

DOI: 10.20103/j.stxb.202407181692

黄飞, 刘静, 王博, 李志刚. 灌枝覆盖对宁夏荒漠草地土壤呼吸的影响. 生态学报, 2025, 45(7): 3218–3228.

Huang F, Liu J, Wang B, Li Z G. The impacts of shrub branch covering on soil respiration in a desert steppe of Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3218–3228.

灌枝覆盖对宁夏荒漠草地土壤呼吸的影响

黄 飞^{1,2}, 刘 静^{1,2}, 王 博^{1,2}, 李志刚^{1,2,*}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 盐池北部荒漠草原宁夏回族自治区野外科学观测研究站, 银川 750021

摘要: 锦鸡儿属 (*Caragana*) 灌木是我国北方地区广泛应用于退化荒漠草地恢复的常见植物, 然而这些灌木需要定期的平茬以促进其更新, 同时平茬产生的大量灌枝枝条为草地恢复提供了丰富的资源。因此, 以宁夏盐池县荒漠草地为研究对象, 以平茬后柠条 (*Caragana korshinskii*) 灌木枝条为覆盖材料, 设置了无枝条覆盖 (CK)、短枝条覆盖 (S, 枝条长度 5—10 cm) 和长枝条覆盖 (L, 枝条长度 70—130 cm) 3 个处理, 以探讨覆盖对荒漠草地土壤呼吸的影响。结果表明, 与 CK 相比, 2 种覆盖措施均可以显著降低土壤温度, 且 S 处理增加土壤含水率 0.05%—3.31%, L 增加土壤含水率 0.04%—1.89%。此外, 2 种覆盖处理均显著提高了纤维素酶、 β -1,4-木糖苷酶、脲酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和 β -1,4-葡萄糖苷酶活性, 增加了土壤有机碳含量和速效磷含量, 提高了地上植被生物量、高度和盖度, 同时促进了土壤呼吸, 且 S 和 L 处理土壤累积呼吸量高于 CK 56.0% 和 29.0%。相关分析结果表明, 土壤水分、土壤酶活性、土壤养分及植物生长均不同程度影响了草地呼吸, 表明覆盖可以通过改善土壤水分促进植物碳的输入, 同时通过促进酶活性加速对有机物的分解和养分的输入, 并最终促进了土壤的呼吸速率。本研究表明, 荒漠草地平茬的灌木枝条可以促进土壤碳循环, 利用退化草地的生态恢复, 为平茬灌木利用提供了途径, 同时也为灌丛化草地管理提供了借鉴。

关键词: 灌枝覆盖; 荒漠草地; 土壤呼吸; 生态恢复

The impacts of shrub branch covering on soil respiration in a desert steppe of Ningxia

HUANG Fei^{1,2}, LIU Jing^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, LI Zhigang^{1,2,*}

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Northern Yanchi Desert Grassland Observation and Research Station of Ningxia, Yinchuan 750021, China

Abstract: *Caragana* are common shrubs that are extensively planted for the restoration of degraded desert steppes in northern China. However, these shrubs require regular stumping to encourage their regeneration. As a result, lots of branches are produced, and those branches may provide abundant resources for restoration of degraded desert steppe. Thus, this study utilized the stumped branches as mulch materials, establishing three treatments: no branch mulch (CK), mulch with short branches (S, branches 5—10 cm in length), and mulch with long branches (L, branches 70—130 cm in length) to investigate the impact of branch mulching on soil respiration in the desert steppe of Yanchi County, Ningxia. The findings indicated that, in comparison to CK, both branch mulch treatments significantly lowered soil temperature and raised soil water content, with treatment S enhancing soil water content by 0.05%—3.31%, and treatment L by 0.04%—1.89%. In addition, both covered treatments significantly accelerated the activities of cellulase, β -1,4-xylosidase, urease, β -1,4-N-acetoglucosidase and β -1,4-glucosidase, increased contents of soil organic carbon and available phosphorus, enhanced

基金项目: 宁夏自然科学基金项目 (2022AAC05013); 宁夏重点研发项目 (2021BEG03010, 2021BEB04002)

收稿日期: 2024-07-18; **网络出版日期:** 2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizg001@sina.com

plant above-ground biomass, height, and coverage, and meanwhile promoted soil respiration. The soil cumulative respiration of treatments S and L was 56.0% and 29.0% higher than that of CK, respectively. The correlation analysis indicates that, the soil water, soil enzyme activity, soil nutrients, and plant growth influenced steppe respiration. Therefore, this study indicated that shrub branch covering promotes plant carbon input by improving soil water content, and then accelerates organic matter decomposition and nutrient input by promoting enzyme activity, and ultimately promotes soil respiration rate. To conclude, mulching with stumped shrub branches in desert steppe can enhance soil carbon cycling, which will be advantageous for the ecological rehabilitation of degraded steppes. This study provided a way for the utilization of stumped shrubs in grassland, and also provided a reference for the management of shrub encroached grasslands.

Key Words: shrub branch covering; desert grassland; soil respiration; ecological restoration

荒漠草地是我国北方草地的主要类型之一,同时也是脆弱的生态系统,易受到人类活动和气候变化的影响而发生退化^[1]。为防止荒漠草地的退化,国家和地方政府实施了一系列植被建设工程,其中主要的措施之一是种植耐旱抗风沙的灌木。以毛乌素沙地南缘的宁夏荒漠草地为例,该地区引入以柠条(*Caragana korshinskii*)为主的灌木进行草地恢复,使得柠条在草地的种植面积就达到了 23.96%^[2]。然而,柠条生长到一定年限以后,会出现木质化加剧、生长缓慢、干枯死亡等衰老现象^[3]。因此,平茬成为柠条更新的重要措施^[4],同时平茬也产生了大量的灌木枝条。此外,该地区大面积的柠条种植还引起了草地灌丛化,草地出现水分亏缺,草本植物数量下降等草地退化的现象^[5-6],因此去灌丛化已成为该地区草地恢复的必要措施之一,而此过程中亦会产生大量的灌枝枝条。值得注意的是,近年来 Li 等人^[7-8]的研究发现,林木枝条覆盖可以有效降低干旱半干旱地区土壤在高温时的土壤温度,抑制土壤蒸发,促进植物生长和土壤微生物活性,利于土壤碳的积累。Liu 等人^[9]的研究还表明,灌木枝条覆盖亦可以有效改善荒漠草地土壤水热条件,促进有机物分解和土壤碳积累。尽管如此,灌木枝条覆盖对荒漠草地土壤呼吸的相关研究还未见报道。

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节,也是生态系统中能量流动和物质循环的重要过程^[10]。土壤呼吸是微生物氧化有机物和根系产生的 CO₂由土层内部向地表扩散的过程,是表征土壤质量和土壤肥力的重要指标,也可部分反映土壤微生物活性、根系生物量、根系活性和土壤物质循环强度^[11-13]。土壤呼吸主要与生物效应相关,其实质是土壤微生物、土壤动物和植物根系呼吸的总和^[14]。土壤呼吸速率的提高可反映土壤微生物活性的增加及碳元素的输入^[15]。土壤呼吸速率的变化也与生态环境中植被类型相关^[16],同一区域内,物种丰富度高的生态系统具有较高的土壤呼吸,而土壤退化,植被稀少的生态系统的土壤呼吸偏低^[17]。因此,土壤呼吸高低在一定程度可表明生态系统的健康程度。

土壤温度和水分是影响土壤呼吸的关键因素^[18]。而前人的研究结果表明,不论秸秆覆盖还是林木枝条覆盖,均能有效降低土壤温度,改善土壤水分条件^[19-20]。因此,土壤水分条件的改善可能也会促进植物碳的输入及微生物活性的提高,进而促进土壤碳的循环。土壤呼吸作为评价生态系统碳循环的重要指标,可以直接反映灌木枝条覆盖下荒漠草地碳循环的状况,然而相关研究鲜见报道。因此,本研究以宁夏荒漠草地为研究对象,以草地大面积生长的柠条为覆盖材料,研究不同平茬长度的柠条枝条覆盖对草地土壤呼吸的影响及其机制,为荒漠草地恢复和可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于宁夏盐池县宁夏大学四墩子试验基地(37°04'—38°10' N, 106°30'—107°41' E),海拔 1380—1600 m。研究区常年干旱少雨,年均降水量为 250—350 mm,年均气温 8.1℃,极端最高温度 34.9℃,年蒸发量 2132mm。年无霜期 165 d,年日照时数 2863h,风沙天气较多平均风速 2.7 m/s。土壤类型土壤质地为砂质壤土,0—20 cm 土层下,土壤 pH 8.51—8.86,土壤有机碳 1.25—3.32 g/kg,土壤全氮 0.11—0.24 g/kg,土

壤全磷 1.17—1.88 g/kg。主要植被类型以荒漠草原为主,植物种类主要有沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等;此外,草地还分布有人工种植的旱生灌木柠条锦鸡儿。

1.2 样地布置

试验于 2020 年 10 月完成野外样地布置,此时草地植被地上部分基本全部枯萎。本试验采用完全随机设计,基于本研究团队前期试验^[21],试验共设置 3 个柠条覆盖处理:1) 无枝条覆盖(即对照 CK);2) 柠条短枝条覆盖(S),即利用割灌机从柠条灌丛顶部到基部分段依次切割,将灌木切割为长度为 5—10 cm 枝条进行覆盖,地表遮荫面积约为 80%;3) 柠条长枝条覆盖(L),即利用割灌机将柠条灌丛齐地平茬后进行覆盖,枝条长度为 70—130 cm,地表遮荫面积约为 60%。以上 2 种覆盖方式下的单位面积枝条覆盖质量基本一致。每个处理 4 次重复,试验小区面积为 5 m×5 m,小区间距 2 m。试验小区布置完毕后,在每个小区中预埋 1 个直径 20 cm,高度为 10 cm,露出地面高度 2—3 cm 的 PVC 管用于土壤呼吸的测定,PVC 管埋置于植物株丛旁边,其管内没有植物,在测定土壤呼吸的前一天,检查 PVC 管内是否有植物,若 PVC 管内有植物的则进行剪除处理。在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层深度分别各埋地温计 1 个,地温计精度为 0.1℃。样地采用围栏保护以防止大型动物对样地造成破坏。

1.3 指标测定

土壤温度、土壤水分和土壤呼吸测定日期分别为 2021 年和 2022 年的 4 月—10 月的每月 20 日测定,当天 14:00 利用地温计分别测定土壤 0—5 cm 和 5—10 cm 的温度。土壤水分使用直径为 2 cm 的小型土钻采集 0—10 cm 的土壤样本,采集的土壤立即密封在铝盒内,然后转移到实验室,在 105℃ 的烘箱中干燥至恒重。在干燥前后测量土壤重量,以确定土壤含水量。当天 10:00—14:00 利用 LI-8100 便携式土壤通量测量系统测定土壤呼吸速率。

在 2021 年和 2022 年的 8 月份采集每个试验小区的土壤,将土壤样品装入自封袋排完气体后,放入装有冰袋的保温箱内,尽快运至实验室。采回的新鲜土样,一部分自然阴干用于土壤的化学性质测定;另一部分储存在 4℃ 冰箱内,用于测定土壤胞外酶活性。

使用上海雷磁台式数显酸度计 PHSJ-4F 测定土壤(土壤:水=1:2.5,V/V)pH 值。土壤有机碳测定采用元素分析仪 vario MACRO cube 测定;土壤全氮利用凯氏定氮仪 KjelFlex K-360 采用半微量凯氏定氮法测定;土壤全磷利用紫外可见分光光度计 UV755B 采用钼锑抗比色法测定;土壤碱解氮通过在人工气候培养箱 HYR-400D4 培养后采用碱解扩散法测定;土壤速效磷利用紫外可见分光光度计 UV755B 采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定。以上土壤元素的测定参考鲍士旦法^[22]。

纤维素酶的活性由羧甲基纤维素酶降解产生的低分子量产物和糖来确定,用 690 nm 的吸光度测量。 β -1,4-木糖苷酶活性测定方法参考 Schinner^[23] 文献。在 690 nm 处测定对硝基苯酚释放量的吸光度,测定 β -1,4-葡萄糖苷酶活性为对硝基苯酚释放量^[24]。亮氨酸氨肽酶活性用 7-氨基-4-甲基香豆素荧光标记底物^[25]。 β -1,4-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性测定为对硝基苯酚释放量^[26]。脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定^[27]。胞外酶活性均采用多功能酶标仪 M200PRO 测定。

在植物生物量最大的 8 月采用一个边长为 1 m×1 m 的样框测定每个处理植被的高度和盖度,之后将样框内的植物齐地面剪下,同时将地面凋落物一并装入对应的信封之中,回到实验室内放入 105℃ 的烘箱中杀青 0.5 h,再以 65℃ 烘干 24 h 至恒重后测量其干重,以此计算地上生物量的大小。

1.4 数据分析

土壤累积呼吸量(SCR)参考以下公式计算^[28]

$$SCR = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 0.1584 \times 24 \right] \quad (1)$$

式中:SCR 为土壤累积呼吸量(g/m²); F_i 为第 i 次测定的土壤呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$);($t_{i+1}-t_i$) 为连续两次

测定间隔天数(d); n 为测定的次数; 0.1584×24 是将土壤呼吸数值单位 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 转换为 g/m^2 的系数。

所有数据采用 Microsoft Excel 365 进行数据整理,利用 SPSS 26.0 软件进行处理间土壤有机碳、土壤全氮、地上生物量、土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率的单因素方差分析。采用 Pearson 相关性分析和 Mantel 检验,分析土壤累积呼吸量与土壤温度、土壤水分、土壤养分、土壤酶活性和植被特征间的关系。

2 结果与分析

2.1 灌枝不同覆盖处理下草地土壤水热的变化

研究结果显示(图 1),不论 2021 年还是 2022 年,处理间 0—5 cm 及 5—10 cm 的土壤温度变化规律基本一致,即总体上均呈现出 CK>L>S 的趋势,且 2022 年 2 种覆盖措施下 0—5 cm 及 5—10 cm 的土壤平均温度均显著低于 CK($P<0.05$)。土壤水分变化规律与土壤温度相反(图 2),即不论 2021 年还是 2022 年,处理间土壤水分均呈现出 CK<L<S 的趋势,且 2 种覆盖措施下的平均土壤含水量均显著高于 CK($P<0.05$),同时 2021 年覆盖 S 平均土壤含水量显著高于覆盖 L($P<0.05$)。总体而言,与 CK 相比,S 处理增加土壤平均含水率 0.05%—3.31%,L 处理增加土壤平均含水率 0.04%—1.89%。

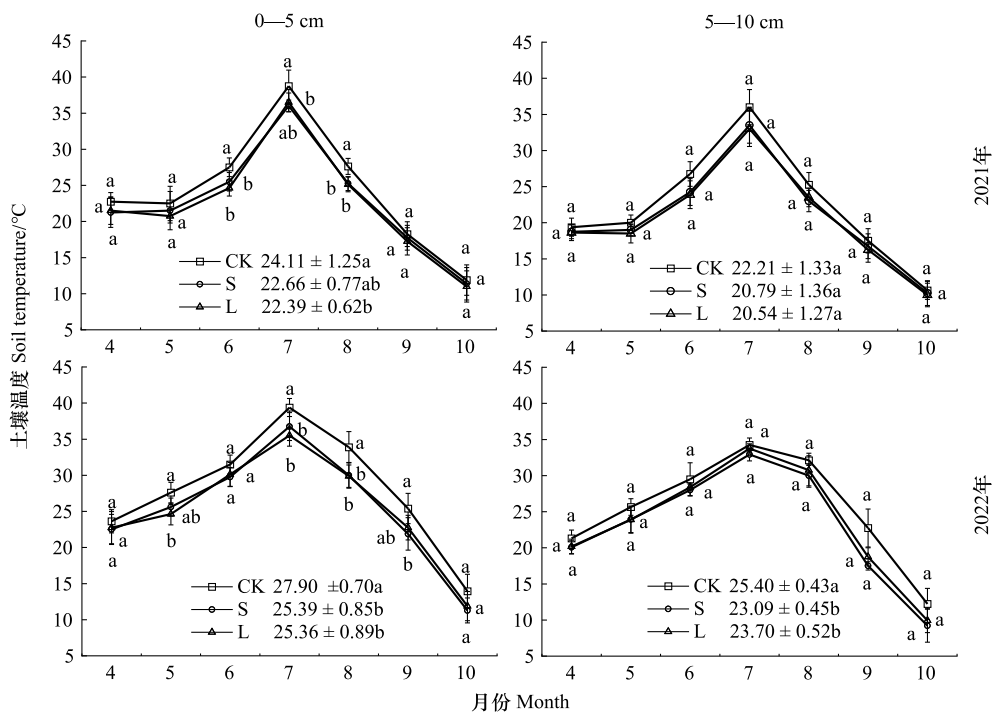


图 1 灌枝不同覆盖方式对土壤温度的影响

Fig.1 The effect of different shrub branch covered methods on soil temperature

图中 0—5 cm、5—10 cm 分别表示土层的深度,CK、S 和 L 分别代表对照、短枝条覆盖和长枝条覆盖,不同小写字母代表同一土层下不同灌枝覆盖处理间土壤温度存在显著差异($P<0.05$)

2.2 灌枝不同覆盖处理下草地土壤胞外酶活性的变化

图 3 可知,2021 年处理间土壤胞外酶活性变化规律与 2022 年类似,即 2 种覆盖处理均较 CK 显著提高了土壤纤维素酶、 β -1,4-木糖苷酶、脲酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和 β -1,4-葡萄糖苷酶活性($P<0.05$),但对亮氨酸氨基肽酶活性无显著影响($P>0.05$)。此外,2 种覆盖措施下的几种酶活性无显著差异($P>0.05$)。研究结果还显示,土壤 β -1,4-木糖苷酶、脲酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和 β -1,4-葡萄糖苷酶活性 2022 年比 2021 年高,而土壤纤维素酶活性 2022 年比 2021 年低。

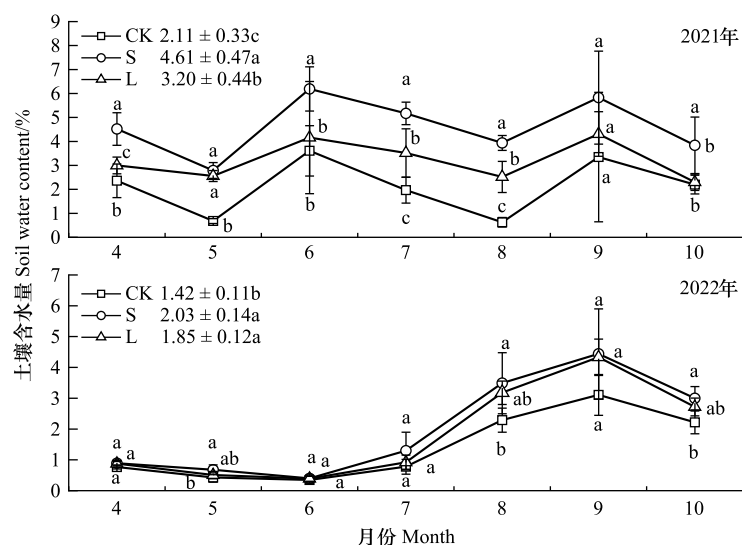


图2 灌枝不同覆盖方式对土壤含水量的影响

Fig.2 The effect of different shrub branch coverage methods on soil water content

CK、S 和 L 分别代表对照、短枝条覆盖和长枝条覆盖,不同小写字母代表在不同灌枝覆盖处理间土壤含水量存在显著差异 ($P < 0.05$)

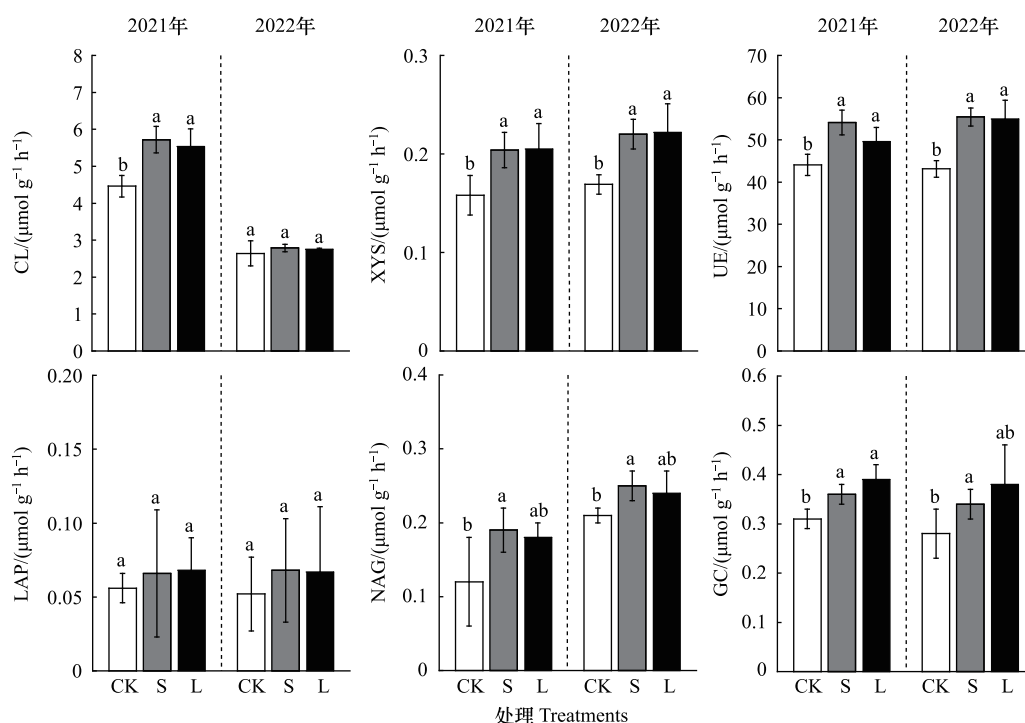


图3 灌枝不同覆盖方式对土壤胞外酶的影响

Fig.3 The effect of different shrub branch coverage methods on soil extracellular enzymes

CL:纤维素酶 Cellulase; XYS:β-1,4-木糖苷酶 β-1,4-xylosidase; UE:脲酶 Urease; LAP:亮氨酸氨基肽酶 Leucine aminopeptidase; NAG:β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β-1,4-N-acetylglucosaminidase; GC:β-1,4-葡萄糖苷酶 β-1,4-glucosidase; CK、S 和 L 分别代表对照、短枝条覆盖和长枝条覆盖,不同小写字母代表每一种酶在不同灌枝覆盖处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.3 灌枝不同覆盖处理下草地土壤养分含量的变化

2021 年与 2022 年的处理间土壤养分具有相似的变化规律(图 4),即总体而言,2 种覆盖处理较 CK 均增

加了土壤养分含量,且2种覆盖措施间除了2022年处理S的速效磷显著高于L外($P<0.05$),其他养分在S和L间的差异不显著($P>0.05$)此外,2022年土壤养分总体上呈现出高于2021年的趋势。

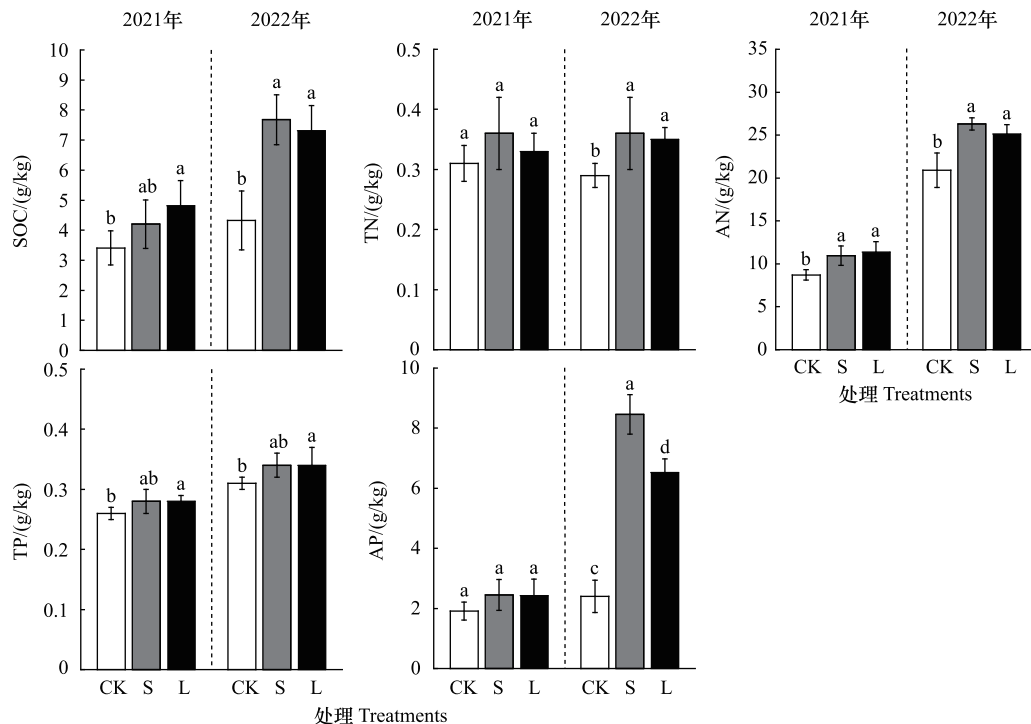


图4 灌枝不同覆盖方式对土壤养分的影响

Fig.4 The effect of different shrub branch coverage methods on soil nutrient

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; TN:土壤全氮 Soil total nitrogen, AN:土壤碱解氮 Soil available nitrogen; TP:土壤全磷 Soil total phosphorus; AP:土壤速效磷 Soil available phosphorus, CK、S和L分别代表对照、短枝条覆盖和长枝条覆盖,不同小写字母代表在不同灌枝覆盖处理间土壤有机碳、土壤全氮、土壤碱解氮、土壤全磷及土壤速效磷存在显著差异($P<0.05$)

2.4 灌枝不同覆盖处理下草地植被的变化

2021年处理间草地植被变化规律与2022年亦类似,即2种灌枝覆盖措施较CK显著增加植被群落地上生物量、高度和盖度(图5),但覆盖间差异不显著($P>0.05$)。

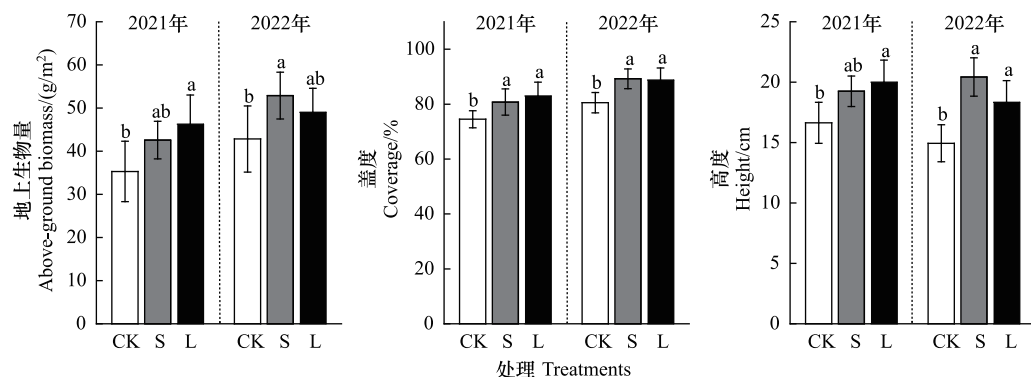


图5 灌枝不同覆盖方式对植被的影响

Fig.5 The effect of different shrub branch coverage methods on vegetation

CK、S和L分别代表对照、短枝条覆盖和长枝条覆盖,不同小写字母代表在不同灌枝覆盖处理间地上生物量、高度及盖度存在显著差异($P<0.05$)

2.5 灌枝覆盖处理下不同土壤呼吸的变化及其影响因子性分析

由图 6 可知,处理间土壤呼吸速率在 2021 年和 2022 年均呈现出 CK<L<S 的趋势,且 2 种覆盖处理下的平均土壤呼吸速率显著高于 CK ($P<0.05$),同时 2022 年处理 S 的平均土壤呼吸速率显著高于处理 L ($P<0.05$)。就年土壤累积呼吸量而言(图 6),2 种覆盖处理均显著高于 CK ($P<0.05$),同时 2022 年处理 S 亦显著高于处理 L ($P<0.05$)。

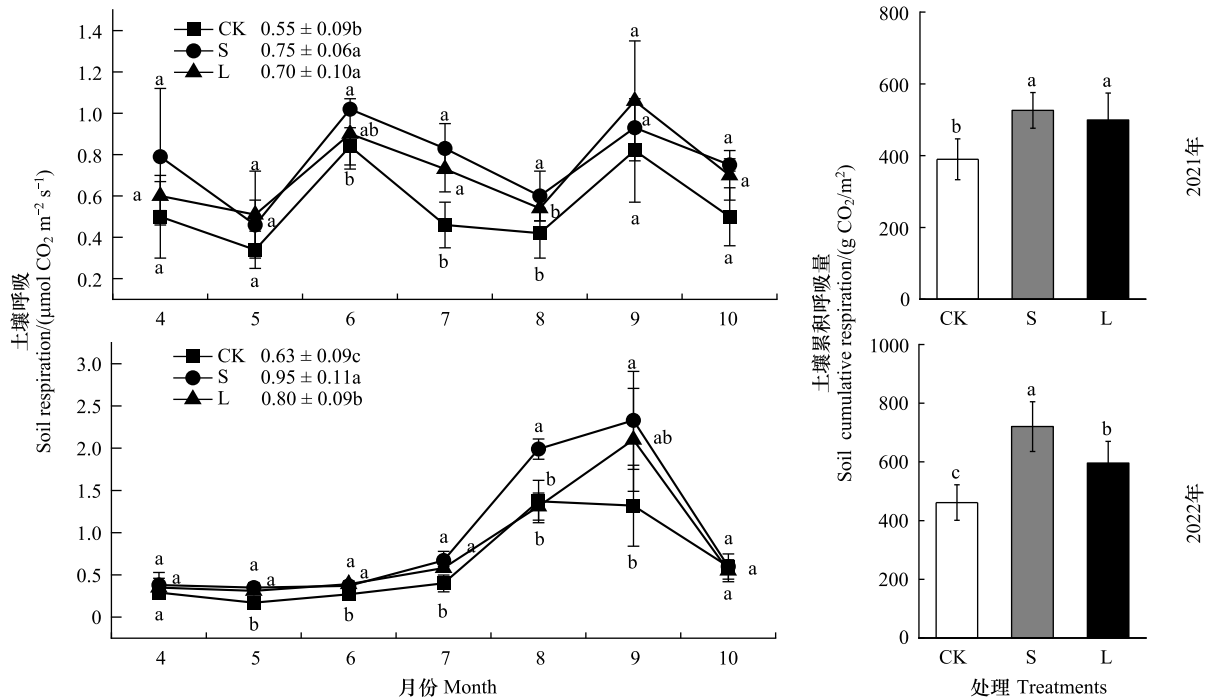


图 6 灌枝不同覆盖方式下土壤呼吸的动态变化及土壤累积呼吸量

Fig.6 Dynamic changes in soil carbon emission rate under different shrub branch coverage methods

CK、S 和 L 分别代表对照、短枝条覆盖和长枝条覆盖,不同小写字母代表在不同灌枝覆盖处理间平均土壤呼吸速率存在显著差异 ($P<0.05$)

相关性分析表明(图 7),2021 年土壤累积呼吸量与土壤水分、碱解氮含量、纤维素酶活性及 β -1,4-木糖苷酶活性显著正相关 ($P>0.05$),2022 年土壤累积呼吸量与土壤温度、水分、有机碳含量、碱解氮含量、全磷含量、速效磷含量、纤维素酶活性、 β -1,4-木糖苷酶活性、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性及植被高度显著正相关 ($P>0.05$)。此外,土壤温度与全氮含量、碱解氮含量、速效磷含量、 β -1,4-木糖苷酶活性、脲酶活性、植被高度及植被盖度呈负相关,而土壤水分与有机碳含量、全氮、碱解氮含量、全磷含量、速效磷含量、 β -1,4-木糖苷酶活性、脲酶活性及植被高度上呈正相关。

3 讨论

3.1 灌枝覆盖对荒漠草地土壤水热的影响

研究表明,在干旱半干旱地区,秸秆覆盖具有降低地表温度、减少地表径流和增加土壤含水量的作用^[29]。也有研究表明林木枝条覆盖可以有效降低土壤温度和改善土壤水分^[30-31]。张茹等^[32]的研究还发现,荒漠草地覆盖不同厚度的柠条枝条可以有效降低土壤温度,同时增加 0—40 cm 土壤含水量。以上研究结果均与本研究结果类似,即短柠条枝条(S)和长柠条枝条覆盖(L)亦可以有效降低荒漠草地土壤温度,改善土壤水分条件,特别是在 7 月至 9 月份的高温时期,灌枝覆盖措施可以形成一个降温保水的缓冲地带,防止太阳直射,起到遮荫的作用。此外,本试验中的短枝条覆盖处理增加土壤含水率 0.05%—3.31%,而长柠条枝条覆盖处理增加土壤含水率 0.04%—1.89%,说明短枝条覆盖比长枝条覆盖更利于在荒漠草地中保留土壤中的水分。短枝

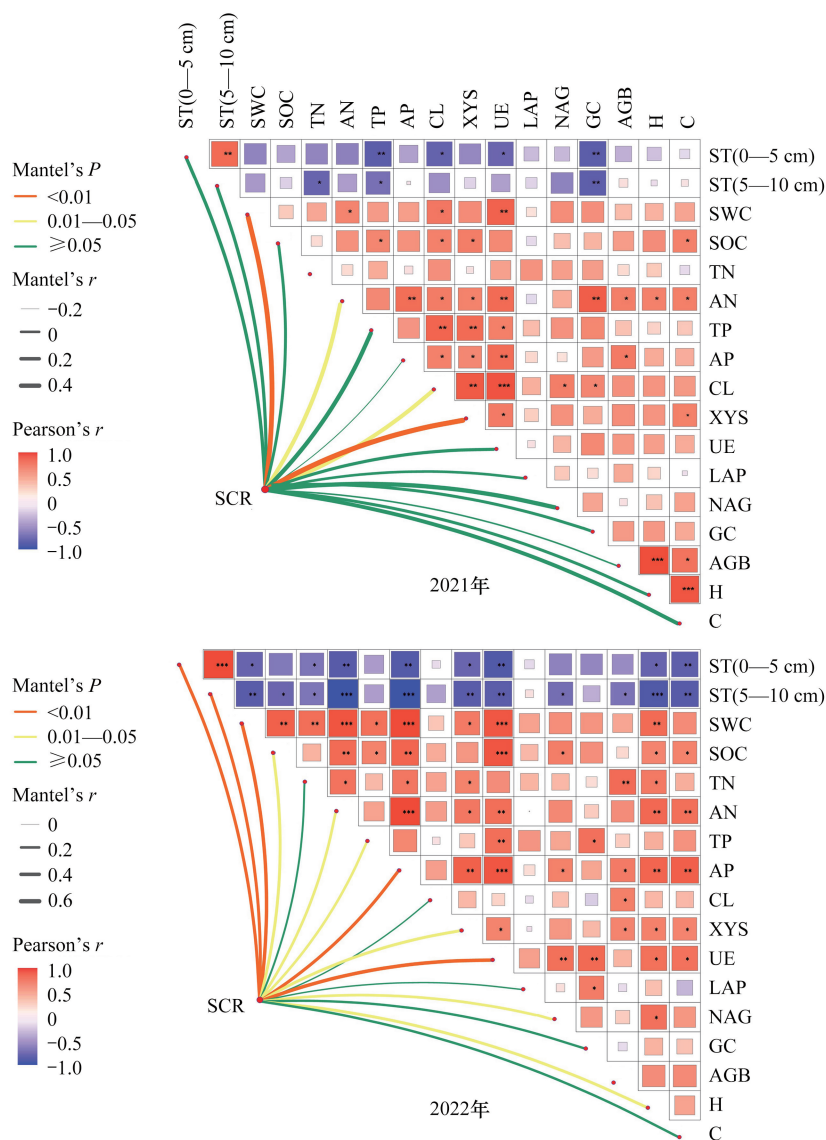


图7 土壤环境因子、草地植被及土壤累积呼吸量间的皮尔森相关性分析

Fig.7 Pearson's correlation analysis of soil environmental factors, grassland vegetation, and soil cumulative respiration

SCR:土壤累积呼吸量 Soil cumulative respiration;ST(0—5 cm):土壤温度(0—5 cm) Soil temperature(0—5 cm);ST(5—10 cm):土壤温度(5—10 cm)Soil temperature(5—10 cm);SWC:土壤含水量 Soil water content;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;TN:土壤全氮 Soil total nitrogen;AN:土壤碱解氮 Soil available nitrogen;TP:土壤全磷 Soil total phosphorus;AP:土壤速效磷 Soil available phosphorus;CL:纤维素酶 Cellulase;XYS:β-1,4-木糖苷酶 β-1,4-xylosidase;UE:脲酶 Urease;LAP:亮氨酸氨基肽酶 Leucine aminopeptidase;NAG:β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β-1,4-N-acetylglucosaminidase;GC:β-1,4-葡萄糖苷酶 β-1,4-glucosidase;AGB:地上生物量 Above-ground biomass;H: 高度 Height;C: 盖度 Coverage,蓝色代表负相关,红色代表正相关,线条宽度对应于 Mantel's r 值,线条颜色表示统计显著性,* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; *** 表示 $P<0.001$

条覆盖的这种特性可能与其覆盖面积有关,因为枝条短,覆盖时枝条形成交叉少而密的网,对草地覆盖度更大。

3.2 灌枝覆盖对荒漠草地土壤酶活性、土壤养分和植被的影响

在夏季土壤温度高,灌枝覆盖降低土壤温度,抑制土壤蒸发,使土壤水热条件更适合土壤微生物的繁殖和生长^[33—34],从而增加土壤酶活性。土壤水分参与土壤养分变化的生化反应,也通过影响微生物和植物根系生命活动从而影响土壤酶活性^[35]。本研究灌枝覆盖显著增加了纤维素酶、β-1,4-木糖苷酶、脲酶、β-1,4-N-乙

酰氨基葡萄糖苷酶和 β -1,4-葡萄糖苷酶的活性,说明覆盖通过改善土壤水分条件而促进了酶活性。土壤酶的主要来源之一是土壤微生物,土壤酶的活性可一定程度表示土壤微生物的活性^[36]。许华等^[37]研究表明在干旱荒漠区,土壤酶活性随着水分的增加而逐渐增加,土壤酶促进土壤养分的吸收及转化。本研究也表明,覆盖处理增加了土壤有机碳、土壤碱解氮和土壤速效磷含量,进一步表明灌枝覆盖改善了土壤水分条件,促进植物生长和增强土壤微生物活性,加速对凋落物等有机物的分解,导致更多碳源和速效养分进入土壤^[38-39],促进了土壤有机碳和速效养分的循环。虽然本研究发现灌枝覆盖处理对土壤全氮和全磷的含量不明显,但随着年限的增加有增长的趋势。此外,土壤养分的含量在第二年显著增加,这可能是因为前期覆盖的粉碎枝条与土壤之间形成了空隙,减少了枝条的有效分解^[40],而经过一年的覆盖处理,枝条的塌陷增加与土壤接触,从而增加了对土壤养分的释放。本研究地区属于干旱半干旱地区,降雨稀少,土壤退化,限制该地区植物生长的主要因子是土壤水分和土壤养分^[41],而覆盖处理会明显促进植物地上生物量、高度和盖度显著增加,这也说明在干旱半干旱草地进行灌枝覆盖,可提高土壤水分,增强土壤酶活性,促进枝条分解,改善土壤肥力,促进草地植物的生长^[42-44]。本研究还表明,土壤含水量、土壤酶活性、土壤养分和植被之间呈正相关,而且随着灌枝覆盖年限的增加,土壤温度、水分、酶活性和土壤养分之间相关性整体增强,说明灌枝覆盖有利于荒漠草地的改良和恢复,增加生态系统的稳定性。

3.3 灌枝覆盖对荒漠草地土壤呼吸影响的机制

土壤呼吸受到诸多因子的影响,不同的生境中其影响因子不同^[45]。Yang 等人研究表明^[46],在干旱地区土壤呼吸与土壤湿度正相关关系,干旱地区土壤含水量少,土壤湿度可能取代土壤温度成为主要的控制因子。此外,在干旱和半干旱生态系统中,土壤呼吸很大程度还会造成土壤碳库的损失^[47]。本研究中,水分是影响生态系统功能的关键生态因子,特别是 2021 年和 2022 年的土壤水分季节动态与对应年份的土壤呼吸季节动态变化规律一致。总体而言,灌枝覆盖改善了土壤水分,进而促进了土壤酶活性,加速了微生物对土壤碳的分解,因此表现出土壤呼吸累积总量与土壤水分及酶活性正相关的结果。然而,随着覆盖时间的推移,在覆盖的第 2 年,土壤水分的改善同时促进植物向土壤输入更多的有机物,而土壤酶会加速对土壤有机物的周转,致使土壤养分含量的提高^[48],因此植被的生长亦与土壤水分及养分间的关系更为密切,同时土壤呼吸受土壤温度、土壤含水量、土壤养分、土壤酶活性和植被的因子共同影响。特别是第 2 年的覆盖显著促进了土壤有机碳的积累,而土壤碳含量的增加也是土壤呼吸升高的一个重要原因,因此表现出土壤有机碳含量与土壤呼吸呈正相关^[49]。研究表明,土壤呼吸也与地上生物量正相关^[50],这也与本研究中土壤呼吸与植被高度正相关类似。特别是 2022 年短枝覆盖下的土壤呼吸速率显著高于长枝覆盖,更说明短枝覆盖在改善土壤水热环境,促进植物碳输入以及土壤碳循环方面优于长枝覆盖。总之,土壤呼吸强度一定程度可表示植被恢复及土壤微生物活性^[51],其在土壤健康质量中具有重要地位^[52],而本研究中灌枝覆盖显著增加了土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷含量及地上生物量,进而促进了土壤碳循环,在草地生态系统健康的改善和维持具有重要作用^[53]。

4 结论

本研究表明,将荒漠草地上的灌木平茬后进行地表覆盖,可以显著改善草地土壤水热条件、提升植物生物量、促进土壤酶活性及增加土壤养分含量,并最终表现出草地土壤呼吸速率及累积呼吸量的增加。因此,灌枝覆盖可以促进荒漠草地生态系统的碳循环,利于退化荒漠草地的恢复。总体而言,灌木短枝条覆盖较长枝覆盖更能有效改善土壤生物及非生物环境,利于促进荒漠草地的土壤呼吸速率,但从经济效益和可操作性方面考虑,灌木长枝条覆盖更具有的一定的推广应用价值。

参考文献 (References):

- [1] Wang Y H, Wang Z W, Li H G, Shen T T, Zhang X, Li J W, Han G D. Grazing decreased soil organic carbon by decreasing aboveground biomass

- in a desert steppe in Inner Mongolia. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119112.
- [2] 郑琪琪, 杜灵通, 宫菲, 丹杨, 王乐. 基于 GF-1 遥感影像的宁夏盐池柠条人工林景观特征研究. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2019, 39(1): 152-159.
- [3] 候腾思, 沈艳, 马红彬, 方鹏, 曹颖. 柠条平茬对荒漠草原土壤水分特征及水量平衡的影响. *草业学报*, 2024, 33(8): 15-24.
- [4] Ma C C, Guo H Y, Wu J B, Wang J L, Qi S X, Wei Y R, Gao Y B. Acclimation of photosynthetic traits of *Caragana* Species to desert environment in Inner Mongolian Plateau. *Arid Land Research and Management*, 2014, 28(1): 87-101.
- [5] 赵亚楠, 杜艳艳, 马彦平, 赵延兵, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤有机碳变化及其空间格局预测. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1927-1935.
- [6] 赵亚楠, 于露, 周玉蓉, 王红梅, 马千虎, 陆琪. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响. *生态学报*, 2020, 40(4): 1305-1315.
- [7] Li Z G, Schneider R L, Morreale S J, Xie Y Z, Li C X, Li J. Woody organic amendments for retaining soil water, improving soil properties and enhancing plant growth in desertified soils of Ningxia, China. *Geoderma*, 2018, 310: 143-152.
- [8] Li Z G, Schneider R L, Morreale S J, Xie Y Z, Li J, Li C X, Ni X L. Using woody organic matter amendments to increase water availability and jump-start soil restoration of desertified grassland soils of Ningxia, China. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(11): 1313-1324.
- [9] Liu J, Wang J, Morreale S J, Schneider R L, Li Z G, Wu G L. Contributions of plant litter to soil microbial activity improvement and soil nutrient enhancement along with herb and shrub colonization expansions in an arid sandy land. *CATENA*, 2023, 227: 107098.
- [10] 沈健, 何宗明, 董强, 郜士垒, 林宇, 石焱. 不同处理方式下湿地松人工林土壤呼吸及温度敏感性变化. *西北林学院学报*, 2023, 38(5): 10-18.
- [11] 彭少麟, 李跃林, 任海, 赵平. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 705-713.
- [12] Liebig M A, Doran J W, Gardner J C. Evaluation of a field test kit for measuring selected soil quality indicators. *Agronomy Journal*, 1996, 88(4): 683-686.
- [13] Luizão F J, Proctor J, Thompson J, Luizão R C C, Marrs R H, Scott D A, Viana V. Rain forest on maracá island, *Roraima, Brazil*: soil and litter process response to artificial gaps. *Forest Ecology and Management*, 1998, 102(2/3): 291-303.
- [14] Wang H, Liu S R, Wang J X, Li D, Shi Z M, Liu Y C, Xu J, Hong P Z, Yu H L, Zhao Z, Ming A G, Lu L H, Cai D. Contrasting responses of heterotrophic and root-dependent respiration to soil warming in a subtropical plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 221-228.
- [15] Schaeffer S M, Evans R D. Pulse additions of soil carbon and nitrogen affect soil nitrogen dynamics in an arid Colorado Plateau shrubland. *Oecologia*, 2005, 145(3): 425-433.
- [16] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [17] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 毛伟, 崔夺, 曲浩, 连杰, 罗永清. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展. *生态学报*, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [18] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, (7): 778-785.
- [19] Kwak J H, Chang S X, Naeth M A, Schaaf W. Nitrogen transformation rates are affected by cover soil type but not coarse woody debris application in reclaimed oil sands soils. *Restoration Ecology*, 2016, 24(4): 506-516.
- [20] Splawski C E, Regnier E E, Harrison S K, Bennett M A, Metzger J D. Weed suppression in pumpkin by mulches composed of organic municipal waste materials. *HortScience*, 2016, 51(6): 720-726.
- [21] Liu J, Schneider R, Morreale S, Wang H M, Wang R X, Wang F, Li Z G. The roles for branch shelters and sheep manure to accelerate the restoration of degraded grasslands in northern China. *Frontiers of Environmental Science*, 2023, 10: 1089645.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Schmitt S, Tsai P, Bell J, Fromont J, Ilan M, Lindquist N, Perez T, Rodrigo A, Schupp P J, Vacelet J, Webster N, Hentschel U, Taylor M W. Assessing the complex sponge microbiota: core, variable and species-specific bacterial communities in marine sponges. *The ISME Journal*, 2012, 6(3): 564-576.
- [24] Sestelo A B F, Poza M, Villa T G. β -glucosidase activity in a *Lactobacillus plantarum* wine strain. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2004, 20(6): 633-637.
- [25] 黄舜禹. 土壤亮氨酸氨基肽酶对镉污染响应机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [26] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [28] 任立军, 赵文琪, 李金, 陈佳豪, 李颖, 邹洪涛, 张玉龙. 不同施肥模式对设施土壤 CO₂ 排放特征及碳平衡的影响. *土壤通报*, 2022, 53(4): 874-881.

- [29] 巩杰, 黄高宝, 陈利顶, 傅伯杰. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 69-73.
- [30] 李志刚, 李健, 谢应忠. 地表人工覆盖对宁夏沙化土壤保水能力的影响. 林业科学, 2015, 51(5): 1-11.
- [31] 刘静. 柠条枝条覆盖对荒漠草地地表羊粪分解的影响及土壤—植被的调控[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [32] 张茹, 李建平, 彭文栋, 王芳, 李志刚. 柠条枝条覆盖对宁夏荒漠草原土壤水热及补播牧草生物量的影响. 草业学报, 2021, 30(4): 58-67.
- [33] Domínguez M T, Holthof E, Smith A R, Koller E, Emmett B A. Contrasting response of summer soil respiration and enzyme activities to long-term warming and drought in a wet shrubland (NE Wales, UK). *Applied Soil Ecology*, 2017, 110: 151-155.
- [34] Hu R, Wang X P, Zhang Y F, Shi W, Jin Y X, Chen N. Insight into the influence of sand-stabilizing shrubs on soil enzyme activity in a temperate desert. *Catena*, 2016, 137: 526-535.
- [35] 闫钟清, 齐玉春, 李素俭, 董云社, 彭琴, 贺云龙, 李兆林. 降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响研究进展. 微生物学通报, 2017, 44(6): 1481-1490.
- [36] 向泽宇, 王长庭, 宋文彪, 四郎生根, 呷绒仁青, 达瓦泽仁, 扎西罗布. 草地生态系统土壤酶活性研究进展. 草业科学, 2011, 28(10): 1801-1806.
- [37] 许华, 何明珠, 孙岩. 干旱荒漠区土壤酶活性对降水调控的响应. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(6): 790-797.
- [38] Song B, Niu S L, Zhang Z, Yang H J, Li L H, Wan S Q. Light and heavy fractions of soil organic matter in response to climate warming and increased precipitation in a temperate steppe. *PLoS One*, 2012, 7(3): e33217.
- [39] 杨文权, 寇建村, 贺璐, 韩明玉. 起垄后不同覆盖方式对苹果园土壤微生物和酶活性的影响. 土壤通报, 2014, 45(6): 1377-1382.
- [40] 周江涛, 程存刚, 赵德英, 吕德国. 苹果枝条不同覆盖方式对果园土壤理化性质的影响. 北方园艺, 2019(11): 39-44.
- [41] Fehmi J S, Rasmussen C, Gallery R E. Biochar and woodchip amendments alter restoration outcomes, microbial processes, and soil moisture in a simulated semi-arid ecosystem. *Restoration Ecology*, 2020, 28(S4): 355-364.
- [42] Weedon J T, Cornwell W K, Cornelissen J H C, Zanne A E, Wirth C, Coomes D A. Global meta-analysis of wood decomposition rates: a role for trait variation among tree species? *Ecology Letters*, 2009, 12(1): 45-56.
- [43] Aarons S R, O'Connor C R, Hosseini H M, Gourley C J P. Dung pads increase pasture production, soil nutrients and microbial biomass carbon in grazed dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(1): 81-92.
- [44] 颜亚赛, 钟晓敏, 段鑫垚, 黎日辉, 李华, 王华. 不同覆盖处理对葡萄园土壤理化性质及酶活性的影响. 中外葡萄与葡萄酒, 2023(3): 1-9.
- [45] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.
- [46] Yang X D, Ali A, Xu Y L, Jiang L M, Lv G H. Soil moisture and salinity as main drivers of soil respiration across natural xeromorphic vegetation and agricultural lands in an arid desert region. *Catena*, 2019, 177: 126-133.
- [47] Castillo-Monroy A P, Maestre F T, Rey A, Soliveres S, García-Palacios P. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem. *Ecosystems*, 2011, 14(5): 835-847.
- [48] Li X F, Zhang Y, Ding C X, Liu Y, Wu K X, Jiang F Z, Su D S. Water addition promotes vegetation recovery of degraded alpine meadows by regulating soil enzyme activity and nutrients in the Qinghai—Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106047.
- [49] Bazzaz F A, Williams W E. Atmospheric CO₂ concentrations within a mixed forest: implications for seedling growth. *Ecology*, 1991, 72(1): 12-16.
- [50] 张翼. 宁夏荒漠草原植被-土壤-微生物系统对降水变化和增温的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [51] 黄懿梅, 安韶山, 刘连杰, 薛虹. 黄土丘陵区土壤基础呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 862-869.
- [52] de Oliveira O C, de Oliveira I P, Alves B J R, Urquiaga S, Boddey R M. Chemical and biological indicators of decline/degradation of *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 103(2): 289-300.
- [53] 原樱其, 朱仁超, 杨宇, 余爱华. 不同生态系统土壤呼吸影响因素研究进展. 世界林业研究, 2023, 36(4): 15-21.