

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0086

李菡庭, 田美荣, 霍晓君, 等. 基于湖泊底泥的植物种植基对牧草生长的影响试验[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(6): 750-757.

LI Han-ting, TIAN Mei-rong, HUO Xiao-jun, et al. Exploring the Impact of Lake Sediment Based Planting Substrates on Forage Growth: An Experimental Analysis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(6): 750-757.

基于湖泊底泥的植物种植基对牧草生长的影响试验

李菡庭¹, 田美荣¹, 霍晓君², 尤春赫³, 聂华月^{1,3}, 高吉喜^{3①} (1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 内蒙古自治区生态环境科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 为揭示湖泊底泥资源化利用在生态修复领域的效果,以呼伦湖底泥作为主要基质,通过添加牛粪、羊粪、秸秆制作植物种植基用于草原牧草恢复。试验设置7个处理,从牧草发芽率和成活率、株高、平均根长等物理性状,以及牧草与种植基的有机质、养分含量和酸碱度等化学性状方面,探究不同原料配比下种植基对草原牧草生长发育的影响。结果显示,TN3(底泥、牛粪、秸秆体积比为2:3.25:2)与TY6(底泥、羊粪、秸秆体积比为2:3.25:2)处理牧草生长状况最好,且冰草生长状况优于羊草;TN3与TY6处理的冰草发芽率分别为73.00%和72.00%,羊草发芽率分别为19.00%和28.00%;对于牧草其他物理性状指标以及牧草与种植基化学性状指标,TN3与TY6处理均高于其余处理,表明底泥与秸秆含量越高,牧草生长状况越好,且TY6优于TN3,即相同配比下添加羊粪的种植基更有利于牧草生长。研究结果可为呼伦湖底泥资源化利用以及沙化草地治理提供技术支撑。

关键词: 植物种植基; 湖泊底泥; 草原牧草; 生态环境; 呼伦湖

中图分类号: X71; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)06-0750-08

Exploring the Impact of Lake Sediment Based Planting Substrates on Forage Growth: An Experimental Analysis.

LI Han-ting¹, TIAN Mei-rong¹, HUO Xiao-jun², YOU Chun-he³, NIE Hua-yue^{1,3}, GAO Ji-xi^{3①} (1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Inner Mongolia Academy of Ecology and Environment Sciences, Hohhot 010010, China; 3. Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China)

Abstract: Environmental protection has always been centered on the using of lake sediment as a resource. The sediment collected from Hulun Lake was used as the main substrate to demonstrate the effectiveness and efficiency of lake sediment resource utilization in ecological restoration, and the planting substrate was created by combining cow dung, sheep dung, and straw. The experiment included seven treatments: CK, TN1, TN2, TN3, TY4, TY5, and TY6. Physical properties such as germination rate and survival rate of forage, plant height, average root length, and chemical properties such as organic matter, nutrient content, and pH of the soil were examined to determine the impact of planting substrates on the growth and development of steppe forage. The results show that TN3 (sediment : cow dung : straw = 2 : 3.25 : 2) and TY6 (sediment : sheep dung : straw = 2 : 3.25 : 2) treatments had the best effects on forage growth, and that *Agropyron mongolicum* grew much effectively than *Leymus chinensis*. *Leymus chinensis* had 19.00% and 28.00% germination rates in TN3 and TY6, respectively, and *Agropyron mongolicum* had 73.00% and 72.00% germination rates in TN3 and TY6, respectively. Adding sheep dung planting base at the same proportion is more beneficial to the growth of forage than the other treatments. As for the other physical property indexes of forage and chemical property indexes of forage and planting substrates, TN3 and TY6 are higher than the other treatments with the same raw material. This indicates that the higher the content of sediment and straw in the planting substrates, the better the forage growth. The results of this research can provide technical support for the utilization of Hulun Lake's sediment resources and the management of sandy meadows.

Key words: planting substrate; lake sediment; steppe forage; ecological environment; Hulun lake

收稿日期: 2023-02-13

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3901104)

① 通信作者 E-mail: gjx@nies.org

湖泊底泥中沉积了水体中的各种物质,是湖泊生态系统的重要组成部分^[1-2],但过量的底泥沉积会影响湖泊生态系统健康。因此,湖泊疏浚成为湖泊富营养化治理的重要举措。如何合理处置疏浚产生的大量底泥,是长期以来亟需解决的问题之一。污染程度轻的湖泊底泥中含有可被植物吸收的碱解氮和有效磷等有机物以及丰富的矿物质元素,对植物具有促生作用。因此,从植被修复的角度资源化利用湖泊底泥,不仅可减少湖泊底泥堆积造成的土地占用及其潜在环境影响与生态风险,而且可将底泥转化为资源,变废为宝^[3-5]。

相关研究表明,在农作物土壤改良方面,湖泊底泥可明显提高植物发芽率、产量等,但存在施用阈值^[6]。朱本岳等^[7]将西湖疏浚底泥与化肥按照2:8的体积比配成无机复合肥并用于农田蔬菜种植,结果表明蔬菜产量明显增加,成本降低。BRIGHAM等^[8]按照9:1和8:2的体积比混合农用地与底泥并用于大豆培育,表明底泥施用量与土壤有机质增量、碳交换成正比。张茅等^[9]选取当地废弃生物质材料、腐熟鸡粪和复合肥作为固化底泥改良剂,表明固化底泥适宜河湖堤岸绿化草生长。杨星等^[10]将底泥脱水后,混合玉米秸秆和麦麸并经复合微生物发酵制成有机肥料,用于补充绿化植物养分。CANET等^[11]应用西班牙巴伦西亚地区阿尔比费拉底泥种植莴苣和番茄,在混合季节性干旱砂土后可促进污染敏感植物生长且无负面影响。目前,湖泊底泥研究与应用主要集中在农业种植培育方面,但在补充土壤养分时仍施用化肥,环保性较低^[12]。由于湖泊底泥与应用地距离远,运输成本高,未能大面积推广,底泥利用量较小。

目前,湖泊底泥在农作物土壤改良方面的应用已有大量研究,但用于牧草的研究较少。呼伦湖位于内蒙古自治区东部,是欧亚草原的重要组成部分

分,周边土壤沙化和水土流失严重,导致湖泊底泥累积量逐年增加,对浅水型湖泊带来极大威胁,加上近年来湖泊部分水质指标超标,因此开展底泥疏浚以缓解呼伦湖污染将是今后工作的重点方向之一。前期研究表明,呼伦湖底泥沉积物中重金属元素种类少且含量低,因此适合作为基质材料。此外,呼伦湖流域部分区域土壤贫瘠,降水量偏低,过度放牧导致草地沙化严重^[13]。将呼伦湖底泥用于呼伦湖流域沙化草地修复,对呼伦湖流域生态环境改善、底泥资源化利用和湖泊质量改善具有重要的协同意义。为此,基于呼伦湖底泥配置植物种植基开展研究,分析不同配比对草原牧草生长发育及其生理特征的影响,以期为呼伦湖疏浚底泥的可持续利用和干旱及半干旱地区草地生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验底泥取自内蒙古呼伦湖,该湖泊位于我国中高纬度地区,地理位置为48°30'40"~49°20'40"N,117°00'10"~117°41'40"E,地处呼伦贝尔市新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗和满洲里之间,属中温带半干旱大陆性气候区,年均气温-1.3℃,年均降水量319 mm,年均日照时数2 840 h,年均蒸发量1 406 mm^[14-15]。

1.2 试验材料

底泥采集时间为2022年5月,采集坐标为48°34' N,117°13' E,水深9 m,底泥采集深度3.6 m。根据文献资料 and 当地原材料可获取性,利用底泥、腐熟牛粪、干羊粪和秸秆配置成种植基。呼伦湖底泥和牛羊粪养分含量见表1。选取当地常用于退化草地修复的冰草(*Agropyron mongolicum*)和羊草(*Leymus chinensis*)作为试验牧草。

表1 底泥和牛羊粪养分含量

材料	有机质	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷	速效钾	钙	镁	铁
底泥	28.50	0.28	1.50	20.41				30.97	10.36	26.87
腐熟牛粪	140.00	11.00	3.00	9.00	1.18	0.30	0.50			
干羊粪	286.00	18.52	2.75	14.62	0.93	0.38	0.37			

1.3 试验方法

为提高底泥的孔隙度,在原料中加入秸秆。按照物理结构,将底泥与秸秆的体积比设置为1:1(固定参数)。在此基础上,添加牛粪或羊粪以增加基质养分。设置7组不同比例配制基质,其中一组

为对照,各处理组配制比例见表2。每个处理设3个重复,共21组样本。2种草原牧草种子按照每组样本各100粒均匀埋于种植基表层下0.5~1.0 cm深度,使用标签标记各样本组号。将21组样本置于普通温室内,试验期间温度在19~28℃之间,湿

度在46%~96%之间,每日光照时间12 h以上,温室定期通风。

表2 植物种植基配比

Table 2 Formula for planting substrates

处理	材料	材料体积比	材料质量比
CK	底泥+秸秆	1:1	13:1
TN1	底泥+腐熟牛粪+秸秆	1:3.25:1	13:15:1
TN2	底泥+腐熟牛粪+秸秆	1.5:3.25:1.5	26:15:2
TN3	底泥+腐熟牛粪+秸秆	2:3.25:2	39:15:3
TY4	底泥+干羊粪+秸秆	1:3.25:1	13:13:1
TY5	底泥+干羊粪+秸秆	1.5:3.25:1.5	26:13:2
TY6	底泥+干羊粪+秸秆	2:3.25:2	39:13:3

1.4 项目测定

1.4.1 牧草种子发芽率和成活率

试验期间,对所种植的冰草和羊草每隔48 h观察1次,记录各样本的发芽总数,标记组别和植物种类,计算发芽势(S)与发芽率(L)^[16]。发芽期结束后,计算成活率(C)。

$$S = N_1 / N \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, N_1 为冰草3 d内、羊草9 d内发芽的种子数; N 为种子总数。

$$L = N_2 / N \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, N_2 为开始发芽10 d后发芽种子数。

$$C = N_3 / N \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, N_3 为发芽期结束后牧草苗成活数。

1.4.2 牧草物理性状

生长期中,分别在不同阶段测量各样本植物的株高,取3组数据的平均值作为平均株高。试验期末,将根系挖出整理,测量各样本植物的平均根长。同时,称取各样本植物鲜重与干重,用于计算牧草折干比(Z)。

$$Z = N_4 / N_5 \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, N_4 为牧草总干重,kg; N_5 为牧草总鲜重,kg。

1.4.3 种植基和草原牧草的化学性质测定

在生长期末,分别采集各63份羊草和冰草样本,去除杂质后阴干。采用梅特勒pH计(SK220)测量种植基酸碱度,采用锡囊包样元素分析仪测定有机质含量,采用连续流动分析仪测定速效氮含量,采用碳酸氢钠溶液振荡提取-钼锑抗比色法测定速效磷含量,采用醋酸铵溶液振荡提取-火焰光度法测定速效钾含量。

1.5 数据处理方法

对试验所得数据采用Excel 2003和SAS 6.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植基对牧草种子发芽率和成活率的影响

2.1.1 发芽率

对于沙化与退化草地,种植牧草是生态修复的重要手段。为此,研究不同底泥配比对羊草和冰草种子的发芽率影响。试验表明,冰草种子在第3天开始发芽,在72 h内CK发芽势达80.00%,远高于其他处理,各处理组发芽势表现为CK>TN3>TN2>TN1>TY6>TY5>TY4,其中添加腐熟牛粪处理组(TN1、TN2和TN3)发芽势远高于添加干羊粪组(TY4、TY5和TY6)。试验第13天,CK发芽率跌至57%左右,其他处理组发芽率大幅提高,TN1、TN2和TN3组达60%以上,其中TY6和TN3超过70%,总体表现为TN3>TY6>TN2>TN1>CK>TY5>TY4(表3)。

表3 冰草和羊草的发芽指标

Table 3 Germination indexes of *Agropyron mongolicum* and *Leymus chinensis* %

处理	冰草		羊草	
	发芽势	发芽率	发芽势	发芽率
CK	80.00±0.94 ^c	57.00±1.80 ^c	8.00±0.89 ^b	11.00±1.15 ^a
TN1	50.00±1.12 ^a	60.00±2.00 ^a	5.00±1.12 ^c	13.00±1.56 ^b
TN2	60.00±1.50 ^c	70.00±2.20 ^c	18.00±1.22 ^b	18.00±1.05 ^c
TN3	70.00±2.01 ^a	73.00±2.24 ^c	19.00±0.85 ^c	19.00±1.12 ^b
TY4	10.00±1.68 ^c	18.00±1.12 ^b	1.00±0.05 ^a	4.00±0.08 ^c
TY5	15.00±1.40 ^b	47.00±1.50 ^b	2.00±0.09 ^b	9.00±0.60 ^b
TY6	40.00±1.90 ^b	72.00±1.30 ^a	19.00±1.30 ^b	28.00±2.12 ^c

各处理种植基配比见表2。同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

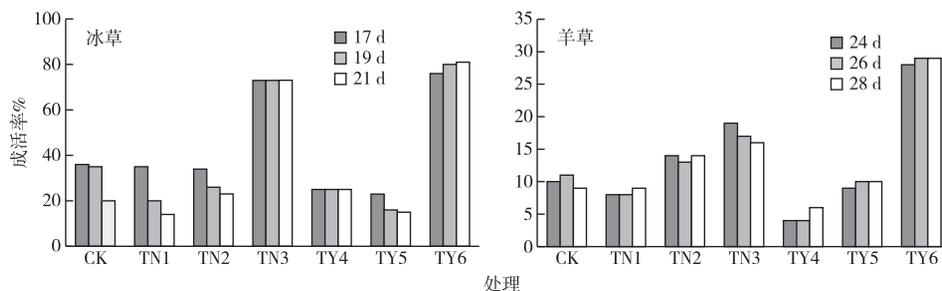
羊草相比冰草发芽略晚,于第9天开始发芽。不同处理组发芽势表现为TN6≈TY3>TN2>CK>TN1>TY5>TY4。TY4和TY5发芽率平均值低于CK,TN3发芽率为19.00%,TY6发芽率为28.00%,显著优于TY4和TY5($P<0.05$)。

分析表明,种子发芽的必要条件包括自身养分条件和外界的环境条件(如土壤水分、养分和土壤的物理结构)。CK组由于配方仅为底泥和秸秆,种植基的孔隙度高于添加牛粪和羊粪处理组,提供了更好的发芽条件,因此试验72 h时CK组的冰草发芽率达最高值。羊草发芽时间较晚,因基质硬度会随时间延长而增大,发芽越晚越不利于羊草顶芽。添加腐熟牛粪的TN1、TN2组以及添加羊粪的TY4、TY5组底泥与秸秆占比相对较低,空气流通差,种子发芽受阻。TN3和TY6组底泥

与秸秆占比高,底泥孔隙度大,养分供给适宜,有利于牧草吸收营养,所以发芽率高。

2.1.2 成活率

从开始出苗后第 15 天开始测定成活率变化,并每隔 2 d 测定 1 次,共测定 3 次。如图 1 所示,21 d 时,TN3、TY6 处理冰草成活率高且稳定性好,超过 70%,其中 TY6 处理成活率可达 80%。CK、TN1、TN2、TY4 和 TY5 成活率均较低,21 d 时低于 30%,且 CK、TN1、TN2 和 TY5 处理成活率随时间延长呈下降趋势。



各处理种植基配比见表 2。

图 1 冰草和羊草的成活率

Fig. 1 Survival rates of *Agropyron mongolicum* and *Leymus chinensis*

2.2 对牧草生长和产量的影响试验

2.2.1 牧草株高和根长

牧草种植 30 d 时达到生长旺期,选取该时段测定牧草株高。结果显示,各处理组冰草株高态势总体呈现为 TY6>TY4>TY5>TN3>CK>TN1>TN2。添加羊粪处理组株高显著高于 CK ($P<0.05$),其中 TY6 处理比 CK 高 39.47%。添加牛粪的 3 个处理中,只有 TN3 处理株高显著高于 CK ($P<0.05$)。说明在相同底泥和秸秆配比下,添加牛粪的种植基对冰草生长的促进作用低于添加羊粪的种植基(表 4)。

表 4 试验 30 d 时草原牧草的平均株高

Table 4 Average height of steppe forage on the 30th day of the experiment cm

处理	冰草株高	羊草株高
CK	17.33±1.53 ^c	8.67±1.15 ^{bc}
TN1	12.67±1.15 ^d	9.00±2.64 ^{bc}
TN2	7.67±0.58 ^e	7.33±0.57 ^e
TN3	21.33±0.57 ^b	8.50±0.87 ^e
TY4	23.67±0.56 ^a	7.67±1.15 ^e
TY5	23.33±1.15 ^a	11.33±1.52 ^b
TY6	24.17±1.26 ^a	17.33±2.31 ^a

各处理种植基配比见表 2。同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

羊草成活率如图 1 所示,28 d 时羊草整体成活率较冰草低,其中 TY6、TN3 处理成活率最高,分别为 30%、18%。28 d 时,CK、TN1、TY4 和 TY5 处理的成活率低于 10%。

结果显示,在养分配置条件相同时,底泥与秸秆占比越高,种植基孔隙度条件越好,其对草原牧草发芽和成活的正向影响越明显。冰草和羊草的成活率整体上表现为 TY6 处理高于 TN3,表明羊粪肥效高于牛粪。TY4、TY5 处理较不利于草原牧草种子发芽,成活率低。

羊草株高变化总体表现为 TY6>TY5>TN1>CK>TN3>TY4>TN2。在添加羊粪条件下,羊草株高表现为 TY6 处理显著优于 TY4、TY5 ($P<0.05$),比 CK 高约 1 倍。在添加牛粪条件下,TN1、TN2、TN3 处理羊草株高与 CK 差异不显著。因此,施加羊粪的 TY6 种植基配方更适合羊草生长发育,并能促进羊草对养分的吸收,增加产量。

试验 50 d 时草原牧草平均根长见表 5。

表 5 试验 50 d 时草原牧草的平均根长

Table 5 Average root length of steppe forage on the 50th day of the experiment cm

处理	冰草根长	羊草根长
CK	5.17±1.04 ^c	2.67±0.58 ^d
TN1	8.67±3.51 ^b	5.65±0.57 ^b
TN2	10.83±0.29 ^b	5.67±0.57 ^b
TN3	11.00±1.00 ^b	6.33±0.56 ^b
TY4	5.67±0.58 ^c	3.33±0.58 ^{cd}
TY5	9.93±0.12 ^b	4.34±0.57 ^c
TY6	14.00±1.00 ^a	10.32±1.53 ^a

各处理种植基配比见表 2。同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

冰草根长表现为 TY6>TN3>TN2>TY5>TN1>TY4>CK。TY6 处理的冰草根长最长,达 14.00 cm,是 CK 的 2.71 倍;TN3 处理的冰草根长是 CK

的2.13倍。羊草根长表现为TY6>TN3>TN2>TN1>TY5>TY4>CK。TY6处理的羊草根长为10.32 cm,是CK的3.87倍,与TY4、TY5差异显著($P<0.05$);TN3处理的羊草根长为6.33 cm,是CK的2.37倍,相比TN2高11.6%。表明TY6、TN3种植基的物理结构可有效促进早期根系伸长发育,有利于草原牧草根系对养分和水分的吸收,为植株输送营养提供基础。

2.2.2 牧草折干比

在牧草生长周期结束后,测量草原牧草鲜重和干重,并计算牧草折干比(表6)。TY6、TN3处理的冰草产量明显高于其他处理。TY6处理的冰草鲜重分别是TY5、TY4的5.07、3.11倍,是CK的4.11倍。TN3处理的冰草鲜重是TN2的2.84倍。TN1、TY5处理的冰草鲜重低于CK,TN2、TY4处理与CK的差异较小。就冰草干重而言,TY6处

理分别为TY5、TY4的6.10、4.69倍。TN3处理的冰草干重是TN2的3.12倍,是TN1的7.07倍。

羊草鲜重表现为TY6处理显著高于其他处理组($P<0.05$),TY6处理分别是TY5、TY4、CK的3.67、7.33、7.33倍。TN3处理的羊草鲜重分别是TN2、TN1的1.63、2.17倍,是CK的4.33倍。TY6、TN3处理的羊草干重平均值分别为0.058、0.032 kg, TY4、CK的平均值则分别为0.006、0.005 kg。TY6、TN3处理的冰草折干比分别为29.7%、28.6%,分别比CK高11.2、10.1百分点。TY6、TN3处理的羊草折干比分别为26.3%、25.1%,分别比CK高9.6、8.4百分点。总体上,TY6、TN3处理的牧草产量与折干比高于其他处理组,说明TY6、TN3配比的种植基适宜种植冰草和羊草,短时间内可有效增产。

表6 草原牧草产量

Table 6 The yield of steppe forage

处理	冰草鲜重/kg	羊草鲜重/kg	冰草干重/kg	羊草干重/kg	冰草折干比/%	羊草折干比/%
CK	0.100±0.017 ^d	0.030±0.003 ^e	0.018±0.003 ^e	0.005±0.001 ^e	18.5	16.7
TN1	0.070±0.005 ^e	0.060±0.005 ^d	0.015±0.010 ^f	0.012±0.001 ^d	20.8	20.4
TN2	0.131±0.011 ^e	0.080±0.006 ^e	0.034±0.003 ^e	0.019±0.002 ^e	26.3	23.8
TN3	0.373±0.010 ^b	0.130±0.012 ^b	0.106±0.003 ^b	0.032±0.003 ^b	28.6	25.1
TY4	0.132±0.010 ^e	0.030±0.003 ^e	0.026±0.002 ^d	0.006±0.001 ^e	19.5	22.4
TY5	0.081±0.011 ^d	0.060±0.007 ^d	0.020±0.003 ^e	0.014±0.002 ^d	25.4	24.5
TY6	0.411±0.018 ^a	0.220±0.001 ^a	0.122±0.005 ^a	0.058±0.002 ^a	29.7	26.3

各处理种植基配比见表2。同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

2.3 对草原牧草养分含量的影响

冰草和羊草的养分含量见表7。由表7可知,不同处理组冰草全碳含量表现为TY6>TN3>TN2>CK>TN1>TY5>TY4。TN3、TN2处理冰草全碳含量比CK分别高23.88、4.01 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TY6处理比CK高25.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冰草全氮含量表现为TY6>TY5>TY4>TN3>TN2>TN1>CK, TN3处理比CK高11.06 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TY6处理比CK高27.52 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冰草全磷含量表现为TY6>TN3>CK>TY5>TN2>TY4>TN1, TN3处理比CK高0.11 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TY6处理比CK高0.96 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冰草全钾含量表现为TY6>TN3>TY4>CK>TY5>TN1>TN2, TN3处理比CK高0.37 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TY6处理比CK高1.76 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总体而言,TN3、TY6处理的冰草养分含量高于其他处理组,CK中冰草全磷、全钾含量高于TN1、TN2、TY5处理,说明呼伦湖底泥有助于增加冰草有机质,促进冰草固定养分,对牧草养分含量具有正反馈作用。

就羊草全碳含量而言,TN3、TY6、CK相对其他处理组略高,但差距较小。羊草全氮含量表现为TY6>TY4>TY5>TN3>CK>TN2>TN1, TN3处理比CK高1.19 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,TY6处理比CK高17.80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。羊草全磷含量表现为TY6>TN3>TN2>TY5>TN1>TY4>CK,各处理组整体均高于CK。羊草全钾含量表现为TN3>TY6>TY5>TY4>TN2>TN1>CK。总体来看,种植基对羊草全钾和全磷含量有明显促进作用,能够防止水肥流失,提高羊草养分含量。

2.4 种植基pH值和养分含量变化

由表8可知,种植周期结束后,种植基化学性质均发生变化。TN3、TY4、TY5、TY6处理种植基pH值<7,呈弱酸性,TY6处理pH值为6.82,与CK相比有明显改善。种植基速效氮含量表现为TY6>TY5>TY4>CK>TN3>TN2>TN1,CK比TN3高11.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比TN2高32.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是TN1的4.49倍。TY4、TY5、TY6处理速效氮含量

均值为 $399.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是 TN1、TN2、TN3 处理均值的 12.43 倍。各处理组种植基速效磷和速效钾含量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。各处理组种植基有机质含量较 CK 高 $6.27 \sim 13.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。TN1、TN2、TN3 处理种植基全氮含量均值为 $8.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比于 CK 高 55.24%, TY4、TY5、TY6 处

理的全氮含量均值为 $12.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比于 CK 高 129.52%。不同处理与 CK 间种植基全钾含量无明显差异, 全磷含量变化也不大, 且符合植物生长的基本要求。结果显示, 相同底泥与秸秆配比下, 添加羊粪的种植基速效磷、速效钾以及全氮、全磷、全钾含量高于添加腐熟牛粪的种植基。

表 7 草原牧草营养成分含量

Table 7 Nutrient contents of the steppe forage

 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

牧草	处理	全碳	全氮	全磷	全钾
冰草	CK	63.18 ± 2.85^e	33.37 ± 6.79^b	5.25 ± 0.07^a	19.43 ± 0.53^{ab}
	TN1	49.56 ± 2.17^d	34.51 ± 4.52^b	4.75 ± 0.47^a	17.25 ± 0.90^{ab}
	TN2	67.19 ± 1.71^b	43.74 ± 4.83^b	4.81 ± 1.06^a	16.57 ± 4.78^b
	TN3	87.06 ± 1.70^a	44.43 ± 14.76^{ab}	5.36 ± 0.40^a	19.80 ± 0.11^{ab}
	TY4	36.73 ± 1.02^e	45.01 ± 2.53^{ab}	4.79 ± 0.48^a	19.67 ± 1.53^{ab}
	TY5	47.00 ± 1.00^d	48.21 ± 3.71^{ab}	4.91 ± 0.84^a	18.06 ± 1.59^{ab}
	TY6	88.38 ± 0.62^a	60.89 ± 14.83^a	6.21 ± 2.20^a	21.19 ± 0.39^a
羊草	CK	49.97 ± 1.57^a	30.61 ± 6.44^c	3.96 ± 0.23^a	13.99 ± 0.48^a
	TN1	42.56 ± 2.82^c	24.71 ± 6.36^c	4.34 ± 1.09^a	16.12 ± 5.53^a
	TN2	46.20 ± 1.79^b	29.32 ± 2.53^c	5.07 ± 0.28^a	17.31 ± 0.70^a
	TN3	49.77 ± 1.04^a	31.80 ± 10.16^{bc}	5.30 ± 0.98^a	19.13 ± 2.74^a
	TY4	38.20 ± 1.14^d	46.81 ± 7.42^a	4.13 ± 0.13^a	18.41 ± 0.35^a
	TY5	38.83 ± 1.97^d	45.36 ± 11.39^{ab}	4.89 ± 0.22^a	18.67 ± 1.07^a
	TY6	50.69 ± 1.08^a	48.41 ± 7.39^a	5.47 ± 1.21^a	18.95 ± 1.18^a

各处理种植基配比见表 2。同一种牧草同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

表 8 试验 50 d 时种植基营养成分与 pH 值

Table 8 Nutrient contents and pH value of the planting substrates on the 50th day of the experiment

处理	$w(\text{速效氮}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{速效磷}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{速效钾}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{有机质}) /$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{全氮}) /$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{全磷}) /$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$w(\text{全钾}) /$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值
CK	63.35 ± 35.90^e	59.53 ± 6.45^e	698.24 ± 42.63^d	17.05 ± 8.71^b	5.25 ± 1.76^d	1.45 ± 0.17^d	5.90 ± 0.17^a	7.62 ± 0.24^a
TN1	14.12 ± 7.22^c	400.00 ± 78.01^d	1231.79 ± 4.71^a	25.76 ± 1.63^{ab}	8.49 ± 0.47^b	2.77 ± 0.12^{ab}	5.07 ± 0.31^c	7.18 ± 0.15^b
TN2	30.62 ± 32.15^c	477.87 ± 11.71^c	1238.60 ± 40.28^a	23.32 ± 2.41^{ab}	7.57 ± 0.95^b	2.48 ± 0.03^{bc}	5.39 ± 0.23^b	7.07 ± 0.05^{bc}
TN3	51.75 ± 1.82^c	345.80 ± 27.04^d	1169.18 ± 35.20^{ab}	25.38 ± 6.05^{ab}	8.40 ± 2.58^c	2.21 ± 0.12^c	5.82 ± 0.37^{ab}	6.97 ± 0.16^{bc}
TY4	287.36 ± 21.45^b	711.47 ± 19.68^a	1057.57 ± 53.08^c	30.79 ± 6.84^a	12.97 ± 2.09^a	3.13 ± 0.14^a	4.86 ± 0.23^d	6.93 ± 0.04^c
TY5	415.85 ± 136.26^a	605.73 ± 40.64^b	1212.73 ± 40.83^a	29.03 ± 2.70^a	12.20 ± 0.74^a	2.86 ± 0.43^{ab}	5.85 ± 0.24^a	6.93 ± 0.10^c
TY6	496.15 ± 43.64^a	584.33 ± 13.47^b	1105.21 ± 100.79^{bc}	25.47 ± 3.73^{ab}	11.00 ± 2.12^{ab}	2.78 ± 0.37^{ab}	5.69 ± 0.04^{ab}	6.82 ± 0.08^{cd}

各处理种植基配比见表 2。同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

随着美丽河湖建设的推进, 湖泊底泥资源化利用越来越受到重视^[17]。目前由于受到经济、技术、制度等限制, 湖泊底泥资源化利用主要用于农业和园艺绿化等方面^[18-19], 如许宇平等^[20]利用腐殖酸有机肥制备(HAF)技术经过预处理、二次发酵、造粒等步骤得到腐殖酸有机肥, 可有效改良结构性差的农业土壤; 刘军武等^[21]利用混合芦苇秆、秸秆的脱水无害化底泥制成 20~30 cm 厚的土壤基肥材料, 用于贫瘠或风沙频繁地区的生态护坡绿化。但在生态修复领域湖泊底泥应用较少, 主

要原因是污染程度低的底泥与修复地距离远, 运输成本高, 且相关试验较少, 底泥与修复植被之间相互作用的机理不清。为此, 该试验选用无害化呼伦湖底泥为研究对象, 并加入秸秆、牛粪与羊粪等农业有机废弃物, 制备沙化草地植物种植基, 增加植物抗逆性, 用于呼伦湖沙化草地修复, 不仅使废弃物得到循环利用, 且可进一步修复沙化草地生态系统。

选用具有养分的原料作为种植基, 能够极大地提升种子发芽率, 促进植物生长。李岚峰等^[22]选用大豆秸秆粉作为生物质调理底泥, 白菜发芽率和月季开花率明显提高, 含盐量稳定, 调理剂使

用量与发酵温度、堆肥效果呈正相关;有研究将底泥制成浸液,浸泡后的种子发芽率均在80%以上^[23-24]。为提高资源化利用与生态修复成效,该试验直接将底泥作为牧草生长的基质,并加入农业废弃物秸秆,以提升种植基的孔隙度与毛细结构、增加吸水性,使基质具有良好的保湿减蒸能力,进而提升牧草的发芽率与成活率。结果显示,相同配料条件下,湖泊底泥与秸秆含量最高的处理组(TN3、TY6)冰草与羊草的出苗率、成活率、株高、根长等均表现最好,对冰草与羊草生长的促进作用最强,且TY6优于TN3。这是因为底泥、秸秆占比高,基质物理结构良好,具有透气保湿效果,且底泥可起到促进植物有机质固定和养分吸收、稳定代谢活动的作用,秸秆可增加基质的有机质和氮含量,进而提高植物产量。笔者对于底泥配置比例的研究结果与夏军^[25]得出的底泥掺量在50%~70%最佳的结论基本一致。相同配置比例下,因羊粪有机质含量是牛粪的2倍,添加羊粪效果更佳,且在添加相同体积牛羊粪的情况下,底泥与秸秆比例越高,植物生长状况越好。因此,河湖底泥可通过添加不同秸秆、牛羊粪等生物质废弃物材料,制作种植基以促进植物生长。

该试验应用重金属含量低、无污染的呼伦湖底泥作为植物种植基主要成分,采用腐熟的牛羊粪作为土壤养分补充,是畜牧业处理固体废弃物的常规手段^[26-27]。秸秆不仅可改善基质物理结构,增大孔隙度,使植物更易吸收养分,还可以固碳减排,修复重金属污染^[28]。因该试验所用材料不存在环境风险,未对使用后的种植基进行重金属和污染指标的相关测试,下一步将加强对不同来源底泥的环境风险识别研究,避免底泥资源化利用带来的二次环境污染。

4 结论

以呼伦湖底泥为主要原料的种植基养分含量高,具有保水保肥效能,安全无污染。试验结果表明,种植基促进了草原牧草生长,其中TN3与TY6处理明显提升了草原牧草的发芽率、成活率,提高了草原牧草的株高,增加了牧草产量,且冰草优于羊草。添加相同比例的牛羊粪时,底泥与秸秆含量越高,牧草生长状况越好。TY6处理的效果优于TN3,即种植基原料配比相同条件下,添加羊粪的种植基更有利于牧草生长。将种植基应用于沙化草地修复,可提高生态修复效率。研究结果可为呼伦湖底泥资源化利用以及沙化草地治理提供

技术支撑,同时可为干旱及半干旱区沙化草地生态修复提供参考。

参考文献:

- [1] 孙标,杨志岩,赵胜男,等.哈素海湖底沉积物氮磷分布特征及潜在的资源化利用探讨[J].中国土壤与肥料,2019(2):194-200.[SUN Biao, YANG Zhi-yan, ZHAO Sheng-nan, et al. Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Its Potential Resource Utilization in Hasu Lake[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2):194-200.]
- [2] 雷丁懿,陈笑冰,王占华,等.河湖淤泥特征及资源化的研究进展[C]//中国环境科学学会2021年科学技术年会论文集(二).天津:[出版者不详],2021:674-680.
- [3] 郝建秀,任珺,陶玲,等.不同土地利用类型区黄河底泥重金属污染生态风险评价[J].兰州交通大学学报,2020,39(6):99-105.[HAO Jian-xiu, REN Jun, TAO Ling, et al. The Effect of Land Use Types on Heavy Metal Pollution in Sediment of the Yellow River[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, 39(6):99-105.]
- [4] YAN N, LIU W B, XIE H T, et al. Distribution and Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediment of Yellow River, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 39:45-51.
- [5] CHEN Y, JIANG Y M, HUANG H Y, et al. Long-term and High-concentration Heavy-metal Contamination Strongly Influences the Microbiome and Functional Genes in Yellow River Sediments [J]. Science of the Total Environment, 2018, 637/638:1400-1412.
- [6] 朱广伟,陈英旭,周根娣,等.疏浚底泥的养分特征及污染化学性质研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(3):311-317.[ZHU Guang-wei, CHEN Ying-xu, ZHOU Gen-di, et al. Characteristic of Nutrients and Polluting Chemistry in Dredged Sludge[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(3):311-317.]
- [7] 朱本岳,朱荫涓,李英法,等.底泥化肥复混肥的加工及其在蔬菜上的应用效果[J].浙江农业科学,2000,41(6):281-283.[ZHU Ben-yue, ZHU Yin-wei, LI Ying-fa, et al. Compound Fertilizer from Chemical Fertilizers with Sediment of the West Lake and Its Application in Vegetable[J]. Journal of Agricultural Science, 2000, 41(6):281-283.]
- [8] BRIGHAM R D, PELINI S, XU Z H, et al. Assessing the Effects of Lake-dredged Sediments on Soil Health; Agricultural and Environmental Implications for Northwestern Ohio[J]. Journal of Environmental Quality, 2021, 50(2):494-503.
- [9] 张茅,杨迎春,郑琳琳,等.固化淤泥作为河湖堤岸绿化草种植土的应用研究[J].施工技术,2020,49(18):13-15,19.[ZHANG Mao, YANG Ying-chun, ZHENG Lin-lin, et al. Application of Solidified Sludge as the Grass-planting Soil on River and Lake Banks [J]. Construction Technology, 2020, 49(18):13-15,19.]
- [10] 杨星,张家兴,霍兴阳,等.黑臭水体底泥无害化处置及资源化利用堆肥技术[J].农业工程,2021,11(4):68-71.[YANG Xing, ZHANG Jia-xing, HUO Xing-yang, et al. Harmless Disposal and Resource Utilization Composting Technology of Black and

- Odorous Water Sediment[J]. *Agricultural Engineering*, 2021, 11(4): 68-71.]
- [11] CANET R, CHAVES C, POMARES F, *et al.* Agricultural Use of Sediments from the Albufera Lake (Eastern Spain) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 95(1): 29-36.
- [12] 刘勇, 刘建, 唐浩元, 等. 淤泥原位资源化利用为种植土的施工工艺研究[J]. *工程技术研究*, 2018(16): 66-68.
- [13] 药劲松, 郭景福. 呼伦贝尔草原畜牧业发展路径探析[J]. *现代畜牧科技*, 2022(2): 13-18.
- [14] 王雯雯, 王书航, 姜霞, 等. 多方法研究呼伦湖表层沉积物有机质的赋存特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(2): 305-318. [WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, JIANG Xia, *et al.* Occurrence Characteristics and Sources Analysis of Sediment Organic Matter of Lake Hulun by Multiple Methods[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(2): 305-318.]
- [15] 孙德尧, 臧淑英, 孙华杰, 等. 近150年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 137-147. [SUN De-yao, ZANG Shu-ying, SUN Hua-jie, *et al.* Pollution History and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments in Hulun Lake during the Past 150 Years [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 137-147.]
- [16] 魏希杰, 杜江, 王伟, 等. 高寒地区不同处理方法对野生珠芽蓼种子发芽率的影响[J]. *草学*, 2022(2): 28-35. [WEI Xi-jie, DU Jiang, WANG Wei, *et al.* Effect of Different Treatments on Seed Germination of *Polygonum viviparum* in Alpine Areas [J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2022(2): 28-35.]
- [17] 李宝磊, 刘舒, 曾乐, 等. 我国河道底泥资源化利用技术现状[J]. *科技创新与应用*, 2020(2): 156-157. [LI Bao-lei, LIU Shu, ZENG Le, *et al.* Present Situation of Resource Utilization Technology of River Sediment in China [J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(2): 156-157.]
- [18] 卢珏, 王宇峰, 金涛, 等. 基于底泥堆肥的园林绿化基质生产研究[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 18(4): 411-417. [LU Jue, WANG Yu-feng, JIN Tao, *et al.* Studies on Sediment Composting and Its Usage on Horticultural Planting Substrates [J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 18(4): 411-417.]
- [19] 徐迪, 胡洁. 河道淤泥资源化利用进展[C] // 2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 合肥: [出版者不详], 2018: 87-92.
- [20] 许宇平, 张军, 李慧英, 等. 河湖库塘淤泥处理及资源化再利用研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(1): 36-40. [XU Yu-ping, ZHANG Jun, LI Hui-ying, *et al.* Treatment and Recycling of Silt from Lakes and Pond [J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2018, 34(1): 36-40.]
- [21] 刘军武, 方迎春, 傅晓华, 等. 基于资源化利用的河湖淤泥生态治理技术研究[J]. *当代化工研究*, 2021(23): 71-73. [LIU Jun-wu, FANG Ying-chun, FU Xiao-hua, *et al.* Research on Ecological Treatment Technology of River and Lake Silt Based on Resource Utilization [J]. *Modern Chemical Research*, 2021(23): 71-73.]
- [22] 李岚峰, 胡兴龙, 林立, 等. 河道清淤淤泥基绿化种植土的制备及可行性研究[J]. *环境科技*, 2021, 34(5): 36-41. [LI Lan-feng, HU Xing-long, LIN Li, *et al.* Preparation and Feasibility Study of the River Dredging Sludge Based Planting Soil for Greening [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 34(5): 36-41.]
- [23] 王向辉, 周鑫, 吴高蓉, 等. 美舍河清淤底泥分析评价及土地资源化利用[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(15): 360-364. [WANG Xiang-hui, ZHOU Xin, WU Gao-rong, *et al.* Analysis, Evaluation and Resource Utilization of Bottom Muddies in Meishe River [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(15): 360-364.]
- [24] 刘宏, 田涛, 杨磊, 等. 疏浚底泥微波干燥及其作为种植土的性能研究[J]. *盐科学与化工*, 2017, 46(4): 24-29. [LIU Hong, TIAN Tao, YANG Lei, *et al.* Study on Microwave Drying of Dredging Sludge and Performance of Sludge as Planting Soil [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2017, 46(4): 24-29.]
- [25] 夏军. 基于疏浚淤泥利用的生态护坡基材研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019. [XIA Jun. Research on Ecological Slope Protection Substrate Based on Dredged Silt Utilization [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.]
- [26] 李丹阳, 胡洁, 董颐玮, 等. 规模奶牛场2种粪便处理模式的生命周期评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(2): 257-264. [LI Dan-yang, HU Jie, DONG Yi-wei, *et al.* Life Cycle Assessment of Two Manure Treatment Modes in Intensive Dairy Farms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(2): 257-264.]
- [27] 张应鹏, 叶小梅, 杜静, 等. 江苏省规模奶牛场粪污处理利用现状调研分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(4): 466-471. [ZHANG Ying-peng, YE Xiao-mei, DU Jing, *et al.* Research Analysis on Current Situation of Manure Treatment and Utilization of Large-scale Dairy Farms in Jiangsu Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4): 466-471.]
- [28] 范婷婷, 李群, 周艳, 等. 不同方式秸秆还田条件下土壤对Cd²⁺的吸附性能及固定机制研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(7): 921-929. [FAN Ting-ting, LI Qun, ZHOU Yan, *et al.* The Effect of Different Ways and Amount of Straw Returning on Cd Sorption for Different Soils [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7): 921-929.]

作者简介: 李菡庭(1998—), 男, 吉林长春人, 主要研究方向为生态修复及生态风险。E-mail: 15584349008@163.com

(责任编辑: 许素)