地区,高寒区水分充足,更有利于沙丘植被恢复,所以流动沙丘治理应以生物措施为主,工程措施为辅。已有高寒沙化土地治理研究以防治思路<sup>[15]</sup>、防治途径探讨<sup>[16-17]</sup>和沙障固沙<sup>[18]</sup>居多,生物措施以栽植灌木<sup>[19-20]</sup>为主,对以植被恢复为目的、种植牧草治理沙化土地的技术研究鲜为报道。

高寒草地生态系统脆弱,抗干扰能力差,极易受到人为等因素的干扰,造成草地退化,植被一旦遭受破坏,依靠自然恢复不仅周期长,而且非常困难<sup>[21]</sup>。人工辅助措施是退化土地植被快速恢复的重要途径<sup>[22]</sup>,合理有效的人工辅助措施尤为重要。人们在甘肃省玛曲县曾使用“沙障+灌木”治理流动沙丘,效果不好。该区原生植被为草本植物,通过种植牧草来进行沙化土地植被恢复是最切实可行的治理手段。流动沙丘表面覆盖牛羊粪既可以固沙、保持水土,又能为植物生长提供养分。本研究结合铺施牛羊粪种植牧草,在玛曲县开展流动沙丘植被恢复试验,以期高寒区沙化土地治理提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于青藏高原东南缘的甘肃省玛曲县,年平均气温 1.1 ℃—2.7 ℃,极端最低气温 -29.6 ℃,最高气温 23.6 ℃,无绝对无霜期,年平均降水量 501.6~615.5 mm,主要集中于 5—9 月,年平均蒸发量 1 000~1 500 mm,年平均风速 2.5 m/s,最大风速 36 m/s,8 级以上大风日数 77.1 d,最多日数达 121 d,

每年 12 月至翌年 5 月为大风季节,气候高寒阴湿,属半湿润草原区。地带性土壤为草甸土,土层沙源丰富,地表部分被沙土覆盖,有不连续的流动沙丘分布。植被以藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、垂穗披碱草、疏花针茅(*Stipa penicillata*)、高羊茅(*Festuca elata*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)等为主,沙化草地以褐鳞苔草(*Carex brunnescens*)、赖草(*Leymus secalinus*)等为主。

### 1.2 试验设计

本研究试验在一个小型流动沙丘(102°09′06″E, 33°55′00″N, H 3 433 m)上进行,该沙丘长 55 m,宽 40 m,高 5 m,分为牛羊粪+无沙障、牛羊粪+沙障、无牛羊粪+沙障和无牛羊粪+无沙障 4 种种草模式。牛羊粪+无沙障模式采用撒播和条播两种播种方式,牛羊粪+沙障用 5 种草种分别播种。试验草种包括垂穗披碱草、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)、燕麦(*Avena sativa*),均为青海同德高寒牧草良种繁育基地生产。牛羊粪来源于试验沙丘旁牧民家,沙障设置为 1 m×1 m 植物纤维网方格,植物纤维网为甘肃汇投治沙科技股份有限公司生产,其性能指标:透气性 5 000~7 000 mm/s,减风速效率 ≥60%,透风率 60%±5%。从迎风坡底部沿主风向方向划出 30 m,垂直于主风向划出 48 m 的范围作为迎风坡试验区,沿垂直于主风向方向将迎风坡试验区分为 8 个 30 m×6 m 的样地,依次布置牛羊粪+无沙障模式的撒播和条播试验、牛羊粪+沙障模式的 5 种草种试验和无牛羊粪+沙障种草模式。从背风坡底部开始,纵向划出 3 m,横向划出 20 m 的范围布置无牛羊粪+无沙障模式试验。草种选择适应高寒区生长的多年生植物种垂穗披碱草、无芒雀麦、中华羊茅。所有试验样地均播种一年生牧草燕麦,为帮助试验草种破土出苗和遮阴避免强光灼伤幼苗。2018 年 6 月初布置试验,用围栏围封试验区,试验布置具体情况见表 1。

分别于 2018 年 8 月底和 2019 年 9 月初调查牧草生长情况。在每个试验样地随机选取 5 个 1 m×1 m 的样方调查物种高度、密度、盖度、地上生物量等指标。2018 年调查时混播的 3 种牧草,由于幼苗小,难以分辨;2019 年调查时发现混播的 3 种牧草群落垂穗披碱草比例占绝对优势,无芒雀麦和中华羊茅的数

量不及 3 种牧草总数的 3%，所以统计时都按垂穗披碱草计。由于新侵入的物种种类和数量很少，所以以人工播种草种的高度和密度代表所有物种的高度和密度，盖度和地上生物量为植被总盖度和总生物量。高度取 10 株的平均值，盖度用目测法，地上生物量用刈割法。2019 年调查时，在每个调查样方内取 0—5 cm 土层土样 1 个，测定土壤有机质(重铬酸钾氧化—外加热法)、全氮(半微量凯氏法)、速效磷(碳

酸氢钠提取—钼锑抗比色法)、pH 值(电极法)、电导率(电导仪法)、机械组成(粒度仪法)和田间持水量(环刀法)。

### 1.3 数据分析

数据分析采用 SPSS 13.0 统计软件，分别以播种方式、不同草种和种草模式为变量因素对牧草生长指标进行单因素方差分析，用最小显著性差异 LSD( $p < 0.05$ )法进行处理间差异显著性比较。

表 1 不同种草方式试验设置情况

种草模式	草种	播种方式	实施步骤
牛羊粪+无沙障	混合草种	撒播	迎风坡种植，先将燕麦和试验草种均匀地撒在沙丘表面，用耙子将表层沙子和种子混合，最后铺施腐熟牛羊粪，厚度约 2 cm
	混合草种	条播	迎风坡种植，先将燕麦种子撒在沙丘表面，然后开沟，深度约 8 cm，将试验草种撒于沟底部，行距 30 cm，行向与主风向垂直，用耙子填沟、同时把燕麦种子和表层沙子混合，最后铺施腐熟牛羊粪，厚度约 2 cm
牛羊粪+沙障	无芒雀麦	撒播	迎风坡种植，先将草种均匀地撒在沙丘表面，用耙子将表层沙子和种子混合，然后撒燕麦种子，再铺施牛羊粪，厚度约 1 cm，最后设置沙障。无芒雀麦样地原生少量赖草
	中华羊茅		
	垂穗披碱草		
	混合草种		
无牛羊粪+沙障	混合草种	撒播	迎风坡种植，先将燕麦和试验草种均匀地撒在沙丘表面，用耙子将表层沙子和种子混合，最后设置沙障。样地原生少量赖草
	混合草种	条播	背风坡种植，先将燕麦种子撒在沙丘表面，然后开沟，深度约 12 cm，将试验草种撒于沟底部，行距 30 cm，行向与主风向平行，用耙子填沟、同时把燕麦种子和表层沙子混合

注：①草种混合比例为垂穗披碱草：无芒雀麦：中华羊茅=1：0.5：0.5；②所有样地燕麦播种量为 75 kg/hm<sup>2</sup>，其他混播或单播草种播种量均为 200 kg/hm<sup>2</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 播种方式和草种对牧草生长的影响

在牛羊粪+无沙障种草模式下，比较撒播和条播

对牧草生长的影响。2018 年，两种播种方式下牧草高度、密度、盖度均无显著差异；2019 年，两种播种方式下牧草高度、密度、盖度、地上生物量鲜重和干重均无显著差异(表 2)，表明播种方式对牧草生长没有影响。

表 2 高寒草原不同播种方式下牧草生长状况

年份	播种方式	高度/cm	密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	盖度/%	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
					鲜重	干重
2018	撒播	6.89±0.71 <sup>a</sup>	832±445 <sup>a</sup>	9.0±1.0 <sup>a</sup>	—	—
	条播	8.80±1.17 <sup>a</sup>	1 020±334 <sup>a</sup>	10.3±2.1 <sup>a</sup>	—	—
2019	撒播	57.4±6.7 <sup>a</sup>	1 724±318 <sup>a</sup>	45.0±5.0 <sup>a</sup>	277±46 <sup>a</sup>	126±22 <sup>a</sup>
	条播	58.2±9.6 <sup>a</sup>	1 680±154 <sup>a</sup>	39.4±2.4 <sup>a</sup>	234±67 <sup>a</sup>	105±31 <sup>a</sup>

注：同一年份同列数据后标相同字母表示不同处理间差异不显著( $p > 0.05$ )。下同。

在牛羊粪+沙障种草模式下，比较不同草种对牧草生长的影响。如表 3 所示，2018 年，5 种草种之间高度、密度和盖度均无显著差异。2019 年，垂穗披碱草、混播和包衣垂穗披碱草高度分别显著高于无芒雀麦和中华羊茅，中华羊茅密度显著大于其他草种、无芒雀麦密度最小且显著小于中华羊茅和垂穗披碱草，无芒雀

麦盖度显著高于其他草种，地上生物量鲜重和干重 5 种草种之间均无显著差异。无芒雀麦盖度和生物量较大，与该样地原生有少量赖草有关。与种植其他草种相比，单种无芒雀麦虽然盖度最大，但密度最低；单种中华羊茅虽然密度较大，但盖度和地上生物量和其他草种相当；再者，无芒雀麦和中华羊茅高度都不占优

势,地上生物量和其他 3 种草种无显著差异。因此认为,5 种试验草种的生长状况差异不大,对植被恢复的作用相当。与 2018 年相比,所有草种 2019 年高度、

密度和盖度均大幅增加,这是由于多年生牧草种植当年生长量小、无分蘖、无抽穗,第 2 年有分蘖、而且植株生长更高更大,中华羊茅和垂穗披碱草有抽穗。

表 3 高寒草原种植不同草种下牧草生长状况

年份	草种	高度/cm	密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	盖度/%	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
					鲜重	干重
2018	无芒雀麦	5.5±0.5 <sup>a</sup>	581±188 <sup>a</sup>	3.3±0.6 <sup>a</sup>	—	—
	中华羊茅	5.2±0.6 <sup>a</sup>	541±254 <sup>a</sup>	4.0±2.6 <sup>a</sup>	—	—
	垂穗披碱草	6.3±0.9 <sup>a</sup>	415±95 <sup>a</sup>	4.7±2.9 <sup>a</sup>	—	—
	混合草种	7.6±2.0 <sup>a</sup>	700±315 <sup>a</sup>	5.3±3.2 <sup>a</sup>	—	—
	包衣垂穗披碱草	7.0±2.3 <sup>a</sup>	696±153 <sup>a</sup>	7.0±2.6 <sup>a</sup>	—	—
2019	无芒雀麦	23.1±3.6 <sup>b</sup>	1 049±507 <sup>c</sup>	46.0±21.0 <sup>a</sup>	228±32 <sup>a</sup>	100±13 <sup>a</sup>
	中华羊茅	25.7±11.1 <sup>b</sup>	2 200±483 <sup>a</sup>	26.6±3.2 <sup>b</sup>	164±32 <sup>a</sup>	74±17 <sup>a</sup>
	垂穗披碱草	46.5±7.7 <sup>a</sup>	1 914±249 <sup>ab</sup>	29.8±13.3 <sup>b</sup>	219±45 <sup>a</sup>	106±22 <sup>a</sup>
	混合草种	48.0±5.4 <sup>a</sup>	1 519±266 <sup>bc</sup>	23.2±4.7 <sup>b</sup>	195±83 <sup>a</sup>	75±31 <sup>a</sup>
	包衣垂穗披碱草	57.4±11.3 <sup>a</sup>	1 676±758 <sup>abc</sup>	21.2±6.3 <sup>b</sup>	242±151 <sup>a</sup>	120±85 <sup>a</sup>

## 2.2 种草模式对牧草生长的影响

在牛羊粪+无沙障种草模式中用撒播、牛羊粪+沙障种草模式中用混播、与无牛羊粪+沙障、无牛羊粪+无沙障进行种草模式间的差异性比较。由表 4 可知,2018 年,无牛羊粪+沙障模式牧草高度、密度

和盖度均最小,而且密度和盖度均显著小于其他种草模式。无牛羊粪+无沙障模式牧草高度、密度和盖度均显著大于其他模式。牛羊粪+无沙障模式和牛羊粪+沙障模式之间牧草高度、密度和盖度均无显著差异。

表 4 高寒草原不同种草模式下牧草生长状况

年份	种草模式	高度/cm	密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	盖度/%	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
					鲜重	干重
2018	牛羊粪+无沙障	6.89±0.71 <sup>b</sup>	832±445 <sup>a</sup>	9.0±1.0 <sup>ab</sup>	—	—
	牛羊粪+沙障	7.55±1.99 <sup>b</sup>	700±315 <sup>a</sup>	5.3±3.2 <sup>b</sup>	—	—
	无牛羊粪+沙障	2.91±0.18 <sup>b</sup>	60±66 <sup>b</sup>	0.7±0.3 <sup>c</sup>	—	—
	无牛羊粪+无沙障	18.65±4.92 <sup>a</sup>	1 163±299 <sup>a</sup>	11.3±2.1 <sup>a</sup>	—	—
2019	牛羊粪+无沙障	57.4±6.7 <sup>a</sup>	1724±318 <sup>a</sup>	45.0±5.0 <sup>a</sup>	277±46 <sup>a</sup>	126±22 <sup>a</sup>
	牛羊粪+沙障	48.0±5.4 <sup>b</sup>	1 519±266 <sup>a</sup>	23.2±4.7 <sup>b</sup>	195±83 <sup>b</sup>	75±31 <sup>b</sup>
	无牛羊粪+沙障	9.9±1.1 <sup>d</sup>	134±126 <sup>c</sup>	2.0±1.3 <sup>d</sup>	21±10 <sup>c</sup>	10±4 <sup>c</sup>
	无牛羊粪+无沙障	23.5±7.2 <sup>c</sup>	692±353 <sup>b</sup>	16.2±4.9 <sup>c</sup>	64±26 <sup>c</sup>	29±12 <sup>c</sup>

2019 年,与没有施牛羊粪的种草模式相比,铺施牛羊粪种草模式下牧草高度、密度、盖度、地上生物量鲜重和干重均显著增加,而且大幅增加(表 4),由于铺施牛羊粪较多,牛羊粪+无沙障模式(牛羊粪厚度约 2 cm)下牧草高度和盖度显著地高于牛羊粪+沙障模式(牛羊粪厚度约 1 cm)。同样不施牛羊粪的情况下,背风坡的无牛羊粪+无沙障模式可能由于较少受大风的直接吹蚀,水热条件较好,牧草生长状况明显优于迎风坡的无牛羊粪+沙障模式。

无牛羊粪+无沙障模式下,牧草种植当年生长情况比其他 3 种模式优势非常明显,但经过一个冬春风季以后,第二年的生长情况远不及铺施牛羊粪模式,

这说明铺施牛羊粪对牧草的安全越冬具有非常重要的作用。

与 2018 年相比,2019 年铺施牛羊粪的种草模式下牧草高度、密度和盖度均大幅增加,而在没有施牛羊粪的种草模式下牧草高度、密度和盖度增加幅度较小,甚至密度有减小的情况(无牛羊粪+无沙障模式)。2019 年牧草密度增大是因为有分蘖,密度减小是由于部分根系被风蚀裸露而死亡的原因。

## 2.3 种草模式对土壤性质的影响及其与牧草生长的关系

与没有施牛羊粪的种草模式相比,铺施牛羊粪使得土壤养分和保持水分状况明显改善(表 5),其中,

牛羊粪+无沙障模式施牛羊粪较多,土壤有机质、全氮、速效磷和田间持水量显著增加;牛羊粪+沙障模式土壤速效磷和田间持水量显著增加。由于无牛羊

粪+无沙障模式在沙丘背风坡实施,土壤砂粒含量相对较高。铺施牛羊粪也有利于土壤粉粒和黏粒含量的增加。

表 5 高寒草原不同种草模式下 0—5 cm 土层土壤理化性质

种草模式	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值	电导率/ (us·cm <sup>-1</sup> )	机械组成/(mm,%)			田间持水量/%
						2~0.05	0.05~0.002	<0.002	
牛羊粪+无沙障	14.9±8.3 <sup>a</sup>	0.61±0.33 <sup>a</sup>	18.7±5.6 <sup>a</sup>	7.66±0.06 <sup>a</sup>	66.8±4.0 <sup>a</sup>	93.7±1.3 <sup>b</sup>	5.7±1.0 <sup>a</sup>	0.7±0.3 <sup>a</sup>	27.3±3.7 <sup>a</sup>
牛羊粪+沙障	6.2±1.8 <sup>b</sup>	0.35±0.07 <sup>b</sup>	15.0±5.5 <sup>a</sup>	7.65±0.09 <sup>a</sup>	64.8±8.6 <sup>a</sup>	94.5±1.2 <sup>b</sup>	5.0±0.9 <sup>ab</sup>	0.5±0.2 <sup>ab</sup>	26.3±1.7 <sup>a</sup>
无牛羊粪+沙障	3.7±0.4 <sup>b</sup>	0.18±0.02 <sup>b</sup>	5.9±2.6 <sup>b</sup>	7.72±0.14 <sup>a</sup>	64.6±6.4 <sup>a</sup>	94.8±0.7 <sup>ab</sup>	4.6±0.7 <sup>abc</sup>	0.6±0.3 <sup>ab</sup>	20.0±1.2 <sup>b</sup>
无牛羊粪+无沙障	3.0±0.3 <sup>b</sup>	0.16±0.01 <sup>b</sup>	4.4±1.9 <sup>b</sup>	7.69±0.12 <sup>a</sup>	61.6±1.5 <sup>a</sup>	96.0±0.8 <sup>a</sup>	3.8±0.6 <sup>c</sup>	0.3±0.2 <sup>b</sup>	20.8±1.1 <sup>b</sup>

由表 6 可知,除密度、干重与土壤有机质之间的相关关系不显著外,牧草高度、密度、盖度、地上生物量鲜重和干重分别与土壤有机质、全氮、速效磷和田间持水量呈显著或极显著的正相关关系。高度、密度

和盖度分别与砂粒含量呈显著或极显著的负相关关系,分别与粉粒含量呈显著或极显著的正相关关系。这进一步说明良好的土壤养分条件和持水能力对牧草生长的具有重要促进作用。

表 6 高寒草原牧草生长状况与土壤理化性质的相关关系

项目	密度	盖度	鲜重	干重	有机质	全氮	速效磷	电导率	pH 值	砂粒	粉粒	黏粒	田间持水量
高度	0.71**	0.79**	0.85**	0.78**	0.53**	0.58**	0.72**	0.25	-0.02	-0.42*	0.48**	0.15	0.79**
密度		0.72**	0.71**	0.62**	0.32	0.43**	0.57**	0.08	-0.03	-0.34*	0.38*	0.11	0.67**
盖度			0.80**	0.71**	0.68**	0.68**	0.71**	0.22	-0.06	-0.47**	0.49**	0.30	0.71**
鲜重				0.98**	0.47**	0.49**	0.61**	0.13	-0.21	-0.30	0.32	0.17	0.68**
干重					0.34	0.35*	0.45**	0.08	-0.32	-0.17	0.17	0.17	0.55**
有机质						0.95**	0.75**	0.40*	-0.09	-0.68**	0.66**	0.61**	0.77**
全氮							0.78**	0.50**	0.00	-0.76**	0.75**	0.66**	0.86**
速效磷								0.52**	0.05	-0.75**	0.77**	0.56**	0.83**
电导率									0.41*	-0.65**	0.65**	0.52**	0.53**
pH 值										-0.39*	0.42*	0.19	-0.04
砂粒													-0.99**
粉粒													-0.86**
黏粒													0.77**
													0.65**
													0.51**

注: \* 为显著相关( $p < 0.05$ ), \*\* 为极显著相关( $p < 0.01$ )。

### 3 讨论

本试验经过 2 个生长季的结果表明,铺施牛羊粪情况下,牧草整体生长情况良好,能安全越冬,流动沙丘植被快速恢复,效果非常明显。撒播和条播两种播种方式对牧草生长基本没有影响,不同草种的影响也不大。从混播样地来看,垂穗披碱草比例从播种时的 50% 到 2 a 后植株占绝对优势,而无芒雀麦和中华羊茅两者总和从播种时的 50% 到 2 a 多后植株占比不足 3%,足以说明垂穗披碱草竞争力很强。种植当年的 2018 年,各个草种均无抽穗,2019 年调查发现垂穗披碱草抽穗率很高,而且种子成熟很好,中华羊茅抽穗很少,无芒雀麦无抽穗植株,反映了无芒雀麦和中华羊茅种子成熟周期长,繁殖力差。2019 年,在混播样地同时调查了 3 种试验草种的根系,垂穗披碱草、

无芒雀麦和中华羊茅的根冠比分别为 2.7, 2.1, 1.2, 最长根长分别为 18, 13, 12 cm, 垂穗披碱草发达的根系支撑了其强大的竞争力和繁殖力。再考虑到种植第 2 年(2019 年),垂穗披碱草高度比无芒雀麦和中华羊茅均高出一倍左右,防风固沙优势明显。所以,3 种试验草种只需播种垂穗披碱草就可以满足研究区沙化土地植被恢复的需要。试验同时播种一年生牧草燕麦,其出苗生长快、当年生长量大,具有帮助多年生草种破土出苗、遮阴降低地表极端高温,改善局部小气候的作用<sup>[23]</sup>,也有一定的防风固沙的作用,为其他牧草的生长提供有利条件,促进地表植被恢复。试验中包衣垂穗披碱草比不包衣的生长状况相对更好,但种子价格较高,可根据成本灵活选择。

研究区风大沙多,流动沙丘植被恢复首先要考虑固沙问题<sup>[24]</sup>,只有沙丘被固定,牧草生长才能有稳定

的土壤环境,才能安全越过冬春风季。风季土壤蒸发强烈,干沙层增厚,会引起根系缺水,如果沙面固定不好,在大风的吹蚀下根系露出沙面,导致根系死亡。本试验中沙丘表面覆盖牛羊粪的一个重要的作用就是阻止风季牧草根系周围沙粒被风吹蚀,保护根系、固定沙丘,相当于沙障的作用,只要铺施牛羊粪达到一定的量,就可以不用另外设置其他沙障,铺施较多牛羊粪情况下(厚度约 2 cm),网格沙障已无必要。高寒草原沙化土地治理过程中,恢复植被应该充分考虑土壤水分和养分含量对植物生长的影响<sup>[25]</sup>,本研究 2019 的相关分析也表明,牧草生长状况与土壤养分和持水能力呈显著正相关关系。腐熟牛羊粪养分含量高,而且覆盖在沙丘表面雨水可以下渗,又能减少沙丘水分蒸发,铺施牛羊粪显著并大幅增加了沙丘土壤养分和土壤持水能力,种植第 2 年牧草生长状况明显优于不施牛羊粪情况。无牛羊粪+沙障种草模式下,虽然网格沙障固定了沙丘,但沙丘土壤养分瘠薄,不能提供牧草正常生长所需的养分;再者,沙面裸露土壤持水能力很差,连续大风干旱天气会引起土壤干旱,导致牧草缺水不能正常生长。无牛羊粪+无沙障种草模式下,由于位于背风坡,小地形使得植物生长的环境略好于迎风坡,再者,播种深度很深(12 cm),根系能够利用较深沙层水分,当年生长很好,第 2 年调查时条播行间有风蚀沟,部分根系外露,越冬差,加上土壤养分不足,生长情况明显差于铺施牛羊粪模式。两种都铺施牛羊粪的种草模式相比,牛羊粪+无沙障模式施牛羊粪多(厚度约 2 cm),土壤养分充足,牧草生长相对更好,尤其是种植第 2 年高度、盖度和地上生物量均显著大于牛羊粪+沙障模式(牛羊粪厚度约 1 cm)。

高寒沙地植被恢复过程中,植物多样性逐步增加<sup>[26]</sup>。2019 年调查发现,4 种种草模式下均出现了少量试验草种以外的植物种,牛羊粪+无沙障模式中有:灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、褐鳞苔草、赖草、臭蒿(*Artemisia hedini*);牛羊粪+沙障有:阿拉善马先蒿(*Pedicularis alaschanica*)、露蕊乌头(*Aconitum gymnantrum*)、臭草(*Melica scabrosa*)、黄耆(*Astragalus membranaceus*)、灰绿藜、臭蒿、花苜蓿(*Medicago ruthenica*)、早熟禾(*Poa annua*)、褐鳞苔草、草莓(*Fragaria ananassa*);无牛羊粪+沙障:赖草、臭蒿;无牛羊粪+无沙障:灰绿藜。除沙丘原有的赖草外,其他为新的侵入种,来源于草地种子风媒传播和牛羊粪。从种类数量来看,施牛羊粪模式下新的侵入种明显多于不施牛羊粪模式,牛羊粪改善了土壤条件,有利于种子定居,植物多样性逐步增加。牛羊

粪+沙障模式入侵种类最多,该模式网格沙障高 15 cm,有利于拦截种子,使其定植。

## 4 结论

高寒流动沙丘人工播种牧草后铺施牛羊粪,植被能够很快恢复,第 2 年本地植物种开始入侵,植物多样性开始增加。利用牧草进行高寒草原流动沙丘植被恢复过程中,铺施牛羊粪具有防沙固沙、改善土壤养分和增加土壤持水能力的多重作用,牛羊粪还具有就地取材的便捷性、成本低、无污染等优点,是研究区流动沙丘进行人工植被恢复的优质材料。本研究中,铺施牛羊粪厚度达到 2 cm,牧草生长状况最好、已无必要设置其他沙障进行固沙。牛羊粪+无沙障种草模式是研究区流动沙丘植被恢复最优的种草模式。

为保障种植牧草安全越冬,提高流动沙丘植被恢复效果,在种植牧草时应注意以下几点:①播种时间宜早不宜迟,最早可以在 5 月初播种。高寒区植物生长季短,适度早播可以增加牧草生长时间,牧草根系生长更发达,提高牧草越冬能力;②播种深度适度加深,这样根系能够吸收较深层土壤水分,提高牧草抵御不良天气的能力,但加深播种深度的同时要加大播种量,以避免出苗率低的现象。

## [参 考 文 献]

- [1] 张潇喜,曾凯,蔡义民,等. 青藏高原东部乡土植物对高寒沙化草地土壤性质的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 749-759.
- [2] 曹广超,马海州,曾永年,等. 龙羊峡库区土地资源的可持续利用[J]. 盐湖研究, 2001, 9(1): 62-66.
- [3] 赵鹏,屈建军,徐先英,等. 长江源区沙化高寒草地植被群落特征及其与地形因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 1030-1040.
- [4] 张春来,邹学勇,刘玉璋,等. 狮泉河盆地风沙灾害成因及其防治[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(2): 1-9.
- [5] 胡光印. 江河源区近 30 年沙漠化过程及其成因[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.
- [6] 韩邦帅. 青藏高原现代沙漠化过程及成因分析:以青海省玛多县为例[D]. 甘肃 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008.
- [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]//中国治沙暨沙业学会 2018 年学术年会论文集. 格尔木, 2018: 23-31.
- [8] 陈子莹,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.
- [9] 陈子莹. 人工扰动对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[D]. 甘肃兰州:甘肃农业大学, 2008.

- [10] 齐鹏程. 川西北高寒沙地 4 种适生植物根际土壤有机碳、氮组分及酶活性特征研究[D]. 四川 成都: 四川农业大学, 2016.
- [11] 苟小林, 刘文辉, 陈有军, 等. 植物沙障不同种植模式对川西北沙地的恢复效应[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 33-44.
- [12] 刘成志. 高寒地区河谷型沙害形成机理与防治技术研究[D]. 湖北 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [13] 杨洪晓, 卢琦, 吴波, 等. 青海共和盆地沙化土地生态修复效果的研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 7-12.
- [14] 刘君梅. 共和盆地植被恢复过程中生物多样性及其与生境的关系研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [15] 李昌龙, 徐先英, 金红喜, 等. 玛曲高寒草甸沙化过程中群落结构与植物多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3953-3961.
- [16] 拉元林, 全晓毅. 青海省海南州高寒草地荒漠化治理技术与对策[J]. 草业科学, 2005, 22(8): 55-61.
- [17] 齐雁冰, 常庆瑞, 贾科利, 等. 高寒地区荒漠化现状与防治途径探讨[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 39-41.
- [18] Luo Jiufu, Deng Dongzhou, Zhang Li, et al. Soil and vegetation conditions changes following the different sand dune restoration measures on the Zoige Plateau [J]. Plos One, 2019, 14(9): e0216975.
- [19] 王升堂. 极端高寒干旱区城镇防沙的理论与实践: 以西藏狮泉河镇为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2006.
- [20] 尹书乐. 共和盆地典型人工灌木群落生态特性与土壤碳研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [21] 柳小妮, 孙九林, 张德罡, 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.
- [22] 田丽慧, 张登山, 彭继平, 等. 高寒沙地人工植被恢复区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 32-39.
- [23] 蒲琴, 胡玉福, 蒋双龙, 等. 不同生态治理措施下高寒沙化草地土壤氮素变化特征[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 24-33.
- [24] 张学元. 青海高寒地区沙化土地治理途径的研究[J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(3): 11-14, 22.
- [25] 苟小林, 涂卫国, 李玲, 等. 川西北地区沙化草地特征研究[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 768-775.
- [26] 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.

(上接第 21 页)

- [13] Fu Jiangtao, Hu Xiasong, Brierley G, et al. The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, Northeast Qinghai, China [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(5): 785-801.
- [14] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 666-678.
- [15] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 1-9.
- [16] 许锐, 郭璐, 李寻昌, 等. 延安地区黑沙蒿生长特征及护坡效应研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(9): 19-24.
- [17] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 p-s 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 316-321.
- [18] 杨钢. 非饱和土试样优选及循环荷载作用下的变形特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [19] 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土坡耕地草本植物根系固结地埂的土力学机制[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 85-90.
- [20] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 477-486.
- [21] 贺隆元, 潘昆, 陈春武, 等. 生态护坡技术在云南省水利工程中运用的探讨[J]. 林业建设, 2015(4): 142-145.
- [22] 高至国, 矫之明, 胡湘, 等. 牡丹江河道生态护岸研究[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 1(3): 67-69.
- [23] 马亮. 河道整治中生态护岸的设计及应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [24] 顾向阳, 顾竹珺, 李飞鹏, 等. 河道生态护岸设计中的底泥固化技术中试[J]. 净水技术, 2018, 37(3): 107-112.
- [25] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [26] 孟飞. 河道植物护岸耐冲性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [27] Tardieu F, Draye X, Javaux M. Root water uptake and ideotypes of the root system: Whole-plant controls matter [J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(9): 1-10.