

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.031

引用格式:胡昊,王青,贺晓帆,等.生物结皮添加和无纺织物覆盖对退化高寒草地修复效果研究[J].草地学报,2026,34(7):2698—2707

HU Hao, WANG Qing, HE Xiao-fan, et al. Effects of Biocrust Addition and Non-woven Fabric Covering on the Restoration of Degraded Alpine Grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2698—2707

生物结皮添加和无纺织物覆盖对退化高寒草地修复效果研究

胡昊¹, 王青¹, 贺晓帆², 陈盈燕¹, 聂嘉欣¹, 刘芳茜¹, 周金露¹, 李昱宏¹,
赵琨¹, 张建立³, 王祥⁴, 邵新庆¹, 贾善刚^{1*}

(1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 2. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 新疆维吾尔自治区草原总站, 新疆 乌鲁木齐 830049; 4. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:青藏高原高寒草地退化严重威胁区域生态安全,急需兼顾快速植被恢复与长期功能提升的修复技术。本研究通过野外控制试验,系统探究了生物结皮添加、无纺织物覆盖及其综合处理对退化高寒草地生态修复的影响。试验在青海省刚察县设置16个样方并采用随机区组设计,测定了植被特征、土壤理化性质及抗蚀性。结果表明:(1)无纺织物处理能快速恢复植被,其地上干物质质量和植被盖度较对照组分别显著提升375.5%和107.6%;(2)生物结皮处理利于长期生态功能恢复,植物多样性和苔藓结皮盖度分别增加40.4%和863.6%,并显著提升结皮层土壤有机质和全氮含量(增幅分别为20.8%和13.1%);(3)综合处理组表现出最佳协同效应,其土壤侵蚀模数较对照组显著降低83.1%。综上,无纺织物覆盖适用于快速恢复植被盖度,生物结皮添加利于长期土壤改良与生物多样性提升,而二者结合的综合措施在协同提升养分有效性和控制土壤侵蚀方面优势显著,为高寒退化草地的多目标修复提供了优化方案。

关键词:高寒草地;土壤抗蚀性;生态修复;协同效应

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2698-10

Effects of Biocrust Addition and Non-woven Fabric Covering on the Restoration of Degraded Alpine Grasslands

HU Hao¹, WANG Qing¹, HE Xiao-fan², CHEN Ying-yan¹, NIE Jia-xin¹, LIU Fang-qian¹, ZHOU Jin-lu¹,
LI Yu-hong¹, ZHAO Kun¹, ZHANG Jian-li³, WANG Xiang⁴, SHAO Xin-qing¹, JIA Shan-gang^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Grassland Station, Urumqi, Xinjiang 830049, China; 4. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The degradation of alpine grassland on the Qinghai-Tibet Plateau severely threatens regional ecological security, creating an urgent need for restoration techniques that balance rapid vegetation recovery with long-term functional enhancement. This study employed a field-controlled experiment to systematically investigate the effects of biocrust addition, non-woven fabric covering, and their combined treatment on the ecological restoration of degraded alpine grassland. Sixteen plots were established in Gangcha County, Qinghai Province, using a randomized block design. Vegetation characteristics, soil physicochemical properties, and erosion resistance were measured. The results showed that: (1) The non-woven fabric treatment rapidly restored vegeta-

收稿日期:2025-11-24;修回日期:2026-01-28

基金项目:林草科技推广示范项目“免耕补播促进重度退化高寒草原生产生态功能提升技术”(QLC2024TG14);2026年中央财政林草科技推广示范项目(编号:新[2026]TG06号)资助

作者简介:胡昊(1998-),男,汉族,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事退化草地恢复方向研究,E-mail: huhao@cau.edu.cn;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: shangang.jia@cau.edu.cn

tion, and significantly increased aboveground dry matter and vegetation coverage by 375.5% and 107.6%, respectively, compared to the control. (2) The biocrust treatment facilitated long-term ecological function recovery, and enhanced plant diversity and moss crust coverage by 40.4% and 863.6%, respectively. It also significantly increased soil organic matter and total nitrogen content in the crust layer by 20.8% and 13.1%. (3) The comprehensive treatment exhibited the strongest synergistic effect, reducing the soil erosion modulus by 83.1% compared to the control group. In conclusion, non-woven fabric covering is suitable for rapid vegetation recovery, biocrust addition promotes long-term soil improvement and biodiversity, and their combination offers synergistic advantages in enhancing nutrient availability and controlling soil erosion. This study provides an optimized multi-objective technical approach for restoring degraded alpine grassland.

Key words: Alpine grassland; Soil erosion resistance; Ecological restoration; Synergistic effect

高寒草地主要分布于青藏高原,其总面积约 $1.59 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占整个高原面积的 59.28%, 是中国乃至亚洲最重要的草地之一^[1-2]。在过去数十年内, 由于过度放牧等因素, 该地区平均草地退化面积达 24.3%^[3], 生态功能严重衰退。目前, 高寒草地生态修复主要依赖围栏封育与免耕补播等传统措施^[4]。然而这些方式均存在显著局限性, 围栏封育的生态修复依赖自然演替, 周期过长, 降低物种多样性^[5]。免耕补播虽然会短期内提升草地上生物量, 提供足量牧草, 但是未能从根本上改善土壤结构, 提升土壤养分^[6], 甚至会使群落结构单一化, 严重依赖草种的同时存在长期的潜在风险^[7]。此外, 对于草地植被退化导致的土壤侵蚀加剧问题也缺乏有效的应对策略^[8]。因此, 现代生态工程不能仅仅追求草地生产力, 必须兼顾“结构恢复”与“功能提升”, 既要快速遏制水土流失, 又要促进生物多样性维持、土壤养分循环和系统自维持能力^[9,10]。因此, 发展能够快速稳定地表, 并同步实现土壤长效改良的协同修复技术, 成为高寒草地生态工程的迫切需求。

生物基可降解无纺布因其可降解、无污染的特性, 在青藏高原生态修复中已得到广泛应用^[11]。该材料由纺粘法等工艺制成, 具有良好的遮光、保水保墒功能, 能有效缓解高原地区昼夜温差大、强风、强光等环境胁迫, 从而固定表土, 提高植被成活率^[12,13]。实践表明, 在祁连山东段山区草地, 无纺布覆盖可显著提升草种保存率、出芽率并改善植株根系生长情况^[14]; 在甘孜藏族自治州的工程迹地修复中, 无纺布的应用提高了植被的盖度和密度^[15]。对于自我修复功能丧失的重度退化草地, 无纺布也有较强的实用性, 除了适用于各种地形外, 还可以降低土壤该作用水分蒸腾, 防止水土流失, 直接庇护种子萌发和幼苗定植。打破了植被消失和生境恶化的循环, 启动了生态修复的初级步骤^[16]。生物结皮是生长在土壤表面, 由微生物与土壤颗粒聚合而成的生

物层。其主要成分包括能进行光合作用的蓝藻、藻类、地衣、苔藓, 以及依赖有机质的细菌和真菌^[17]。在生态修复工作中, 生物结皮作为生态修复进程的关键标志, 其形成不仅直观反映了修复过程, 更凭借自身固氮、固碳等生态功能, 持续改善土壤养分状况^[18]。大量研究表明, 在各类型的退化草地中, 结皮土壤的有机质含量均显著高于退化裸土^[19-21]。生物结皮的另一关键生态功能在于其对土壤物理结构的改良。一方面, 密集的菌丝网络与微生物分泌物将松散土壤颗粒交织成稳定的团聚体, 显著增强土壤抗剪切强度, 从而有效抵抗风蚀与水蚀的破坏^[22]。另一方面, 结皮层内部发达的毛细孔隙结构可以提升土壤的持水与导水能力, 促进大气降水和凝结水分的深层下渗与汇集, 为植物根系创造了持续的水分供给环境^[23]。这种对土壤力学特性和水文过程的双重调控, 奠定了生态系统自我维持与恢复的物理基础。

在现有研究中, 高寒草地修复中的技术应用多局限于单一技术的效果评估。这些研究往往侧重于评价补播牧草的短期生长响应, 而未能系统揭示二者在自然恢复进程中对土壤理化性质和植物群落演替的综合影响, 尤其缺乏对土壤侵蚀模数这一关键指标的评估^[24]。因此, 无纺布覆盖与生物结皮添加如何协同发挥快速控制侵蚀与持续提升土壤养分的联合效应仍存在研究空白。针对这一问题, 本研究通过野外控制试验, 系统性探究了这两种技术单独及联合处理对土壤性质、植被特征及抗蚀能力的综合效应, 旨在为青藏高原退化高寒草地的早期协同修复提供关键的理论依据与实践方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州刚察县沙

柳河镇三角城种羊场(100°14'24"E, 37°17'24"N), 海拔高度在3300~3400 m, 该地区为高寒草原类型, 典型高原大陆性气候, 冷季长暖季短, 冬寒夏凉, 日照时间长, 昼夜温差大, 雨热同季, 降水量少且集中, 2024年年均温为2.18℃, 年降水量为373.1 mm, 年最高温度和最大降水量分别出现在8月和6月, 为12.8℃和82.1 mm(图1)。土壤为典型栗钙土, 黏粒占4.9%, 粉粒33.4%, 砂粒61.7%。草地建群种主要为冷地早熟禾(*Poa crymophila* Keng)、针茅(*Stipa capillata* L.)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus* Willd.)、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii* Jacq.)、青藏藁草(*Carex moorcrofti* Falc. ex Boott)等。

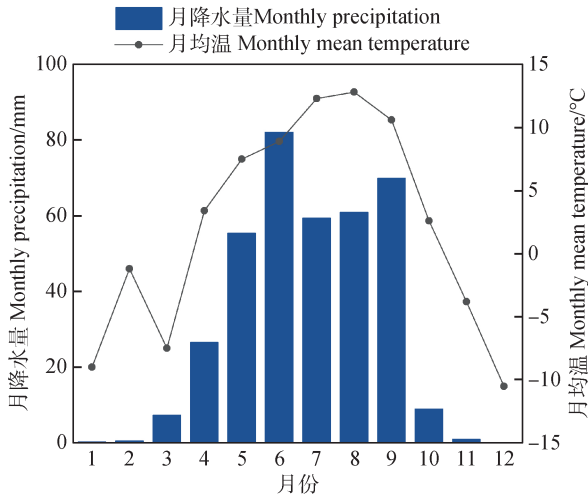


图1 2024年青海省海北藏族自治州刚察县月均温和月降水量

Fig. 1 Monthly mean temperature and monthly precipitation in Gangcha County, Haibei, Qinghai Province, in 2024

1.2 研究方法

1.2.1 试验样地布置 本试验于2024年6月初进行样地布置。在羊场草地内选取地形地貌较为一致的典型中度退化草地(优势种为针茅和青藏藁草, 按照地方标准DB63/T 981-2011定义)作为研究区域进行围栏封闭。在研究区域内, 沿坡度方向随机布设16个3 m×4 m的试验样方, 采用随机区组设计, 设置4种处理, 分别是: 无处理的对照组退化草地(Control, CK), 仅覆盖无纺布的处理组(Non-woven fabric, NF), 仅添加苔藓结皮的处理组(Biocrust, BC)和覆盖无纺布并添加苔藓结皮的综合处理组(Non-woven fabric and biocrust, NB), 每个处理重复4次。苔藓结皮的添加参考涛等^[25]的方法, 采用植物粉碎机将繁育苔藓斑块进行粉碎后按照450 g·m⁻²的添加量均匀添加到样方中, 该种

方式可以使藓类产生新的茎叶体并扩大分布面积^[26]。无纺布处理的样地采用20 g·m⁻²的可降解无纺布进行样方全覆盖。

1.2.2 样品采集与测定方法

(1) 植被和结皮特征

样方调查于八月中旬开展。在每个试验样方中使用0.5 m×0.5 m的栅格框随机选择一个小样方进行植物群落调查, 记录小样方内的植物群落总盖度(Vegetation coverage, VC)、密度(Vegetation density, VD)、高度(Vegetation height, VH)和结皮盖度(Biocrust coverage, BC), 将草地群落物种分为禾本科草和杂类草并统计分盖度、密度、高度。随后将该0.5 m×0.5 m小样方内的地上植被齐地面刈割, 所得样品置于85℃烘箱持续烘干48小时以上, 直至恒重后称重, 测定地上干物质量(Aboveground biomass; AB)^[27]。基于物种重要值计算每个处理下的Simpson指数和Shannon-Wiener指数^[28],

$$\text{物种重要值 } P_i = (RH + RC + RD) / 3$$

其中RH是物种的相对高度, RC是物种的相对盖度, RD是物种的相对密度

$$\text{Simpson指数 } D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2$$

$$\text{Shannon wiener指数 } H = - \sum_{i=1}^n P_i \times \ln(P_i)$$

式中 P_i 为第 i 个物种的相对重要值。

(2) 土壤理化性质

用园艺铲铲取实验样方结皮层区0~2 cm的表层土壤, 用内径为5 cm的土钻钻取2~10 cm的根系土壤, 按三点取样法每个样方各取三钻后混合密封, 带回实验室后风干, 过筛。

采用pH计(FE28, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司)利用电位法测定pH值, 采用环刀-铝盒法测定土壤含水率(Soil water content, SWC)和土壤容重(Soil bulk density, SBD)。采用凯氏定氮法-还原法测定全氮(Total nitrogen, TN), 采用硫酸-高氯酸消解和钼锑抗比色法定量分析全磷(Total phosphorus, TP), 采用Bray-I法和钼锑抗比色法分析速效磷(Available phosphorus, AP), 采用火焰光度计法测定全钾(Total potassium, TK), 采用醋酸铵-火焰光度计法测定速效钾(Available potassium, AK), 采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机质含量(Soil organic matter, SOM)^[29]。

(3) 土壤侵蚀模数

土壤侵蚀模数采用集流法测定, 模拟降水以测定土壤流失量。将小区两侧用木板隔开, 沿样方下侧边

开一条略宽于样方的截流沟并于沟内铺设防水布,依据当地年降水量设计浇水量为 $20\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ (模拟约半年降水量),在试验样方上方缓慢均匀浇水,保证样方区浇水量相同,用截流沟收集冲刷的泥沙混合物,待坡面不再产生冲刷泥沙后用空瓶收集带回实验室进行后续处理。泥沙混合液静置 24 小时后,待瓶中泥沙完全沉降,倾倒入清液,将沉降泥沙转移至铝盒中,置于 105°C 烘箱中烘干至恒重(约 24 小时),之后称量泥沙干重作为土壤流失总量并计算土壤侵蚀模数,

$$\text{土壤侵蚀模数 } A = \frac{Q}{S \times T}$$

式中 Q 为土壤流失总量, S 为侵蚀区面积, T 为观测时长。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2019 记录和整理野外统计数据 and 土壤理化性质检测结果,数据表现为平均值±标准误差,采用 IBM SPSS Statistics 21 进行单因素方差分析(ANOVA),采用 Duncan 法对数据进行事后检验,以 $P<0.05$ 为检验标准确定组间差异性并用小写字母标注。采用 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理对草地地上植被和结皮的影响

由表 1 可知,除 CK 外,其余三种处理组中均未发

现冷蒿,但均出现了冷地早熟禾和独行菜。此外,仅在 BC 组中出现了豆科植物斜茎黄芪和唇形科植物白花枝子花(*Dracocephalum heterophyllum* Benth.),而 NF 和 NB 两组中均出现了山莓草(*Sibbaldia procumbens* L.)和灰绿藜(*Oxybasis glauca* (L.) S. Fuentes, Uotila & Borsch)。由此可见,所有修复处理均改变了植物物种组成,与 CK 组 6 种物种相比,NF,BC 和 NB 组的物种数均增加至 9 种,表明三种处理均能在短期内提升退化草地的物种丰富度。由表 2 可知,与 CK 相比,三种处理组的地上干物质量、植被盖度、植被密度均显著提高($P<0.05$)。其中,NF,BC 和 NB 的地上干物质量分别较 CK 提升了 375.5%,187.9% 和 155.3%,且 NF 处理显著高于 BC 和 NB 处理。此外,BC 和 NB 处理显著提高了地表结皮盖度($P<0.05$)。从植被特征来看,三种处理均提高了禾本科牧草的高度,但对其密度的影响不显著,相反,各处理均显著增加了杂草的密度($P<0.05$)。从植被盖度看来,除 BC 处理在经历一个生长季后降低禾本科牧草的盖度外,三种处理均提升了杂草和禾本科牧草的盖度(图 2)。

2.2 不同处理对草地土壤性质的影响

由表 3 可知,各处理对土壤物理性质的影响存在差异。其中,NF 处理的效果最为显著,其土壤含水率较 CK 提升 75.6%。然而,BC 与 NB 处理对土壤含水率及容重无显著影响;与 CK 相比,仅 BC 处理显著降低了土壤 pH($P<0.05$)。

表 1 生长季后不同处理草地主要物种

Table 1 Principal grass species in grasslands under different treatments after the growing season

处理 Treatments	主要草种 Major grass species
CK	针茅(<i>Stipa capillata</i> L.)、青藏藁草(<i>Carex moorcroftii</i> Falc. ex Boott)、阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i> Willd.)、多裂委陵菜(<i>Potentilla multifida</i> L.)、冷蒿(<i>Artemisia frigida</i> Willd.)、灰绿碱蓬(<i>Suaeda glauca</i> (Bunge) Bunge)
NF	冷地早熟禾(<i>Poa crymophila</i> Keng)、针茅(<i>Stipa capillata</i> L.)、青藏藁草(<i>Carex moorcroftii</i> Falc. ex Boott)、阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i> Willd.)、山莓草(<i>Sibbaldia procumbens</i> L.)、多裂委陵菜(<i>Potentilla multifida</i> L.)、灰绿碱蓬(<i>Suaeda glauca</i> (Bunge) Bunge)、独行菜(<i>Lepidium apetalum</i> Willd.)、灰绿藜(<i>Oxybasis glauca</i> (L.) S. Fuentes, Uotila & Borsch)
BC	冷地早熟禾(<i>Poa crymophila</i> Keng)、针茅(<i>Stipa capillata</i> L.)、青藏藁草(<i>Carex moorcroftii</i> Falc. ex Boott)、斜茎黄芪(<i>Astragalus laxmannii</i> Jacq.)、白花枝子花(<i>Dracocephalum heterophyllum</i> Benth.)、阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i> Willd.)、多裂委陵菜(<i>Potentilla multifida</i> L.)、独行菜(<i>Lepidium apetalum</i> Willd.)、灰绿藜(<i>Oxybasis glauca</i> (L.) S. Fuentes, Uotila & Borsch)
NB	冷地早熟禾(<i>Poa crymophila</i> Keng)、扁穗冰草(<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn.)、针茅(<i>Stipa capillata</i> L.)、青藏藁草(<i>Carex moorcroftii</i> Falc. ex Boott)、阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i> Willd.)、山莓草(<i>Sibbaldia procumbens</i> L.)、灰绿碱蓬(<i>Suaeda glauca</i> (Bunge) Bunge)、独行菜(<i>Lepidium apetalum</i> Willd.)、灰绿藜(<i>Oxybasis glauca</i> (L.) S. Fuentes, Uotila & Borsch)

注:CK(Control):无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的处理组;NB(Non-woven fabric and biocrust)覆盖无纺布并添加苔藓结皮的综合处理组

Note:CK(Control): no-treatment control group; NF(Non-woven fabric): treatment with only non-woven fabric covering; BC(Biocrust): treatment with only moss crust addition; NB(Non-woven fabric and biocrust): combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

由表 4 可知,相较于 CK 组,各处理对结皮层土壤的全磷提升效果显著($P<0.05$)。即使未达显著水平,但各处理组在结皮层和浅层土壤中的全钾含

量相较于 CK 组均呈现一致的下降趋势。BC 组在提升土壤养分方面具有显著效果,其结皮层土壤有机质和全氮含量分别较 CK 提升 20.8% 和 13.1%。

表 2 不同处理草地的植被和结皮特征

Table 2 Vegetation characteristics and biocrust properties of grasslands under different treatments

处理 Treatments	地上干物质量 Aboveground dry biomass, AB/(g·m ⁻²)	植被密度 Vegetation density, VD/ (plant·m ⁻²)	植被盖度 Vegetation coverage, VC/%	植被高度 Vegetation height, VH/cm	结皮盖度 Biocrust coverage, BC/%	优势度指数 Simpson index	香农-威纳指数 Shannon-Wiener index
CK	24.8±5.61 ^c	190.9±20.39 ^c	38.25±7.93 ^c	5.19±1.32 ^a	2.25±2.22 ^b	0.71±0.04 ^b	1.36±0.2 ^b
NF	117.9±25.43 ^a	582±39.53 ^a	79.42±10.45 ^a	6.09±0.38 ^a	8±2.71 ^b	0.77±0.06 ^{ab}	1.63±0.25 ^{ab}
BC	71.4±38.05 ^b	525±70.98 ^a	56.25±9.91 ^b	7.64±2.38 ^a	21.68±6.07 ^a	0.83±0.03 ^a	1.91±0.23 ^a
NB	63.3±17.09 ^b	376.9±28.11 ^b	85.67±4.64 ^a	6.32±1.21 ^a	18.33±6.13 ^a	0.75±0.05 ^{ab}	1.58±0.19 ^{ab}

注:表中同列不同小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$),下同。CK(Control):无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的综合处理组

Note: Different lowercase letters in the same column in the table mean significant difference at the 0.05 level, the same as below. CK (Control): no-treatment control group; NF (Non-woven fabric): treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust): treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust): combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

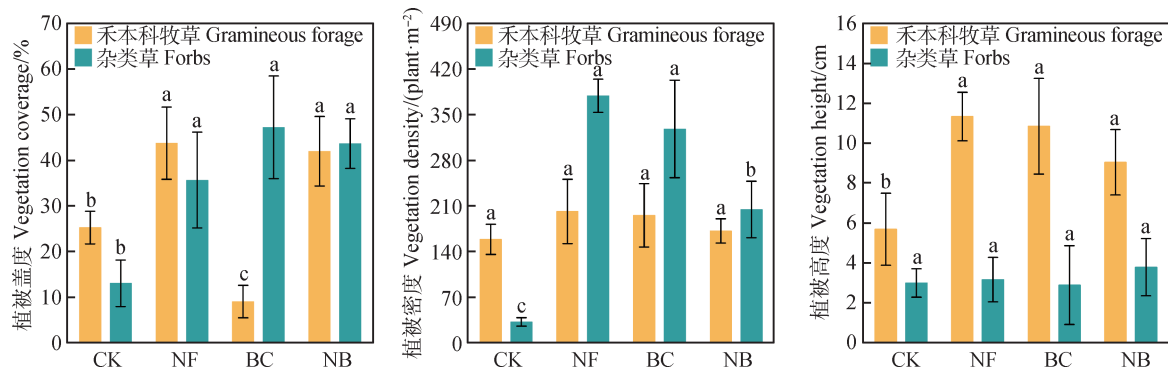


图 2 不同处理草地的植被盖度、密度和高度和结皮盖度

Fig. 2 Vegetation coverage, density, height, and biocrust coverage of grasslands under different treatments

注:柱状图标注的不同小写字母仅表示相同草类在不同处理之间存在差异。不同小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$),下同。CK(Control):无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的综合处理组

Note: The different lowercase letters in the bar chart annotations indicate differences among treatments within the same grass type only. Different lowercase letters in the chart mean significant difference at the 0.05 level, the same as below. CK (Control): no-treatment control group; NF (Non-woven fabric): treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust): treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust): combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

表 3 不同处理对草地土壤物理性质的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil physical properties of grasslands

处理 Treatments	pH	土壤含水率 Soil water content, SWC/%	土壤容重 Soil bulk density, SBD/(g·cm ⁻³)
CK	8.27±0.06 ^a	3.2±0.45 ^b	0.86±0.07 ^a
NF	8.24±0.07 ^{ab}	5.62±0.98 ^a	0.79±0.09 ^a
BC	8.14±0.07 ^b	3.31±0.54 ^b	0.84±0.07 ^a
NB	8.36±0.05 ^a	4.12±0.81 ^b	0.82±0.05 ^a

注:CK(Control),无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的综合处理组

Note: CK (Control), no-treatment control group; NF (Non-woven fabric), treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust), treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust), combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

NF 处理则显著改善了养分有效性,结皮层速效磷和速效钾含量分别较 CK 大幅提升 269% 和 18.3%。NB 处理对提高速效钾含量的效果最为显著,在结皮层和浅层分别较 CK 提升 30.6% 与 38.3%,提升幅度为所有处理中最高。与此同时,NB 处理在浅层土壤显著提高了土壤有机质水平,较 CK 提高 30.3%,增幅仅次于 BC 处理。

2.3 基于植被特征和土壤养分的相关性分析

对不同生态恢复处理下退化高寒草地的植物

与浅层土壤特征进行相关性分析。结果表明,CK 组(图 3a)的植被密度与地上干物质量和速效磷呈显著正相关($P<0.05$),植被盖度与全钾含量呈极显著正相关($P<0.01$);NF 组(图 3b)的速效磷和植被高度呈显著正相关($P<0.05$),速效钾与植被高度呈显著负相关($P<0.05$);BC 处理下(图 3c),地上干物质量与速效磷、有机质与植被盖度呈极显著正相关($P<0.01$);而 NB 处理下(图 3d),全钾与植被密度,有机质与速效钾均呈显著负相关($P<0.05$)。

表4 不同处理对土壤养分的影响

Table 4 Effects of different treatments on soil nutrient contents

土壤深度 Soil depth	处理 Treatments	全氮 Total nitrogen, TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus, TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium, TK/(g·kg ⁻¹)	有机质 Soil organic matter, SOM/(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium, AP/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus, AK/(mg·kg ⁻¹)
结皮层 (0~2 cm)	CK	3.2±0.24 ^b	0.46±0.02 ^b	9.82±0.73 ^a	45.71±2.9 ^c	212.30±24.28 ^c	4.22±0.86 ^b
	NF	3.25±0.19 ^{ab}	0.52±0.02 ^a	9.29±0.37 ^a	52.07±2.52 ^{ab}	251.16±4.21 ^{ab}	15.57±4.8 ^a
	BC	3.62±0.39 ^a	0.51±0.01 ^a	9.46±0.31 ^a	55.23±3.25 ^a	231.20±13.74 ^{bc}	18.68±5.49 ^a
	NB	3.19±0.16 ^{ab}	0.51±0.03 ^a	9.31±0.51 ^a	50.24±3.26 ^{bc}	277.27±21.37 ^a	14.7±5.01 ^a
浅层 (2~10 cm)	CK	2.71±0.13 ^a	0.45±0.04 ^a	10.67±0.66 ^a	35.18±1.63 ^c	105.36±19.43 ^b	4.14±0.5 ^a
	NF	2.89±0.24 ^a	0.49±0.02 ^a	10.41±1.44 ^a	40.73±1.90 ^b	122.03±23.15 ^{ab}	5.23±2.31 ^a
	BC	3.00±0.41 ^a	0.53±0.03 ^a	9.28±0.33 ^a	49.73±0.89 ^a	135.38±12.97 ^{ab}	6.78±2.57 ^a
	NB	2.84±0.15 ^a	0.47±0.02 ^a	8.88±0.76 ^a	45.84±3.75 ^a	145.76±19.00 ^a	6.44±0.77 ^a

注:CK(Control),无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的处理组;NB(Non-woven fabric and biocrust)覆盖无纺布并添加苔藓结皮的综合处理组

Note: CK (Control), no-treatment control group; NF (Non-woven fabric): treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust): treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust): combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

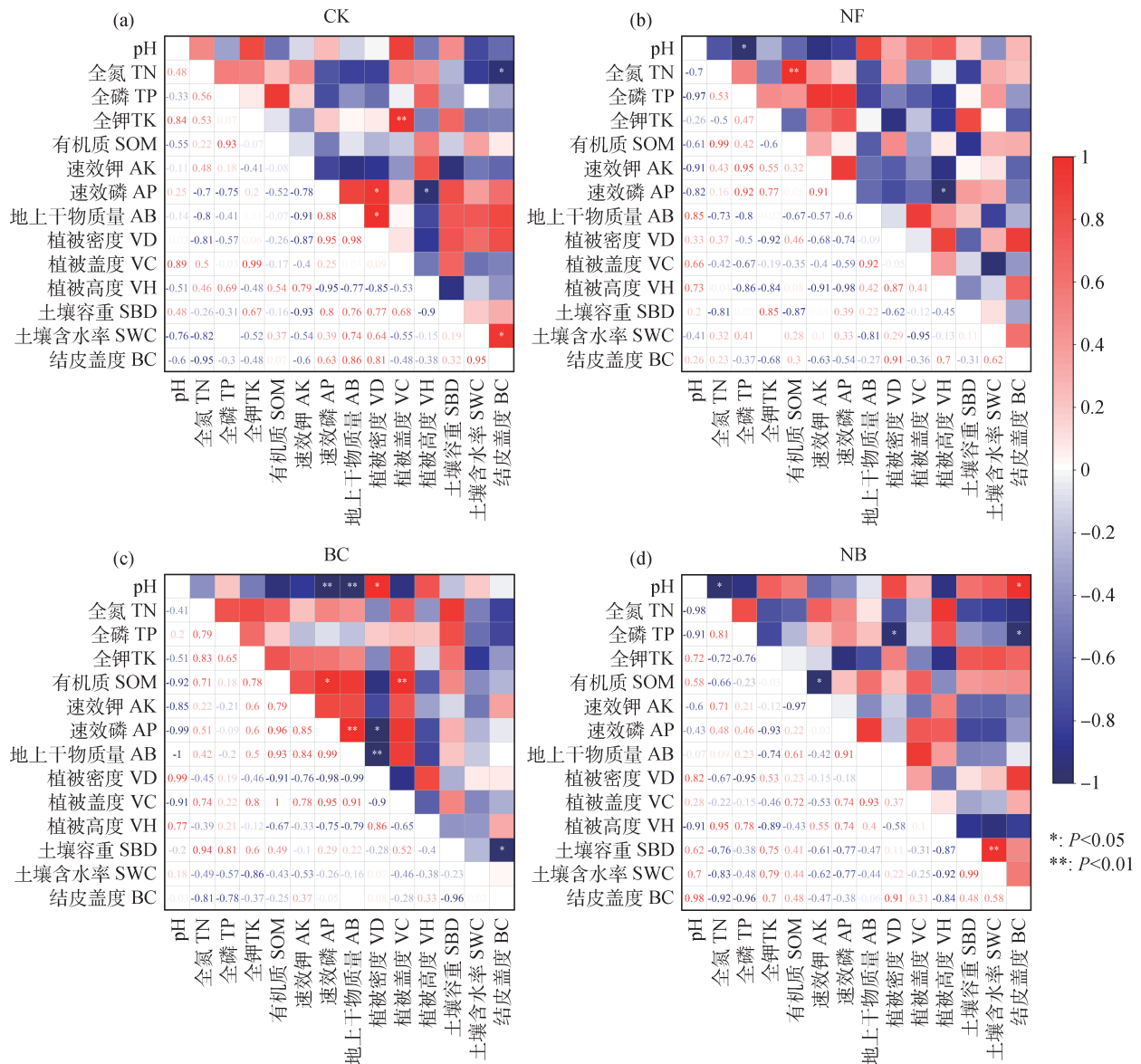


图3 不同处理草地植被、土壤性质的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between vegetation and soil properties of grasslands under different treatments

注:CK(Control),无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的处理组;NB(Non-woven fabric and biocrust)覆盖无纺布并添加苔藓结皮的综合处理组

Note: CK (Control), no-treatment control group; NF (Non-woven fabric), treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust): treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust): combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

2.4 不同处理对土壤侵蚀的影响

各个处理下的退化草地的地上植被都得到了不同程度的恢复(图4),丰富的地上植被可以起到很好的防风抗蚀效果,同时还可以拦截地表径流,减少水土流失。由土壤侵蚀模数数据可知(图5),各处理均显著降低了土壤侵蚀,其中NB组的抗侵蚀效果最好,其土壤侵蚀模数较CK组降低了83.1%。BC组虽然抗蚀效果低于无纺布,但是土壤侵蚀模数较CK也降低64.6%,这表现出生物结皮固结土壤颗粒的生态功能。两种处理均可以抵抗高原地区风蚀和水蚀,维持土壤稳定。

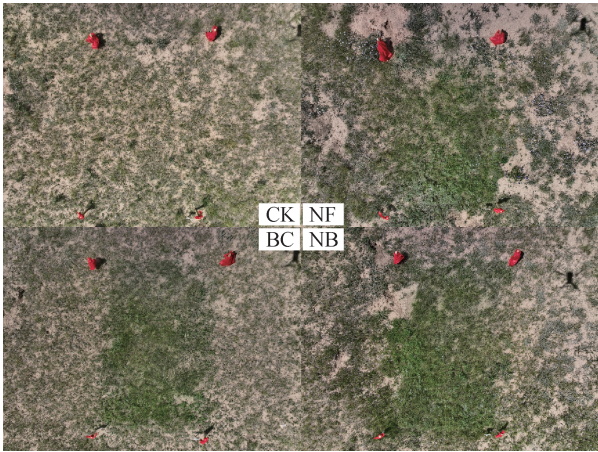


图4 不同处理退化草地恢复样图

Fig. 4 Sample images of restored grassland under different treatments

注:CK(Control),无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的处理组;NB(Non-woven fabric and biocrust)覆盖无纺布并添加苔藓结皮的综合处理组
Note: CK (Control), no-treatment control group; NF (Non-woven fabric), treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust), treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust), combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

3 讨论

3.1 不同处理对植物群落结构和土壤物理性质的影响

从草地植物生产力和群落结构来看,各项恢复措施均显著提升了草地生态系统的关键指标。其中NF处理在干物质质量和植被密度上均表现为最高值,且显著高于CK组。这表明无纺布覆盖对于快速提高植被生物量有着显著的效果^[30],这与郑建宗等^[31]的研究结果相似,即无纺布可能给予种子良好的发育条件,避免坡地水土流失冲刷种子。而

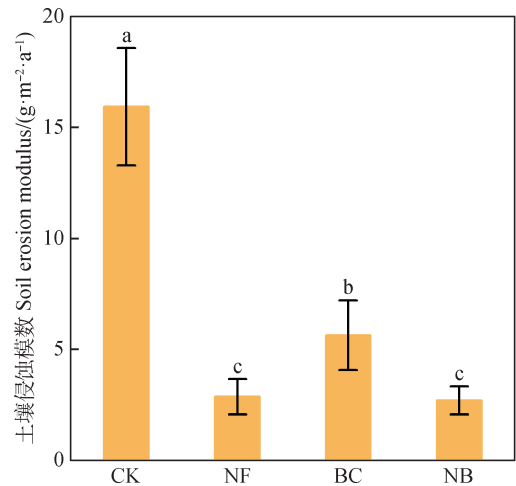


图5 不同处理草地的土壤侵蚀模数

Fig. 5 Soil erosion modulus of grasslands under different treatments

注:CK(Control),无处理对照组;NF(Non-woven fabric)仅覆盖无纺布的处理组;BC(Biocrust)仅添加苔藓结皮的处理组;NB(Non-woven fabric and biocrust)覆盖无纺布并添加苔藓结皮的综合处理组
Note: CK (Control), no-treatment control group; NF (Non-woven fabric), treatment with only non-woven fabric covering; BC (Biocrust), treatment with only moss crust addition; NB (Non-woven fabric and biocrust), combined treatment with non-woven fabric covering and moss crust addition

土壤含水率的提升(表3)也从侧面印证了其对于地上干物质质量的显著提升可能依赖于良好的保温保湿性能;但张玉芳等^[32]在无纺布覆盖后并未发现明显的增温增湿效果,这可能与实验开展地区和无纺织材料差异有关。作为评估退化生态系统恢复进程的重要标志,生物结皮的作用也不可忽视。添加苔藓结皮的处理(BC和NB)能有效促进地表生物结皮的快速形成。结皮可以在短期内促进土壤水分下渗^[33]、抑制蒸发^[34],以提升土壤含水率。但是结皮添加却没有出现明显的土壤结构改良,出现该现象的原因可能在于生物结皮通过菌丝和分泌物粘合土壤需要一定的时间^[35],而本试验在结皮定殖后仅历经数月,因此无法观察到明显的变化。此外值得注意的是,BC组在一个生长季节后出现了最高的植物多样性和均匀度(Shannon-Wiener指数),这表现了生物结皮对原生建群种的良好恢复效果,这可能是由于结皮为原生植被提供了异质性生境^[36],这也凸显了其在促进群落结构正向演替方面的独特生态功能。

3.2 不同处理对土壤养分的影响

从土壤养分状况来看,三种处理通过不同作用

机制对高寒草地养分库、有效性及土壤深度分布产生了差异化影响。苔藓结皮可以通过其生物固氮作用^[37]和凋落物分解功能^[38]持续扩充土壤基础养分库,对土壤进行长期改良。这与本研究结论一致,BC组显著提升了结皮层土壤养分,其有机质和全氮含量分别较CK组提升20.8%和13.1%,该过程表明,苔藓结皮的添加有效扩充了土壤养分库,形成了一种长期改良土壤的策略。与之不同的是,NF处理显著优化了养分有效性,其结皮层速效磷和速效钾含量分别提升269%和18.3%,这得益于无纺布营造的温度、湿度和微环境。有研究显示,无纺布覆盖可以提升数周内的土壤日最高和最低温度^[39],这种变化驱动了微生物的有机磷矿化过程^[40],进而提升土壤速效养分含量。而NB处理则展现出显著的协同增效效应,NB组对速效钾的提升为所有组最高,同时在10 cm的土壤深度内维持了较高的有机质水平,这与杨军刚等^[41]的结论相似。说明物理覆盖减少了生物结皮定殖期间环境的扰动,并且结皮的发育促进了有机质向土壤深层迁移^[42]。即形成了一种在提升养分有效性与促进深层碳汇的协同效应。

3.3 不同处理下草地的生态恢复效应和抗侵蚀效果

青藏高原气候环境恶劣,强风和降水往往导致植被盖度较低的退化草地水土流失严重,而这又加剧了植被修复的难度,因此生态恢复需依赖人工干预^[43,44]。有研究显示,随着侵蚀强度的升高,地上生物量表现为先下降后上升,而植被盖度和物种丰富度持续下降^[45],这与本研究的结论一致。从单独的处理来看,NF组的土壤侵蚀模数显著低于BC组,这可能是因为无纺布的直接干预更具时效性优势,其覆盖可以快速控制侵蚀并改善微环境,适用于修复初期的紧急防护,而生物结皮需要较长的定殖时间^[46],抗蚀效果显现较慢。在本研究中,综合处理(NB)效果最优,土壤侵蚀模数较CK组降低83.1%,这得益于无纺布与生物结皮的协同作用:无纺布(NF)通过快速提升植被盖度(79.42%)和生物量($117.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)实现即时物理防护;而生物结皮(BC)处理虽植被指标较低,但其结皮盖度达21.68%,仍使土壤侵蚀模数降低64.6%,表明在植被重建困难时,苔藓结皮对表层土壤的稳定功能可以成为有效的抗侵蚀策略^[47]。

4 结论

退化高寒草地的生态修复需突破传统技术局限。本研究表明,无纺布覆盖与苔藓结皮添加通过不同机制形成功能互补:无纺布快速提升植被盖度,发挥初期物理防护;苔藓结皮则通过生物固氮与有机质积累持续改良土壤。二者耦合产生显著协同效应:无纺布的物理庇护为结皮定殖创造稳定生境,结皮的发育促进有机质向深层迁移,在提升养分有效性与增强抗蚀性方面表现最优,土壤侵蚀模数较对照降低83.1%。这一发现揭示了物理覆盖快速控蚀与生物结皮长效改良的协同修复机制,为青藏高原退化草地治理提供了兼具时效性与可持续性的优化方案。

参考文献

- [1] 胡国铮,高清竹,干珠扎布,等. 气候变化对高寒草地生态系统功能的影响与模拟[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2022:162
HUG Z, GAO Q Z, GAN Z Z, et al. Impacts of climate change on alpine grassland ecosystem functions and modeling [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2022: 162
- [2] 中国自然资源学会. 资源科学学科发展报告 2016-2017[M]. 北京:中国科学技术出版社,2018:207
CHINA SOCIETY OF NATURAL RESOURCES. Report on the discipline development of resource science 2016-2017 [M]. Beijing: Science Press, 2018: 207
- [3] 石明明,王喆,周秉荣,等. 青藏高原草地退化特征及其与气候因子的关系[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3271-3278
SHI M M, WANG Z, ZHOU B R, et al. Characteristics of grassland degradation and its relationship with climate factors on Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3271-3278
- [4] 杜帛洋,郭永刚,关法春,等. 西藏高寒草地退化现状与修复途径[J]. 特种经济动植物,2023,26(7):185-188
DU B Y, GUO Y G, GUAN F C, et al. Degradation status and restoration pathways of alpine grasslands in Tibet [J]. Special Economic Animals and Plants, 2023, 26(7): 185-188
- [5] 王笛,李达,孙萍萍,等. 退化草地生态修复研究现状及其存在的问题[J]. 农业与技术,2025,45(9):102-105
WANG D, SUN D, SUN P P, et al. Current status and existing problems in the ecological restoration of degraded grasslands [J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(9): 102-105
- [6] 杨龙,颜安,谢开云,等. 施肥和镇压对免耕补播草地群落特征及多样性的影响[J]. 草地学报,2026,34(1):287-300
YANG L, YAN A, XIE K Y, et al. Effects of fertilization and compaction on the community characteristics and diversity of no-till reseeding grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1): 287-300
- [7] 常涛,张中华,马丽,等. 青藏高原退化草地恢复措施评价[J]. 青海环境,2022,32(2):63-66,75

- CHANG T, ZHANG Z H, MA L, et al. Evaluation of restoration measures for degraded grassland on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2022, 32(2): 63-66,75
- [8] 甄子云, 赵洋, 姜群鸥, 等. 野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 153-161
- ZHEN Z Y, ZHAO Y, JIANG Q O, et al. Field simulation of runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 153-161
- [9] 贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 66-80
- HE J S, LIU Z P, YAO T, et al. Analysis of the main constraints and restoration techniques of degraded grassland on the Tibetan Plateau [J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 66-80
- [10] 刘浩然, 胡江军, 王文武, 等. 高寒草甸退化: 驱动机制、修复技术与可持续管理[J]. *四川林业科技*, 2025, 46(4): 18-28
- LIU H R, HU J J, WANG W W, et al. Degradation of alpine meadow: driving mechanism, restoration technology, and sustainable management [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2025, 46(4): 18-28
- [11] ATALIE D, ABTEW M A, ZHAO L, et al. Recent advances in bio-based nonwoven materials: sustainable production, applications, and circular economy [J]. *Journal of Natural Fibers*, 2025, 22(1): 2565661
- [12] 陈白洁, 王丰毅, 周华坤, 等. 不同材料无纺布覆盖对高寒生态修复草种生长特性的影响[J]. *草业科学*, 2021, 38(5): 848-858
- CHEN B J, WANG F Y, ZHOU H K, et al. Influence of mulching of different non-woven materials on the growth of alpine ecological restoration grasses [J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(5): 848-858
- [13] 景媛媛, 贺翔, 徐长林, 等. 覆膜种植方式对东祁连山区苜蓿草地土壤温度和水分的影響[J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 321-329
- JING Y Y, HE X, XU C L, et al. Effects of different film-mulching planting patterns on soil temperature and water moisture of alfalfa grassland in Eastern Qilian Mountain Area [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 321-329
- [14] 周宏才. 寒旱区不同覆盖措施对草坪草萌芽和生长的影响[J]. *青海农林科技*, 2022(4): 87-91
- ZHOU H C. Effects of different coverage measures on germination and growth of lawn grass in cold and dry area [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2022(4): 87-91
- [15] 王学朋, 王乾鑫, 赵鹏鹏, 等. 高寒区铁路工程迹地恢复植被快速建植技术研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2025, 45(1): 43-46,106
- WANG X P, WANG Q X, ZHAO P P, et al. Research on rapid vegetation establishment techniques for railway engineering disturbance sites in alpine regions [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2025, 45(1): 43-46,106
- [16] WANG X, ZHANG K M, LI J, et al. Seasonal soil water dynamics under different tree plants and mulching treatments in the loess hilly region of China [J]. *Ecological Engineering*, 2024, 207: 107350
- [17] WEBER B, BELNAP J, BÜDEL B, et al. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community [J]. *Biological Reviews*, 2022, 97(5): 1768-1785
- [18] ZHANG W X, JU M C, WU S F, et al. Interactive effects of carbon and nitrogen fixation in two biocrust types in the Mu Us Sandland [J]. *Catena*, 2025, 258: 109305
- [19] LI X J, GUO Q, JIA R L, et al. Revegetation drives the accrual and stabilization of organic carbon in biocrusts and subsoils in the Tengger Desert, north China [J]. *Geoderma*, 2025, 460: 117437
- [20] 马录花, 孟宪超, 王贵强, 等. 藓类结皮接种对三江源高寒草甸土壤性状和微生物的影响[J]. *植物生态学报*, 2025, 49(1): 173-188
- MA L H, MENG X C, WANG G Q, et al. Effects of moss crust inoculation on soil properties and microbial communities in alpine meadow in Sanjiangyuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(1): 173-188
- [21] 朱恩慈, 刘涛, 孙新迪, 等. 大庆龙凤湿地生物结皮对土壤理化性质及微生物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(15): 7645-7659
- ZHU E C, LIU T, SUN X D, et al. Effects of biocrusts on physicochemical properties and microbial diversity of soil in Daling Longfeng Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(15): 7645-7659
- [22] WU J L, ZHA R B, CHEN S T, et al. Biocrust effects on soil stability and hydrodynamic erosion in southern China's red soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 391: 126458
- [23] SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Towards moss biocrust effects on surface soil water holding capacity: Soil water retention curve analysis and modeling [J]. *Geoderma*, 2021, 399: 115120
- [24] WANG Y F, LV W W, XUE K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668-683
- [25] 常涛, 李珊, 李以康, 等. 混播人工草地建植初期对黑土滩植被和土壤的恢复效果[J]. *草地学报*, 2023, 31(5): 1546-1555
- CHANG T, LI S, LI Y K, et al. Restoration effects of mixed sowing artificial grassland on vegetation and soil of black soil land at the initial planting stage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1546-1555
- [26] 鞠孟辰, 卜崇峰, 王清玄, 等. 藻类与微生物添加对高陡边坡生物结皮人工恢复的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 124-128,135
- JU M C, BU C F, WANG Q X, et al. Effects of algae and microorganism addition on restoration of biocrusts on steep slope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(6): 124-128,135
- [27] 苏大学. 中国草地资源调查与地图编制[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013: 58
- SU D X. Survey and mapping of the rangeland resources of China [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013: 58

- [28] 张文军. 生态学研究方法[M]. 广州: 中山大学出版社, 2007: 150-152
ZHANG W J. Methodology in ecological research [M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2007: 150-152
- [29] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范[M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2006: 9, 17, 36-67
DU S, GAO X Z. Technical specification for soil analysis [M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 9, 17, 36-67
- [30] ADAMCZEWSKA-SOWINSKA K, SOWINSKI J. Reaction of sweet maize to the use of polyethylene film and polypropylene non-woven fabric in the initial growth phase [J]. *Agronomy-Basel*, 2020, 10(1): 141
- [31] 郑建宗, 吕嘉, 宗英, 等. “黑土滩”植被修复中无纺布覆盖模式对牧草种子出苗影响的探讨[J]. *青海草业*, 2021, 30(4): 30-33
ZHENG J Z, LV J, ZONG Y, et al. Discussion on the influence “black soil type” vegetation restoration non-woven cloth cover pattern for grass seeds seedlings [J]. *Qinghai Prataculture*, 2021, 30(4): 30-33
- [32] 张玉芳, 徐有学, 唐俊伟, 等. 播量和施肥及无纺布覆盖对高寒矿区植被恢复和土壤温湿度的影响[J]. *青海草业*, 2022, 31(2): 2-6
ZHANG Y F, XU Y X, TANG J W, et al. Effects of sowing, fertilization and non-woven covering on vegetation restoration and soil temperature and humidity in alpine coalmine areas [J]. *Qinghai Prataculture*, 2022, 31(2): 2-6
- [33] 李雨晨, 平原, 澹腾辉, 等. 红壤丘陵区不同盖度生物结皮对水分入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 71-77
LI Y C, PING Y, DAN T H, et al. Effects of biocrust with different coverage on water infiltration in red soil hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 71-77
- [34] 岳艳鹏, 成龙, 孙迎涛, 等. 毛乌素沙地生物结皮覆盖区土壤水分收支变化特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1861-1870
YUE Y P, CHENG L, SUN Y T, et al. Changes of soil water budget in the area covered by biological soil crusts in Mu Us sandy land, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1861-1870
- [35] XIAO B, MA S, HU K L, et al. Moss biocrusts regulate surface soil thermal properties and generate buffering effects on soil temperature dynamics in dryland ecosystem [J]. *Geoderma*, 2019, 351: 9-24
- [36] SLATE M L, CALLAWAY R M, PEARSON D E, et al. Life in interstitial space: Biocrusts inhibit exotic but not native plant establishment in semi-arid grasslands [J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(3): 1317-1327
- [37] ZHENG J L, ZHANG D C, LI H, et al. Rhizoid-associated cyanobacteria are the main contributors to biological nitrogen fixation in restored moss crust [J]. *Rhizosphere*, 2023, 28: 100816
- [38] CHUCKRAN P F, REIBOLD R, THROOP H L, et al. Multiple mechanisms determine the effect of warming on plant litter decomposition in a dryland [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 145: 107799
- [39] 李旭斌, 赵秀杰, 吕廷波, 等. 园艺地布覆盖宽度对枣园土壤温度、水分、生长与产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2025, 62(6): 1431-1441
LI X B, ZHAO X J, LV T B, et al. Effects of different widths of horticultural ground cover on soil temperature, moisture and growth in jujube orchards [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2025, 62(6): 1431-1441
- [40] MORI T. A simple dynamic equilibrium model shows that high phosphatase activity in tropical forest soils could be explained by rapid microbial turnover [J]. *Pedobiologia*, 2023, 99-100: 150890
- [41] 杨军刚, 张玲卫, 郭星, 等. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮下土壤有机碳垂直分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(7): 2946-2954
YANG J G, ZHANG L W, GUO X, et al. Vertical distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon under biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 2946-2954
- [42] GAO S Q, YE X H, CHU Y, et al. Effects of biological soil crusts on profile distribution of soil water, organic carbon and total nitrogen in Mu Us Sandland, China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(4): 279-284
- [43] LYU X, LI X B, DANG D L, et al. A perspective on the impact of grassland degradation on ecosystem services for the purpose of sustainable management [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5120
- [44] 越大林, 李国荣, 李进芳, 等. 黄河源高寒退化草地典型鼠丘土壤风蚀及养分流失规律研究[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(4): 603-617
YUE D L, LI G R, LI J F, et al. Soil wind erosion and nutrient loss in typical rodent mounds in a degraded alpine grassland in the Yellow River source zone [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(4): 603-617
- [45] 严双, 夏菲, 魏巍, 等. 高寒草甸不同侵蚀样地植物多样性的差异及其关键影响因子[J]. *草业学报*, 2025, 34(6): 1-13
YAN S, XIA F, WEI W, et al. Differences along an erosion gradient in alpine meadow plant community diversity and factors influencing diversity [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 1-13
- [46] 陆钰, 刘之葵, 罗玉兰, 等. 生物炭结合藓类植物对土壤稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(6): 247-255
LU Y, LIU Z K, LUO Y L, et al. Influence of biochar combined with moss plants on soil stability [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(6): 247-255
- [47] 孟宪超, 王贵强, 李鸿雁, 等. 人工草地苔藓结皮生长增强了土壤细菌网络复杂性对生态系统多功能性的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(7): 2140-2149
MENG X C, WANG G Q, LI H Y, et al. The growth of moss crust enhances the influence of soil bacterial network complexity on ecosystem multifunctionality in artificial grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(7): 2140-2149