

DOI: 10.20103/j.stxb.202311292603

苟小林, 补春兰, 周青平, 王恒, 张伟, 涂卫国. 高寒牧区家庭厩肥对沙地植被恢复的短期促进效应. 生态学报, 2024, 44(22): 10200-10211.

Gou X L, Bu C L, Zhou Q P, Wang H, Zhang W, Tu W G. Short-term promotion effect of household manure on vegetation restoration in sandy land of alpine pastoral area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10200-10211.

高寒牧区家庭厩肥对沙地植被恢复的短期促进效应

苟小林¹, 补春兰¹, 周青平^{2,3}, 王 恒⁴, 张 伟^{2,3}, 涂卫国^{1,*}

1 四川省自然资源科学研究院, 成都 610015

2 西南民族大学, 成都 610041

3 四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 成都 610041

4 四川省环境政策研究与规划院, 成都 610093

摘要: 为明确高寒牧区家庭厩肥是否对沙化地植被恢复具有促进效应, 以若尔盖高寒牧区为对象, 选择沙化地进行植被恢复, 研究对比牧区家庭厩肥与牧区牛羊粪肥对植被恢复的短期促进效应, 分析两种处理对植被恢复、土壤理化性质、土壤微生物、土壤酶活性的影响, 探讨高寒牧区家庭厩肥对沙化生态恢复的适用性。研究表明: 两种补肥都促进了植被的生长, 短期内植被盖度提高超过 60%, 先锋草本燕麦能够形成有效覆盖; 两种补肥都降低了土壤 pH 值, 增加了土壤水分含量; 两种补肥使土壤中碳、氮、磷养分含量显著增加, 土壤全氮含量超过 0.8 g/kg; 两种补肥促进了土壤中微生物量碳、氮、磷含量增加, 也增加了土壤酶活性, 土壤脲酶活性增加了 2—3 倍。高寒牧区家庭厩肥短期促进沙化地植被恢复与传统牛羊粪肥功能相似, 研究认为家庭厩肥适用于高寒牧区沙化地生态恢复。建议可以将高寒牧区改厕的家庭厩肥与传统牛羊粪肥配比施用, 在进行标准化和无公害处理后应用于沙化生态恢复。

关键词: 青藏高原; 草地沙化; 植被恢复; 土壤

Short-term promotion effect of household manure on vegetation restoration in sandy land of alpine pastoral area

GOU Xiaolin¹, BU Chunlan¹, ZHOU Qingping^{2,3}, WANG Heng⁴, ZHANG Wei^{2,3}, TU Weiguo^{1,*}

1 Sichuan Province Natural Resources Science Academy, Chengdu 610015, China

2 Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

3 Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Chengdu 610041, China

4 Sichuan Academy of Environmental policy & planning, Chengdu 610093, China

Abstract: In order to clarify whether household manure has a promoting effect on vegetation restoration in the desertified land of alpine pastoral areas, the short-term effects between household manure and manure from cattle and sheep were compared on vegetation restoration of sandy land in the Zoige alpine pastoral area, with the effects of the two treatments on vegetation restoration, soil physicochemical properties, soil microbes and soil enzyme activities. The aim is to assess the applicability of household manure for ecological restoration in high-altitude pastoral regions facing desertification. The results showed that both types of fertilizers promoted vegetation growth, with vegetation coverage increasing by over 60% in the short term. Notably, the pioneer herb *Avena sativa* effectively formed ground cover. Both fertilizers decreased soil pH, increased soil moisture content, and significantly increased the content of carbon, nitrogen and phosphorus in the soil, with

基金项目: 四川省重点研发项目 (2023YFS0379); 四川省重点研发项目 (2023YFS0479); 四川省级科研院所基本科研业务费 (2023JDKY0001); 四川省重点研发项目 (2022YFN0064)

收稿日期: 2023-11-29; **网络出版日期:** 2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wgtu028@163.com

the total nitrogen content exceeding 0.8 g/kg. Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil also increased under the both fertilizers, accompanied by an increase in soil enzyme activities, particularly a 2—3 times increase in soil urease activity. The short-time function of household manure supplementation in promoting vegetation restoration in alpine pastoral areas was similar to that of traditional organic fertilizer derived from cattle and sheep manure. Consequently, household manure appeared suitable for ecological restoration in the desertified land within alpine pastoral areas. It is recommended to combine the household manure from rural toilet renovation in alpine pastoral areas with traditional cattle and sheep manure. After undergoing standardized and pollution-free treatment, the mixture can be applied to desertification ecological restoration efforts.

Key Words: the Qinghai-Tibet Plateau; grassland desertification; vegetation restoration; soil

青藏高原是我国高寒牧区的主要分布区域^[1],在牧区经济发展和全球气候变化等多重因素影响下,高寒牧区生态问题日益严重^[2]。为应对高寒牧区生态系统退化、生态功能衰退等问题,青藏高原生态保护和可持续发展积极推动高寒牧区草地保护、退化生态修复、高寒地区改厕等系列生态建设,全面推进高寒牧区社会生态系统从可持续到高质量发展。

草地沙化是高寒牧区最为严重的生态问题之一^[3-4]。目前青藏高原沙化草地面积达到总面积的 14%,严峻的沙化形势已经严重影响青藏高原寒冷牧区生态功能与生态系统稳定,亟需进行沙化治理与生态恢复工作^[5]。现阶段针对高寒牧区沙化较为成熟的治理模式是植被恢复,已有的相关研究表明,植被恢复能够有效防治风沙,并且能够改善土壤性质,增加土壤养分和生物活性^[6-8]。采用人工种植方式的相关研究表明植被恢复过程影响了土壤性质和土壤中微生物群落组成^[9-11],采用封育^[12]、工程措施^[13]、禁牧^[14]等进行生态恢复也具有不同程度的促进作用。而在高寒牧区沙化地进行植被恢复时,非常注重植物群落组建与快速恢复效应,特别是在短期内促进先锋植物快速形成有效覆盖,有利于推动后续植物群落的演替过程^[15]。前期的研究结果表明,在高寒沙化地进行植被恢复,采用草本不同种植模式,以及不同的“灌—草”复合结构,都能够有效促进植被群落恢复,增加植被盖度,有效阻拦风沙,并且植物群落能够持续演替,改善土壤理化性质和微生物群落,促进沙漠化恢复过程^[12]。前期研究中探索了益生微生物肥、无机肥料(氮肥和磷肥)和微量元素对高寒牧区沙地植被恢复的促进作用^[16],其中通过补施肥料能够有效促进植被生长和发育,推动恢复过程^[17],并且有研究认为利用牛羊粪肥能够有效提升土壤氮、磷含量,促进沙化恢复^[18]。但是这些研究较少关注高寒牧区现有资源就地利用,特别是对高寒牧区家庭厩肥用于当地生态恢复的系列研究缺乏,需要相关研究进行验证。

若尔盖是我国重要的高寒湿地,同时也是青藏高原牧区的核心分布区之一。该地区作为黄河上游重要的水源涵养地,在泥炭存储、生物多样性保护、调节区域气候等方面具有非常重要的功能,但该地区面临着湿地退化、草地沙化等生态问题^[19]。在黄河上游生态保护和高质量发展的需求下,若尔盖地区开展了大量生态保护与恢复工作,并且成为探索高寒牧区生态文明发展模式与高寒牧区生态系统保护研究的典型地区。前期研究中分析了该区域草地退化成因与影响因子^[19-20],泥炭资源保护策略研究^[21],退化生态系统植被恢复等研究^[22-23],但是缺乏家庭厩肥影响植被恢复方面的研究。因此本研究以若尔盖牧区沙化草地为对象,研究家庭厩肥对沙化草地植被恢复的短期促进效应,对比与传统牛羊粪肥进行植被恢复对植被、土壤等的功效,探讨高寒牧区家庭厩肥进行生态恢复的可行性,为高寒牧区资源循环利用与生态保护提供研究基础。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于青藏高原东南缘的四川省阿坝州若尔盖县嫩哇乡(33.86° N, 102.57° E, 海拔 3481 m),该区域是黄河上游黑河流域的主要分布区,为典型的高寒草甸。该区域近 5 年的年均降水量分布在 650—945

mm, 年均气温 1.3℃左右, 生长季节雨热集中, 但持续时间短, 只分布在每年的 5 月至 9 月, 冬季较为漫长, 雪被覆盖规律不明显, 土壤在经过反复冻融后结束冬季进入植被生长季节。区域内土壤表层为长期高寒沼泽和湿地形成的高原泥炭土, 下层为长期河道筛选并改道后遗留的沙土。该区域是若尔盖湿地分布的重要区域, 同时也是我国主要的高寒牧区, 受过度放牧(牦牛与藏绵羊)以及风蚀和水蚀作用, 造成了土地沙化, 并由于风力和水蚀作用导致沙化扩张迅速。沙化地基础土壤性质见表 1。沙化地周边地表植物主要为适应高寒环境的中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*)、坡柳(*Salix myrtilleacea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、蕨麻(*Potentilla anserina*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、四川嵩草(*Carex setschwanensis*)、麻花艽(*Gentiana straminea*)等。

表 1 研究区域沙化土壤基础性质
Table 1 The basic properties of sandy soil in the study area

土壤层/cm Soil layer	pH 值 pH	质量含水量/% Moisture content	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus
0—10	7.35±0.05	3.2±0.17	2.78±0.08	0.37±0.03	0.38±0.02
10—20	7.68±0.11	4.48±0.46	2.34±0.31	0.26±0.01	0.23±0.03

1.2 施肥处理

在高寒沙地进行植被恢复和补充土壤养分, 利用已经验证有效的牛羊粪肥作为沙化地补肥方法, 对比家庭厩肥的补肥效果, 两种有机肥的基础性质见表 2。牛羊粪肥来自当地牧区采购的成熟商业用牛羊粪肥, 符合施放标准; 家庭厩肥来自于当地牧区厩肥, 通过标准化处理后符合施放标准。有机粪肥和家庭厩肥补肥标准以总氮含量为标准, 按照总氮为 225 kg/hm²的施用量进行施放。制备好的牛羊粪肥和家庭厩肥通过破碎后, 分别混合沙土均匀, 随种植草种与柳树种植时撒施到补肥区域, 并通过沙耙进行耙地后推平, 使补充的肥料主要埋深约 3—7 cm, 与沙土混合均匀, 镇压。

表 2 两种有机肥的基础性质
Table 2 The basic properties of two kinds of manure

类型 Types	质量含水量 Moisture content/%	有机碳 Organic carbon/%	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus/%
家庭厩肥 Household manure	4.52±1.29	18.64±4.01	0.63±0.18	0.27±0.11
牛羊粪肥 Cattle and sheep manure	2.37±0.24	20.91±3.76	0.49±0.10	0.19±0.07

1.3 恢复实验

恢复实验通过施肥补充土壤养分和植被恢复两种措施进行验证。施肥补充土壤养分只进行施肥而不进行植被恢复, 植被恢复是在施肥补充土壤养分的基础上进行植被恢复, 植被恢复选用已经广泛应用在青藏高原东缘半干旱和半湿润地区沙化治理的“灌—草”复合植物群落模式。用于植被恢复的种植物种选用燕麦(*Avena sativa*)作为先锋草本, 快速形成植被覆盖, 保护多年生草本老芒麦(*Elymus sibiricus*)和中华羊茅(*Festuca sinensis*), 并利用当地培育的 2 年生坡柳(*Salix myrtilleacea*)扦插苗作为灌木物种, 形成“灌—草”结构治理沙化。分别使用燕麦作为撒播草种, 使用混播草种进行沟播, 混播草种比例为燕麦:老芒麦:中华羊茅=1:1:1, 草种均按照燕麦 600 万株/hm²的量进行种植。

在 2023 年 5 月上旬土地冰雪融化后, 开始植被恢复实验, 混播草种在坡度小于 5°的沙地上, 利用沙地常见的小型开沟器, 开两排宽约为 5 cm 的种植沟, 沟深 3—5 cm, 沟间距约 5 cm 左右, 纵横交错的种植沟形成 1 m×1 m 的方格, 混合草种子种植在种植沟内; 方格内撒播燕麦草种, 方格中心种植 2 株 2 年生的坡柳, 种植穴坑深 25—30 cm。所有植物种植后, 根据土壤水分和降雨情况, 灌木每穴补充水 1—1.5 L。两种施肥的每个种植小区不小于 15 m×15 m, 3 个小区作为重复。牛羊粪肥和家庭厩肥对土壤补肥作用的区域不种植恢复使

用的植物,区域面积分别为 $45\text{ m}\times 15\text{ m}$,划分为 3 个小区;对照组为没有施肥的空白沙地(不进行植被恢复),面积为 $45\text{ m}\times 15\text{ m}$,划分为 3 个小区。所有样方处理后都进行人工封育,防止人为破坏和家畜采食。

1.4 样品采集与分析

在 2023 年 6 月中旬(植物生长前期)和 2023 年 10 月上旬(植物生长后期)对土壤样品进行采集。分别在无任何处理的空白沙地(对照,CK,control check)、牛羊粪肥补充土壤肥力且不种植植被(牛羊粪肥,CS,cattle and sheep manure)、家庭厩肥补充土壤肥力且不种植植被(家庭厩肥,HM,household manure)、牛羊粪肥补充土壤肥力且进行植被恢复(牛羊粪肥植被恢复,CSR,cattle and sheep manure and vegetation recovery)、家庭厩肥补充土壤肥力且进行植被恢复(家庭厩肥植被恢复,HMR,household manure and vegetation recovery)的各个小区中,沿对角线选择 3 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的小样方,利用内径 7 cm 的土钻分别采集 0—10 cm 和 10—20 cm 层的沙土,3 个小样方各层次的沙土混合为 1 个重复,3 个小区 3 个重复。

所有土壤样品在低温状态下带回实验室,在低温下迅速过 1 mm 筛,去除土壤根系和石子等杂物。一部分进行室温下风干,一部分新鲜样品用于土壤指标测定。土壤 pH 值利用 pH 计进行测定,土壤质量含水量利用烘干法进行测定,土壤有机碳利用浓硫酸和重铬酸钾混合溶液加热滴定方法进行测定,土壤全氮利用半微量凯氏定氮方法进行测定,铵态氮利用靛酚蓝比色方法进行测定,硝态氮利用稀盐酸环境下双波长比色方法进行测定,土壤全磷和有效磷利用钼锑抗比色方法进行测定,土壤蔗糖酶利用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定,土壤脲酶利用苯酚钠次氯酸钠比色法进行测定,土壤碱性磷酸酶利用磷酸苯二钠比色法进行测定,过氧化氢酶利用高锰酸钾滴定法进行测定,土壤微生物量碳、氮、磷利用氯仿熏蒸后,利用碳、氮、磷差值法进行测定^[24]。

在 2023 年 8 月末植被生长最旺盛的时期,对植被恢复情况进行调查。分别调查对照沙地和施肥进行植被恢复沙地的植物分布。在小样方中沿对角线划分 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的草本样方,调查每个样方内植被盖度,调查草本样方中燕麦株数,50 株燕麦株高,两种多年生草本株数;所有草本萌芽率按照样方株数与预施种子数的比进行计算。调查整个小区的坡柳成活株数(以地表部分茎保持鲜活,多于 5 个新萌芽或枝为当年成活),坡柳成活率按照小区内成活株数与总种植株数比进行计算。

1.5 统计分析

所有统计数据都利用均值和标准差进行表述。不同施肥处理下植被恢复指标利用单因素方法进行比较差异,水平为 5%。通过相关性分析所有土壤指标间的相关关系,并利用单因素方法对两种施肥处理下土壤理化指标差异性进行分析,显著水平为 5%。通过聚类分析方法分析两种施肥处理下沙化土壤各理化指标间的相似程度,对比短期促进效应的相似性。所有数据利用 SPSS 26.0 进行统计分析,利用 Origin 2022 pro 作图。

2 结果与分析

2.1 植被恢复

通过牛羊粪肥和家庭厩肥两种补肥方式对高寒沙地进行植被恢复,结果如表 3。传统牛羊粪肥处理下,植被盖度恢复至 71.23%,而通过家庭厩肥对植被恢复进行处理,也可使植被盖度恢复至 64.31%,两者远远高于空白对照;传统牛羊粪肥和家庭厩肥对燕麦生长都具有较好的促进作用,燕麦株高都超过 50 cm。传统牛羊粪肥和家庭厩肥处理下灌木柳树的成活率都超过了 50%,燕麦的成活率都超过了 65%;家庭厩肥处理下多年生草本种子萌芽率超过 50%,而传统牛羊粪处理下多年生草本种子萌芽率低于 50%,但是柳树、燕麦成活率以及多年生草本种子萌芽率在两种处理之间并没有显著差异($P>0.05$)。家庭厩肥与传统牛羊粪在短期快速补充植被恢复土壤养分后,植被快速恢复过程中植被的组成以人工种植物种为主,并未出现较多的演替物种。高寒沙化地通过家庭厩肥恢复植被与利用传统牛羊粪恢复植被的结果相似,对植被生长与植物群落形成上并没有显著差异($P>0.05$)。

表 3 不同处理下植被恢复情况
Table 3 Vegetation restoration under different treatments

处理 Treatment	植被盖度 Vegetation cover/%	燕麦株高 Oat height/cm	柳树成活率 Willow survival rate/%	燕麦成活率 Oat survival rate/%	多年生草本 萌芽率 Perennial herb germination rate/%	主要分布物种 Major distribution species
CK	5.19±1.08b	—	—	—	—	赖草 (<i>Leymus secalinus</i>)、马蔺 (<i>Iris lacteal</i>)
CSR	71.23±15.28a	67.25±21.33a	65.28±12.35a	72.79±19.27a	46.69±12.55a	赖草 (<i>Leymus secalinus</i>)、苜蓿 (<i>Thlaspi arvense</i>)、燕麦 (<i>Avena sativa</i>)、老芒麦 (<i>Elymus sibiricus</i>)、中华羊茅 (<i>Festuca sinensis</i>)、坡柳 (<i>Salix myrtilleacea</i>)
HMR	64.31±11.92a	59.61±6.98a	53.69±19.17a	67.99±18.36a	50.09±19.83a	赖草 (<i>Leymus secalinus</i>)、苜蓿 (<i>Thlaspi arvense</i>)、燕麦 (<i>Avena sativa</i>)、老芒麦 (<i>Elymus sibiricus</i>)、中华羊茅 (<i>Festuca sinensis</i>)、坡柳 (<i>Salix myrtilleacea</i>)

不同小写字母表示不同处理方式下植被盖度、株高、植物成活率及萌芽率差异显著, $P<0.05$; CK: 对照 Control check; CSR: 牛羊粪肥植被恢复 Cattle and sheep manure and vegetation recovery; HMR: 家庭厩肥植被恢复 Household manure and vegetation recovery; —: 未种植该植物, 无需进行测定

2.2 土壤理化指标变化

通过牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式对沙化地进行恢复, 土壤理化性质结果如表 4。牛羊粪肥和家庭厩肥方式显著降低了土壤 pH 值 ($P<0.05$), 并且显著增加了土壤质量含水量 ($P<0.05$), 在生长季节后期, 牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式恢复植被使 0—10 cm 层土壤水分增加到 7.07% 和 5.55%。牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式都显著增加了土壤有机碳、全氮、全磷含量 ($P<0.05$), 生长季节后期, 牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式恢复植被使 0—10 cm 层土壤有机碳、全氮、全磷含量分别增加到 6.15 g/kg 和 4.29 g/kg, 0.8 g/kg 和 0.85 g/kg, 0.51 g/kg 和 0.4 g/kg。牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式都显著增加了土壤速效养分含量 ($P<0.05$), 0—10 cm 层土壤硝态氮分别增加至 81.9 mg/kg 和 80.77 mg/kg。

2.3 土壤微生物量与酶活性变化

通过牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式对沙化地进行恢复, 土壤理化性质结果如表 5。牛羊粪肥和家庭厩肥方式显著增加了土壤微生物生物量 ($P<0.05$), 在生长季节后期, 牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式恢复植被使 0—10 cm 层微生物量碳、氮、磷分别增加到 522.37 mg/kg 和 417.35 mg/kg, 16.68 mg/kg 和 12.34 mg/kg, 24.76 mg/kg 和 16.84 mg/kg。牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式也显著增加了土壤酶活性 ($P<0.05$), 特别是脲酶, 在生长季节后期, 0—10 cm 层土壤脲酶活性增加了 2—3 倍, 分别增加至 45.92 mg NH₃-N g⁻¹ d⁻¹ 和 50.06 mg NH₃-N g⁻¹ d⁻¹。

2.4 土壤理化性质相关关系

通过牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式对沙化地进行恢复, 土壤理化性质相关性结果如图 1。在牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式下, 土壤理化指标间相关性较好, 土壤 pH 值和土壤质量含水量、土壤养分、土壤微生物量、土壤酶活性指标的变化呈显著负相关关系 ($P<0.05$); 土壤养分和土壤微生物量指标间都呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 土壤养分和土壤酶活性间呈正相关关系, 其中蔗糖酶活性和有效磷含量变化相关性不显著 ($P\geq 0.05$), 土壤微生物量与土壤酶活性变化之间呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。

牛羊粪肥和家庭厩肥补肥方式处理下土壤理化性质分布结果如图 2。通过牛羊粪肥和家庭厩肥补肥, 使两种处理方式下土壤的 pH 值和土壤质量含水量的分布差异较大, 差异显著 ($P<0.05$)。两种处理方式下土壤的养分的分布情况不一, 两种处理方式下土壤全氮、全磷、铵态氮、硝态氮的分布结果相似, 差异不显著 ($P\geq 0.05$); 而两种处理方式下土壤有机碳和有效磷的分布结果差异较大, 差异显著 ($P<0.05$)。两种处理方式下土壤的微生物量的分布情况也不一, 两种处理方式下微生物量氮和磷分布结果相似, 差异不显著 ($P\geq 0.05$);

表 4 不同处理下土壤理化性质

Table 4 Soil physicochemical properties under different treatments

土深/cm Soil depth	生长季节前期 Early growing season				生长季节后期 Later growing season					
	CK	CS	HM	CSR	HMR	CK	CS	HM	CSR	HMR
pH	7.60±0.33a	6.98±0.28b	7.23±0.07b	6.64±0.41c	7.00±0.13b	7.32±0.11a	6.42±0.36c	6.99±0.14b	5.97±0.25d	6.92±0.12b
质量含水量/%	7.58±0.21a	7.10±0.09b	7.15±0.12b	6.61±0.28c	6.71±0.24c	6.77±0.22a	6.99±0.13a	6.96±0.25a	6.26±0.23b	6.80±0.22a
	4.20±0.28c	5.42±0.43b	4.86±0.26b	6.46±0.51a	4.87±0.43b	4.23±0.38c	5.67±0.35b	4.38±0.13c	7.07±1.07a	5.55±0.39b
Moisture content	5.05±0.7c	5.06±0.32a	5.40±0.22b	5.72±0.16a	5.32±0.46b	3.78±0.19c	5.23±0.21b	4.04±0.13c	6.51±0.43a	5.66±0.34b
有机质/(g/kg)	2.63±0.31c	5.69±0.17a	3.46±0.52b	5.45±0.41a	4.00±0.11b	2.55±0.52d	6.73±0.88a	3.94±0.67c	6.15±0.17a	4.29±0.15b
Organic matter	2.27±0.4d	5.34±0.53b	3.94±0.2c	6.02±0.19a	4.07±0.13c	2.15±0.17d	5.45±0.4a	4.78±0.36b	5.67±0.28a	3.85±0.12c
全氮/(g/kg)	0.37±0.03e	0.93±0.06a	0.81±0.03b	0.63±0.04c	0.52±0.01d	0.38±0.01c	0.85±0.06b	1.00±0.09a	0.80±0.02b	0.85±0.08b
Total nitrogen	0.21±0.01c	0.70±0.02a	0.71±0.03a	0.63±0.03b	0.60±0.04b	0.25±0.03c	0.94±0.05a	1.07±0.07a	0.91±0.09a	0.84±0.04b
全磷/(g/kg)	0.35±0.04e	0.72±0.03a	0.65±0.05b	0.55±0.04c	0.44±0.12d	0.37±0.03d	0.63±0.06a	0.62±0.06a	0.51±0.01b	0.40±0.03c
Total phosphorus	0.23±0.02d	0.64±0.05a	0.64±0.03a	0.55±0.05b	0.48±0.02c	0.24±0.01d	0.70±0.08a	0.60±0.04b	0.54±0.01bc	0.42±0.02c
铵态氮/(mg/kg)	10.66±0.97d	45.96±8.77c	60.98±5.67a	54.25±0.37b	54.46±6.97b	14.26±0.31c	41.61±5.58b	45.63±4.28a	40.55±4.06b	43.15±2.43ab
Ammonium nitrogen	12.40±1.26c	40.84±3b	60.44±9.3a	59.75±2.38a	40.11±1.89b	10.54±0.6c	38.59±2.24b	50.18±2.73a	41.19±7.53ab	46.53±3.45a
硝态氮/(mg/kg)	79.80±2.76c	100.08±12.98b	123.50±7.23a	68.88±1.15c	75.33±5.25c	55.02±4.76d	97.61±4.99a	89.35±10.41b	81.90±4c	80.77±1.22c
Nitrate nitrogen	46.03±6.35d	80.13±4.99c	102.51±22.01a	87.50±1.98c	97.65±26.54b	39.32±3.12d	77.37±2.19b	85.35±15.18a	70.40±0.48b	60.29±4.65c
有效磷/(mg/kg)	3.79±0.31d	9.20±1.69c	27.82±5.53a	6.90±0.32c	15.14±1.84b	4.46±0.35d	10.80±0.41b	22.59±2.04a	7.48±1.19c	12.20±0.37b
Available phosphorus	3.06±0.2c	12.00±0.48b	19.59±0.84a	11.45±0.32b	13.12±1.55b	2.81±0.26d	11.13±1.16b	25.37±3.85a	6.55±0.51c	13.94±0.29b

不同小写字母表示不同处理方式下土壤理化性质在相同时期和同土壤层内差异显著, $P<0.05$; CK: 对照, control check; CS: 牛羊粪肥, cattle and sheep manure; HM: 家庭厩肥, household manure; CSR: 牛羊粪肥植被恢复, cattle and sheep manure and vegetation recovery; HMR: 家庭厩肥植被恢复, household manure and vegetation recovery

表 5 不同处理下土壤微生物量与酶活性

Table 5 Soil microbial biomass and enzyme activity under different treatments

土深/cm Soil depth	生长季节前期 Early growing season				生长季节后期 Later growing season			
	CK	CS	HM	CSR	CK	CS	HM	CSR
微生物量碳/(mg/kg)	280.73±13.42c	454.97±7.5a	370.40±8b	455.12±6.32a	402.26±23.15b	258.17±19.81c	533.40±147.43a	392.15±38.05b
10—20	224.93±16.14c	385.40±16.38a	355.24±4.36b	400.13±19.1a	394.47±17.87a	238.09±22.37d	451.91±17.78b	351.99±41c
微生物量碳/ (mg/kg)	2.60±0.25c	12.38±0.69a	10.50±0.43b	13.71±0.46a	12.37±0.68a	2.75±0.34c	13.22±1.03b	11.23±0.83b
10—20	2.13±0.16c	15.61±0.59a	9.12±0.34b	11.05±0.73b	9.45±0.12b	2.09±0.11c	14.88±0.31a	11.75±0.63b
微生物量氮/(mg/kg)	5.41±0.43d	20.81±0.77b	18.04±1.28c	21.96±0.65a	20.79±0.51a	5.74±0.33c	22.7±2.29a	18.42±1.08b
10—20	5.60±0.59c	22.44±2.77a	19.54±0.49b	19.75±0.8b	22.87±0.79a	5.37±0.4c	22.53±1.03a	17.92±1.67b
微生物量磷/(mg/kg)	0.09±0.01d	0.12±0.01c	0.29±0.03a	0.13±0.01c	0.16±0.01b	0.08±0.04d	0.15±0.04b	0.10±0.01c
10—20	0.07±0.02c	0.10±0.01b	0.16±0.02a	0.15±0.01a	0.15±0.01a	0.07±0.01c	0.11±0.02b	0.08±0.01c
过氧化氢酶/(mg G ⁻¹ mL ⁻¹ g ⁻¹)	75.79±2.55c	153.51±5.4a	93.95±2.31b	165.05±20.33a	101.80±1.67b	70.33±4.81e	134.46±7.71a	92.30±6.83d
10—20	74.46±1.93c	133.39±11.23a	50.45±2.17d	125.37±4.85b	130.58±21.03b	71.49±1.06c	137.97±7.05a	81.73±1.44c
蔗糖酶/(mg NH ₃ -N g ⁻¹ d ⁻¹)	11.85±1.93e	52.46±2.83b	63.44±6.75a	47.60±1.7c	40.31±0.68d	13.79±0.89d	64.20±2.09a	68.71±1.26a
10—20	9.29±0.45d	42.13±1.63bc	75.73±1.74a	39.13±0.19c	48.63±7.85b	12.56±0.48e	50.32±5.2b	63.42±3.16a
脲酶	2.29±0.27d	3.05±0.11c	4.99±0.43a	3.92±0.28b	4.16±0.05b	2.63±0.3d	4.51±0.45b	5.74±0.2a
10—20	1.95±0.08c	4.26±0.11a	4.10±0.16a	3.51±0.47b	3.86±0.07b	1.86±0.05c	4.00±0.08b	4.94±0.11a
碱性磷酸酶/(mg P g ⁻¹ d ⁻¹)	1.95±0.08c	4.26±0.11a	4.10±0.16a	3.51±0.47b	3.86±0.07b	1.86±0.05c	4.00±0.08b	4.94±0.11a
10—20	1.95±0.08c	4.26±0.11a	4.10±0.16a	3.51±0.47b	3.86±0.07b	1.86±0.05c	4.00±0.08b	4.94±0.11a
Alkaline phosphatase	1.95±0.08c	4.26±0.11a	4.10±0.16a	3.51±0.47b	3.86±0.07b	1.86±0.05c	4.00±0.08b	4.94±0.11a
10—20	1.95±0.08c	4.26±0.11a	4.10±0.16a	3.51±0.47b	3.86±0.07b	1.86±0.05c	4.00±0.08b	4.94±0.11a

不同小写字母表示不同处理方式下土壤微生物量和酶活性在相同时期和相同土层内差异显著, $P < 0.05$; CK: 对照 Control check; CS: 牛羊粪肥 Cattle and sheep manure; HM: 家庭厩肥 Household manure; CSR: 牛羊粪肥植被恢复 Household manure and vegetation recovery; HMR: 家庭厩肥植被恢复 Household manure and vegetation recovery

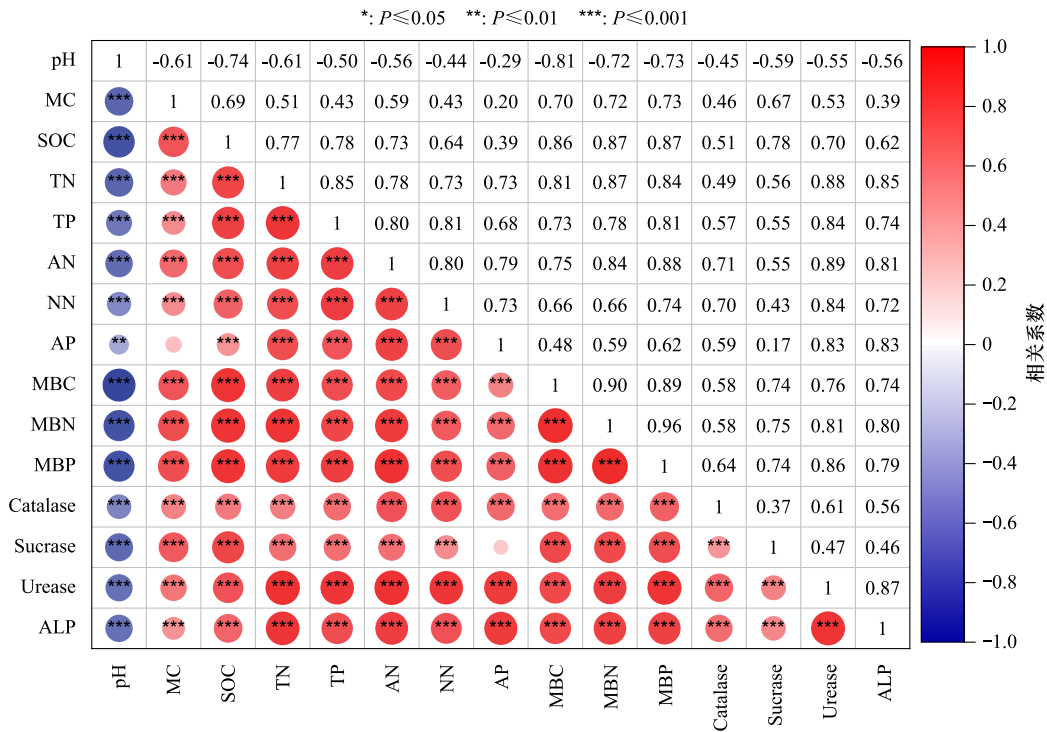


图 1 两种处理下土壤指标相关关系

Fig.1 Correlation of soil indicators under the two treatments

pH: 土壤 pH; MC: Moisture content, 土壤质量含水量; SOC: Soil organic matter, 土壤有机质; TN: Total nitrogen, 全氮; TP: Total phosphorus, 全磷; AN: Ammonium nitrogen, 铵态氮; NN: Nitrate nitrogen, 硝态氮; AP: Available phosphorus, 有效磷; MBC: Microbial biomass carbon, 微生物量碳; MBN: Microbial biomass nitrogen, 微生物量氮; MBP: Microbial biomass phosphorus, 微生物量磷; Catalase: 过氧化氢酶; Sucrase: 蔗糖酶; Urease: 脲酶; ALP: Alkaline phosphatase, 碱性磷酸酶

而两种处理方式下微生物量碳的分布结果差异较大,差异显著($P<0.05$)。两种处理方式下土壤的酶活性分布情况也不一,两种处理方式下过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶分布结果相似,差异不显著($P\geq 0.05$);而两种处理方式下蔗糖酶的分布结果差异较大,差异显著($P<0.05$)。

牛羊粪肥和家庭厩肥的补肥方式处理下对土壤理化性质作用的相似性结果如图 3。通过牛羊粪肥和家庭厩肥补肥下土壤 pH 值和土壤水分含量的结果相似性较高,两组处理下对土壤 pH 值和土壤质量含水量变化的相似度都达到了 80%。两组处理下土壤全氮和全磷变化的相似度较高,超过 70%,但有机碳、铵态氮、硝态氮、有效磷的相似度较低。两组处理下微生物量碳、氮、磷变化的相似度较高,都超过 70%,脲酶和碱性磷酸酶相似度也较高,也都超过 70%;但蔗糖酶和过氧化氢酶活性变化相似度相对较低。

3 讨论

高寒沙地进行植被恢复过程中,通过补充土壤肥力促进先锋植物快速生长是植被恢复的有效方式^[25—26]。本研究中,利用传统牛羊粪和家庭厩肥制作的有机肥进行植被恢复,有效的促进了植被的生长过程,特别是促进了先锋物种一年生燕麦的生长,这与前期在该地区开展的部分研究结果相似^[27—28]。本研究在进行植被恢复过程中,先锋草本燕麦快速形成较高的盖度,为地表提供遮蔽,避免强烈阳光直射造成地表水分大量损失以及地表高温损伤多年生草本幼株^[29],同年燕麦枯萎后形成的残茬在冬季可以隔离雪被并阻碍风沙,为沙地生长较慢的多年生草本提供庇护,保障多年生草本安全度过冬季^[28, 30]。此外,研究使用的家庭厩肥与牛羊粪肥相似的都支撑了灌木和多年生草本生长,这有利于进一步促进植被生长和群落演替。本研究中所使用的家庭厩肥与传统牛羊粪肥对比,虽然家庭厩肥处理下植被盖度、燕麦株高、燕麦成活率都略低,但是多年生草本种

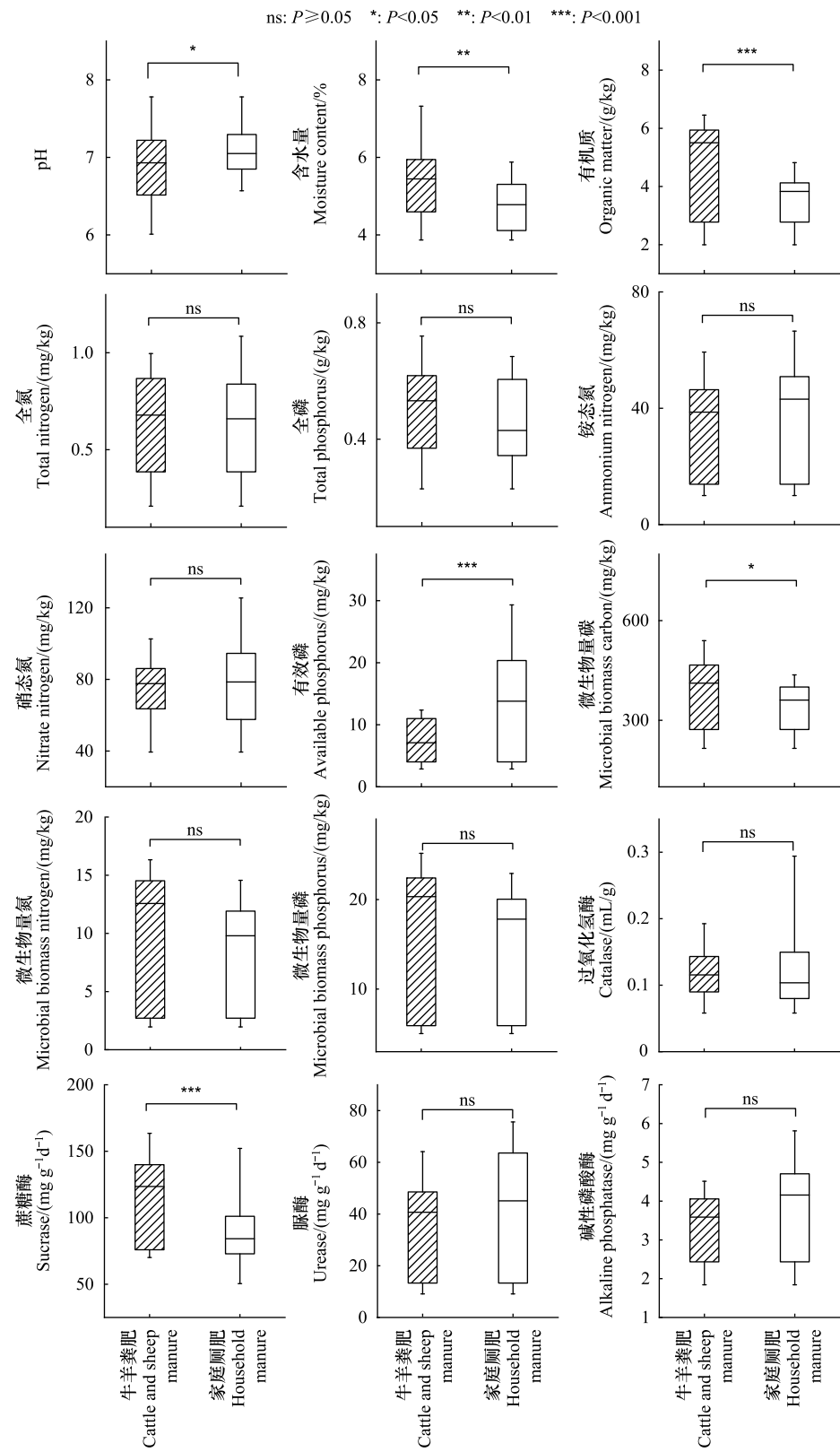


图 2 不同处理下土壤指标分布
Fig.2 Distribution of soil indicators under different treatments

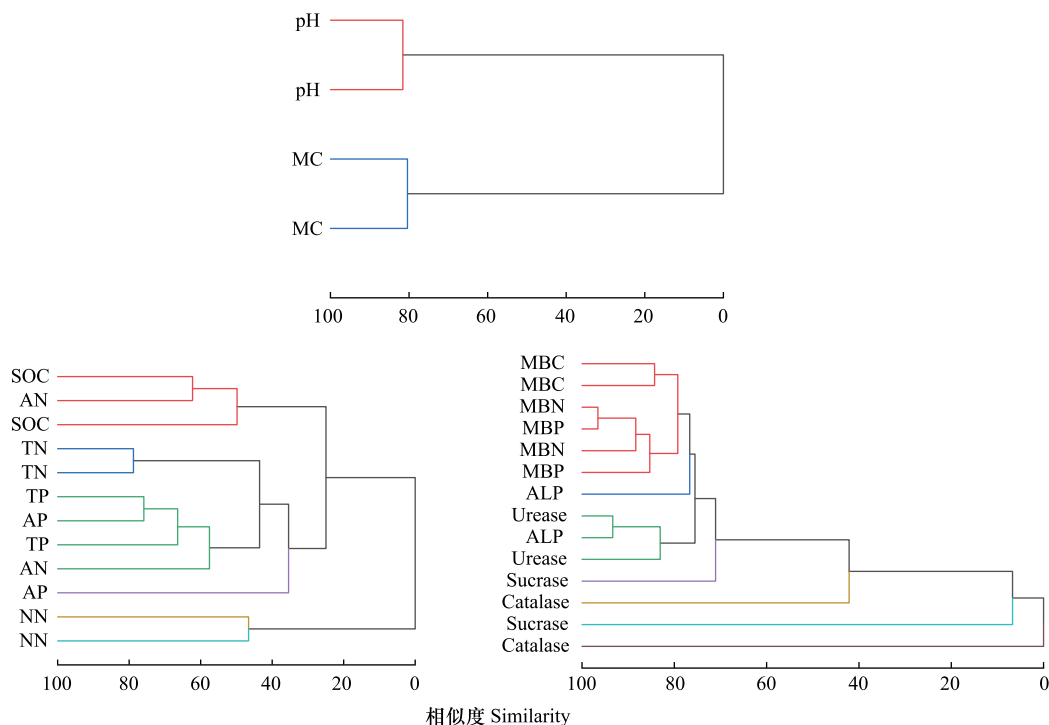


图3 不同处理下土壤指标间相似性

Fig.3 Similarities in soil indicators under different treatments

pH: 土壤 pH; MC: Moisture content, 质量含水量; SOC: Soil organic matter, 土壤有机质; TN: Total nitrogen, 全氮; TP: Total phosphorus, 全磷; AN: Ammonium nitrogen, 铵态氮; NN: Nitrate nitrogen, 硝态氮; AP: Available phosphorus, 有效磷; MBC: Microbial biomass carbon, 微生物量碳; MBN: Microbial biomass nitrogen, 微生物量氮; MBP: Microbial biomass phosphorus, 微生物量磷; Catalase: 过氧化氢酶; Sucrase: 蔗糖酶; Urease: 脲酶; ALP: Alkaline phosphatase, 碱性磷酸酶

子的成活率更高,在家庭粪肥能够保证一年生先锋草本形成有效地表覆盖的背景下,更多的多年生草本种子的萌发能够提高多年生草本的成活与后续成长,对后续植物群落演替提供良好的基础。因此,施用家庭厩肥与传统牛羊粪肥一样能促进高寒沙地短期内先锋植物快速生长,促进植被恢复过程。

土壤理化、生物等特性是支撑植被生长和繁育的基础条件,也是支撑植物群落演替的必要条件^[31—32]。在本研究中,施用家庭厩肥与施用牛羊粪肥一样,对沙化地土壤全氮、全磷、铵态氮、硝态氮、微生物量氮、微生物量磷、过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶的改良和促进作用相似,并无显著差异。但是施用家庭厩肥条件下土壤水分含量低于传统牛羊粪肥,pH 值高于传统牛羊粪肥,其原因可能与本研究中所使用的养分对比条件以总氮的含量为基准有关,传统牛羊粪肥相同氮含量下含有更多的有机质,家庭厩肥中相同氮含量有机质相对较少。大量的有机质可以促进土壤水分的吸收和保留能力,并且有机质降解也会降低土壤 pH^[33—34],这同时也可能是造成施用家庭厩肥使土壤中有机碳含量与沙土蔗糖酶活性低于施用牛羊粪肥的原因。在本研究中施放家庭厩肥进行植被恢复后土壤有效磷含量要显著高于传统牛羊粪肥,一方面可能是由于家庭厩肥和传统牛羊粪肥磷组分的差异,另一方面,也可能是在恢复过程中不同的微生物类群进行作用,导致了家庭厩肥条件下土壤释放出更多的有效磷,这还需要进一步研究。

本研究使用家庭厩肥和传统牛羊粪肥支撑高寒沙化地植被恢复,都能够较好的支撑第一年先锋草本发育和植被恢复过程,并且两者对土壤理化性质、微生物和酶活性具有相似的作用。选用的补肥材料全部来自沙化发生的高寒地区,高寒地区传统牛羊粪在沙化治理养分补充中早已得到充分应用^[35—36],而所选用的家庭厩肥也基本能够达到牛羊粪肥的效果。虽然两种粪肥材料不同,但是肥效以氮含量为基准,两种补肥对植被和土壤具有相似促进功能,一方面可能是由于两种材料的养分含量已经达到高寒沙地生态恢复与植被生长的需

求,对沙化土壤补充了足够氮、磷的条件下,用于生态恢复的植被能够正常完成生长和发育,并且先锋草本快速形成的群落覆盖能够促进后续植被的恢复过程;另一方面可能由于两种材料有机质、氮、磷的组成具有一定相似性,通过对沙化土壤的改良能够达到相似的生态功能,进而对沙化恢复具有相似的促进作用;最后,两种材料补肥后微生物量具有高的相似性说明高寒沙地微生物群落可能根据补肥的差异,调整功能类群,促进养分的归还过程,但是群落和功能的异同还需要更多深入研究。

研究结果表明家庭厩肥与传统牛羊粪肥一样可以在短期内有效促进高寒地区沙化地植被恢复过程,并且对改善土壤理化性质、促进微生物生长和酶活性增加都具有显著效应,可以利用家庭厩肥对沙化地进行植被恢复。在与家庭厩肥相似的沼肥施放研究中,沼肥的研究结果表明沼肥不仅可以有效改善土壤性质,增加作物产量^[37],也是沙漠植被生长的良好土壤养分补充材料^[38]。这与沼肥能够有效促进土壤氨氧化过程,提高土壤硝化强度,从而进一步改良土壤效果有关^[39-40]。但也有研究认为沼肥的使用也可能引发抗生素残留等风险^[41-42]。因此科学合理地使用肥料对于保护土壤环境、促进植物生长具有重要意义。相似的,在考虑家庭厩肥改良土壤时,也存在一定的污染风险,因此在施用前需要按照标准对粪肥进行优化处理,符合使用标准。建议未来在高寒沙化地使用家庭厩肥时进行生态恢复过程监测,并综合利用家庭厩肥和牛羊粪肥的优势,相互搭配,促进高寒沙化生态恢复。

4 结论

在高寒牧区,利用牧区家庭厩肥对沙化地进行植被恢复,与使用传统牛羊粪肥短期促进植被恢复的功能相似。使用家庭厩肥在短期内有效促进了植被生长和恢复过程,使先锋草本燕麦快速形成有效群落盖度;使用家庭厩肥有效促进了土壤水分增加,降低了土壤 pH 值,并且增加了土壤碳、氮、磷养分含量,促进了微生物量碳、氮、磷增加,也增加了土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶的活性。未来在增加高寒牧区社会家庭厕所改造时,建议可将家庭厩肥进行标准和无公害处理后用于生态恢复,可同时搭配传统牛羊粪肥进行沙化治理,促进植被恢复过程,实现高寒草原地区生态环境的高质量保护和可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Long R J, Ding L M, Shang Z H, Guo X H. The yak grazing system on the Qinghai-Tibetan Plateau and its status. *The Rangeland Journal*, 2008, 30(2): 241.
- [2] Li W L, Liu C L, Su W L, Ma X L, Zhou H K, Wang W Y, Zhu G F. Spatiotemporal evaluation of alpine pastoral ecosystem health by using the Basic-Pressure-State-Response Framework: A case study of the Gannan region, northwest China. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108000.
- [3] Wang H, Guo Z G, Xu X H, Liang T G, Ren J Z. Response of vegetation and soils to desertification of alpine meadow in the upper basin of the Yellow River, China. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 50(4): 491-501.
- [4] Ma L, Wang Q, Shen S T, Li F C, Li L. Heterogeneity of soil structure and fertility during desertification of alpine grassland in northwest Sichuan. *Ecosphere*, 2020, 11(7): e03161.
- [5] 李森,董玉祥,董光荣,杨萍,张春来. 青藏高原土地沙漠化区划. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 418-427.
- [6] 周虹,刘雲祥. 青海共和盆地人工固沙植被恢复对土壤微生物数量的影响. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1): 178-185.
- [7] 曹全恒,胡健,陈雪玲,孙梅玲,刘小龙,杨丽雪,周青平. 川西北沙地植被恢复对土壤碳氮磷及生态化学计量特征的影响. *草地学报*, 2022, 30(3): 523-531.
- [8] 赵珮杉,郭米山,高广磊,丁国栋,张英,任悦. 半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征. *环境科学*, 2023, 44(1): 502-511.
- [9] Zhang Y, Cao H Y, Zhao P S, Wei X S, Ding G D, Gao G L, Shi M C. Vegetation restoration alters fungal community composition and functional groups in a desert ecosystem. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 589068.
- [10] Gao X X, Dong S K, Xu Y D, Li Y, Li S, Wu S, Shen H, Liu S L, Fry E L. Revegetation significantly increased the bacterial-fungal interactions in different successional stages of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 2021, 205: 105385.
- [11] Hu L, Zi H B, Wu P F, Wang Y, Lerdau M, Wu X W, Wang C T. Soil bacterial communities in grasslands revegetated using *Elymus nutans* are largely influenced by soil pH and total phosphorus across restoration time. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(18): 2243-2256.
- [12] 胡金娇,周青平,吕一河,胡健,陈有军,苟小林. 青藏高原东缘半湿润沙地典型生态恢复模式的效果比较研究. *生态学报*, 2020, 40(20): 7410-7418.

- [13] Zhang Z W, Han J H, Yin H Y, Xue J, Jia L Z, Zhen X, Chang J J, Wang S K, Yu B. Assessing the effects of different long-term ecological engineering enclosures on soil quality in an alpine desert grassland area. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109426.
- [14] Liu D D, Ju W L, Jin X L, Li M D, Shen G T, Duan C J, Guo L, Liu Y Y, Zhao W, Fang L C. Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semiarid grassland under different grazing prohibition timeframes. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146104.
- [15] Gou X L, Hu J, Chen Y J, Wei X X, Du Z, Zhou Q P. The effect of artificial vegetation recovery on the soil nutrients and enzyme activities in subhumid desert land on the southeast Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2019, 139: 105528.
- [16] 刘向, 张鹏, 刘建全. 无机肥料是青海塔拉滩光伏电站植被恢复过程中的限制性因子. *生物多样性*, 2022, 30(5): 29-36.
- [17] 任康, 郭坤, 郑景明, 周金星. 四种草本植物混播处理在西藏措那湖沙害区植被恢复中的表现. *生态学报*, 2020, 40(3): 910-920.
- [18] 赵增新, 唐进年, 李银科, 王祺, 刘有军, 杨雪梅, 袁宏波, 曹晓涛. 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. *水土保持通报*, 2023, 43(4): 68-76.
- [19] Dong Z B, Hu G Y, Yan C Z, Wang W L, Lu J F. Aeolian desertification and its causes in the Zoige Plateau of China's Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59(8): 1731-1740.
- [20] 韩大勇, 杨永兴. 若尔盖高原沙化沼泽区植物群落物种组成及其驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(16): 5602-5610.
- [21] Zhang X H, Liu H Y, Baker C, Graham S. Restoration approaches used for degraded peatlands in Ruogai (Zoige), Tibetan Plateau, China, for sustainable land management. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 86-92.
- [22] Ye C Y, Li L, Zhao R Y, Luo X R, Wang X D, Wang J P, Chen G, Lei N F, Pei X J, Tang X L. Soil organic carbon and its stability after vegetation restoration in Zoige grassland, eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Restoration Ecology*, 2023, 31(7): e13896.
- [23] 干友民, 罗元佳, 周家福, 张锦华. 川西北沙化草地生态恢复工程对沙地植被群落的影响. *草业科学*, 2009, 26(6): 51-56.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [25] Zong N, Shi P L. Enhanced community production rather than structure improvement under nitrogen and phosphorus addition in severely degraded alpine meadows. *Sustainability*, 2019, 11(7): 2023.
- [26] Zhou H K, Yang X Y, Zhou C Y, Shao X Q, Shi Z C, Li H L, Su H Y, Qin R M, Chang T, Hu X, Yuan F, Li S, Zhang Z H, Ma L. Alpine grassland degradation and its restoration in the Qinghai-Tibet Plateau. *Grasses*, 2023, 2(1): 31-46.
- [27] 帅林林, 周青平, 陈有军, 苟小林, 周蓉. 高寒半湿润沙地草本修复期土壤微生物变化研究. *草业学报*, 2019, 28(9): 11-22.
- [28] 苟小林, 刘文辉, 陈有军, 周蓉, 周青平. 植物沙障不同种植模式对川西北沙地的恢复效应. *草业学报*, 2019, 28(6): 33-44.
- [29] 蒲琴, 胡玉福, 蒋双龙, 何剑锋, 舒向阳, 杨泽鹏. 不同生态治理措施下高寒沙化草地土壤氮素变化特征. *草业学报*, 2016, 25(7): 24-33.
- [30] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. *The Botanical Review*, 1991, 57(1): 1-32.
- [31] De Deyn G B, Kooistra L. The role of soils in habitat creation, maintenance and restoration. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2021, 376(1834): 20200170.
- [32] 乔福生, 王长庭, 宋小艳, 毛军. 3种多年生禾本科牧草不同径级根系特征比较. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(5): 1100-1108.
- [33] 罗珺月, 冯杰, 罗阳, 蒋宏忱, 黄柳琴. 微生物厌氧氨氧化耦合铁还原的研究进展及展望. *微生物学报*, 2023, 63(6): 2031-2046.
- [34] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用. *植物生态学报*, 2011, 35(12): 1209-1218.
- [35] 江仁涛, 李富程, 沈淞涛. 不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 197-203.
- [36] Liang J M, Pute W, Behboudian M H, Wang Z H, Zou Z R, Morton A. Responses of muskmelon to cattle or sheep manure compost mixed with sandy soil. *Journal of Organic Systems*, 2008, 3(2): 40-50.
- [37] 陈霞, 罗友进, 吴纯清, 高明, 谢永红. 沼肥深施对果园土壤性质及柑橘产量的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 177-183, 189.
- [38] Abubaker J, Alaswd A, Mohammed N S, Zeadani H E, Khalifa M. Alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and yield in desert soil fertilized with raw and anaerobically digested cattle manure. *Journal of Plant Nutrition*, 2022, 45(7): 992-1003.
- [39] 宋三多, 陈强, 熊璐, 陈乃禾, 谭渊, 刘汉军, 杨先超. 不同沼肥处理对小麦分蘖期土壤硝化作用强度及氨氧化细菌和古菌群落的影响. *麦类作物学报*, 2016, 36(1): 111-119.
- [40] 张莉, 鲍陈燕, 章明奎. 利用沼肥培育新增耕地地力的研究. *土壤通报*, 2015, 46(6): 1472-1477.
- [41] 赵方凯, 杨磊, 乔敏, 李守娟, 孙龙. 土壤中抗生素的环境行为及分布特征研究进展. *土壤*, 2017, 49(3): 428-436.
- [42] Ezzariai A, Hafidi M, Khadra A, Aemig Q, El Fels L, Barret M, Merlina G, Patureau D, Pinelli E. Human and veterinary antibiotics during composting of sludge or manure: Global perspectives on persistence, degradation, and resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 359: 465-481.