



生物炭基磷肥和补播对荒漠草原土壤呼吸的影响

范博 王占义 李海菁 赵向玲

Effects of biochar-based phosphate fertilizer and supplementary seeding on soil respiration in desert steppe

FAN Bo, WANG Zhanyi, LI Haijing, ZHAO Xiangling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0508>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响

Effects of supplementary sowing on plant community and soil physical and chemical properties in Ningxia desert steppe

草业科学. 2020, 37(10): 1959 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0202>

宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤呼吸响应特征

Responses of soil respiration to shrub introduction in the desert steppe of the eastern Ningxia

草业科学. 2019, 36(12): 3052 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0404>

甘肃马鹿春秋放牧对高寒草原土壤理化性质的影响

Effect of grazing in spring and autumn on the physical and chemical properties of soil in Qilian Mountain

草业科学. 2019, 36(2): 273 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0404>

荒漠绿洲区生长季不同土地覆被类型土壤呼吸对水热因子的响应

Response of soil respiration to hydrothermal factors under different land cover types in a desert oasis ecotone, northwest China

草业科学. 2019, 36(1): 37 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0062>

祁连山高寒草甸和荒漠草原土壤细菌群落的结构特征

Characterization of soil bacterial communities in alpine and desert grasslands in the Qilian Mountain range

草业科学. 2020, 37(1): 10 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0407>

增温和增氮对荒漠草原土壤可培养真菌群落结构和多样性的影响

Effect of warming and nitrogen addition on the community composition and diversity of cultivatable fungi from the desert steppe of Inner Mongolia

草业科学. 2017, 11(7): 1397 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0502>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0508

范博, 王占义, 李海菁, 赵向玲. 生物炭基磷肥和补播对荒漠草原土壤呼吸的影响. 草业科学, 2023, 40(7): 1711-1719.

FAN B, WANG Z Y, LI H J, ZHAO X L. Effects of biochar-based phosphate fertilizer and supplementary seeding on soil respiration in desert steppe. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1711-1719.



生物炭基磷肥和补播对荒漠草原土壤呼吸的影响

范博, 王占义, 李海菁, 赵向玲

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古呼和浩特 010011)

摘要: 我国90%以上的草地存在不同程度的退化, 修复退化草原是当前“双碳”背景下提升草原碳储量的重要途径, 探究不同草地修复措施对土壤碳排放的影响十分重要。因此, 本研究在内蒙古四子王旗荒漠草原样地设4个处理: 对照(CK)、生物炭基磷肥(CB)、补播(CP)和生物炭基磷肥加补播(CPB), 于2021年生长季(6月-10月)测量土壤呼吸速率, 并测量0-20 cm的土壤物理性质(土壤温度和含水量)和土壤化学性质(土壤有机碳和速效磷含量), 同时调查植被地上生物量。结果表明: 与对照相比, CP和CPB处理下土壤含水量和土壤呼吸速率分别增加了12%、15%和27%、30%, 土壤温度降低了2.5%和4.6%, CB处理提高了土壤化学性质但并未对土壤呼吸产生影响。研究发现, 补播和施肥+补播措施能够在短期内促进土壤呼吸。综合植被和土壤的变化情况, 生物炭基磷肥对于荒漠草原的修复有促进作用, 但施肥和补播措施时, 早期要注意控制开沟的规模, 尽可能减少对土壤的扰动。

关键词: 荒漠草原; 土壤呼吸速率; 土壤理化性质; 生物炭基磷肥; 补播; 方差分析; 相关关系

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)07-1711-09

Effects of biochar-based phosphate fertilizer and supplementary seeding on soil respiration in desert steppe

FAN Bo, WANG Zhanyi, LI Haijing, ZHAO Xiangling

(College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China)

Abstract: More than 90% of grasslands in the country have been degraded to varying degrees. Restoring degraded grasslands is an important way of increasing grassland carbon storage under the current dual carbon background. It is highly important to explore the impact of different grassland restoration measures on soil carbon emissions. Therefore, this study set up four treatments in the desert steppe sample of Siziwang Banner, Inner Mongolia including the control (CK), biochar-based phosphate fertilizer (CB), supplementary seeding (CP), and biochar-based phosphate fertilizer with supplementary seeding (CPB). The soil respiration rate was measured, and the soil physical properties (soil temperature and water content) and soil chemical properties (soil organic carbon and available phosphorus) were measured at 0-20 cm. Meanwhile, the vegetation aboveground biomass was investigated during the growing season in June-October of 2021. The results have shown that, compared with the control, the soil water content and soil respiration rate increased by 12%, 15% and 27%, 30%, respectively. The soil temperature decreased by 2.5% and 4.6% under the CP and CPB treatments. The CB treatment

收稿日期: 2022-06-18 接受日期: 2022-09-27

基金项目: 内蒙古科技计划项目“荒漠草原固碳减排技术集成与示范”(2019GG014)

第一作者: 范博(1995-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 在读硕士生, 研究方向为草地资源管理。E-mail: 2241619130@qq.com

通信作者: 王占义(1981-), 男, 内蒙古包头人, 副教授, 博士, 研究方向为草地资源管理。E-mail: zhanyiwang2006@163.com

improved the soil chemical properties but had no effect on soil respiration. This study has shown that replanting and fertilization + reseeding measures can promote soil respiration over relatively short timescales. Considering the changes in vegetation and soil, biochar-based phosphate fertilizers can promote the restoration of desert grasslands. However, with fertilizing and reseeding measures, attention should be paid to controlling the size of the trenches in the early stages to minimize soil disturbance.

Keywords: desert steppe; soil respiration rate; soil physical and chemical properties; biochar-based phosphate fertilizer; supplementary seeding; variance analysis; correlation relationship

Corresponding author: WANG Zhanyi E-mail: zhanyiwang2006@163.com

在陆地生态系统中,碳储量最大的是土壤碳库,土壤呼吸是生态系统碳循环过程中土壤碳释放的主要输出途径^[1-2]。土壤呼吸是指由土壤动物、微生物和植物根系的呼吸以及一些分解活动释放CO₂的过程^[3]。在陆地生态系统中,土壤呼吸对大气CO₂浓度增加的响应是预测和评价整个陆地生态系统土壤碳周转和碳收支的重要前提与基础,土壤呼吸的微小变化都会显著影响大气中CO₂的浓度和土壤碳的累积量,进而影响陆地生态系统的碳源汇功能,甚至引起气候的变化^[4-5]。荒漠草原是交错于草原与荒漠之间脆弱的生态系统,同时也是生态安全的重要屏障。因此,研究不同修复措施对荒漠草原土壤呼吸的影响对荒漠草原土壤碳循环具有重要意义,有利于荒漠草原生态系统的可持续发展。

生物炭添加作为一种潜在的土壤修复技术受到广泛关注^[6]。生物炭是一种由植物等生物质材料在缺氧条件下经高温裂解产生的一类含碳量高的芳香化合物,在土壤中的稳定性极高,施入生物炭的土壤可改善土壤结构,提高土壤的保水保肥能力^[7-8]。学者们对生物炭的研究结果不尽相同。Ventura等^[9]的研究表明,生物炭的添加可以与原来土壤中有有机质相互作用,进而抑制土壤有机质矿化速率和CO₂释放。Cross和Sohi^[10]和Song等^[11]的研究结果均发现,施用生物炭会导致原有土壤有机质的分解,使得土壤CO₂排放量增加。但是在荒漠草原添加生物炭对CO₂释放的影响并没有定论,土壤磷的添加能够增加根系生物量和光合作用,改变微生物的活性,对草地恢复和土壤碳循环产生显著影响^[12-13]。荒漠草原的土壤中缺少磷元素,生物炭基磷肥的添加可以使得生物炭吸附磷肥,添加土壤所需要的肥料改善土壤养分和促进植物的生长。退化草地补播是影响草地生态系统碳循环的重要因素^[14]。补播不

仅可以提高草地生产力,改善草地品质,还对土壤容重和含水量等土壤理化性质产生积极影响,增加了草地碳固存和土壤肥力^[15-16]。利用豆禾牧草混播进行退化草地的补播不仅有利于植被的恢复,而且能有效地提高土地的固碳能力^[17-18]。然而,现有关于对退化草地进行人工补播的研究多集中于牧草产量、品质和土壤养分利用改善方面,对土壤碳排放的研究较少。

基于此,本试验研究荒漠草原中生物炭基磷肥和豆禾牧草混播以及两者的交互作用的改良措施下短期内土壤呼吸变化,拟回答以下问题:(1)不同处理生长季内对土壤呼吸的影响情况?(2)土壤物理性质(土壤温度和含水量)和土壤化学性质(土壤有机碳和速效磷含量)与土壤呼吸之间是否存在相关关系?旨在分析荒漠草原土壤呼吸在不同技术措施下的响应情况,为荒漠草原生态系统修复过程中土壤碳排放变化情况提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古四子王旗格根塔拉图雅牧场(41°47'19" N, 111°53'57" E),属于典型的温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热干燥,雨热同期,降雨期集中在7月—9月,降水量约占全年的70%;多年平均气温3.4℃,月平均气温在7月最高。试验地为淡栗钙土,土壤有机碳含量为13.2 mg·kg⁻¹,土壤速效磷含量为4.4 mg·kg⁻¹,土壤pH为8.14。植被建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*)和无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)等,主要伴生种为栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)和银灰旋花(*Convolvulus ammanni*),多为草本植物,有少量的小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*),植被较为稀疏、低矮。

1.2 试验材料

1.2.1 试验种子处理

试验所使用的种子为‘草原 3 号’苜蓿 (*Medicago sativa* ‘caoyuan No.3’) 和 蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*), 种子来自内蒙古农业大学草原与资源环境学院重点试验室。‘草原 3 号’苜蓿种子播种前进行种子去硬化处理, 采用物理的变温法处理种子, 将种子放入烘箱内 75 °C 烘 40 min 再在 88~98 °C 烘箱内烘 10 min, 有利于提高种子出苗率。蒙古冰草播种前需要去芒处理, 双氧水消毒, 然后晾干播种或催芽播种。

1.2.2 生物炭基磷肥的制备

生物炭购买于大庆市金土地生物质材料有限公司, 生物炭由玉米 (*Zea mays*) 秸秆在 500 °C 条件下裂解而来。生物炭基肥富集采用冷富集法, 将生物炭和磷酸二铵按照 1:1 富集, 将 450 g 生物炭加入含有 450 g 磷酸二铵和 100 g 灭菌砂的桶中充分加入适量去离子水充分搅拌后, 在 60 °C 下烘干, 然后置于密闭容器内备用^[19]。

1.3 试验设计

试验地于 2019 年在天然草地放牧地围封, 共设 4 个处理对照 (CK)、补播 (CP)、施生物炭基磷肥 (CB) 和施生物炭基磷肥加补播 (CPB), 每个小区面积为 5 m × 3 m, 随机分布, 各个小区间隔带宽为 1 m, 防止相互之间干扰 (图 1)。

CPB ₁	CP ₁	CK ₁	CB ₁
CP ₂	CB ₂	CPB ₂	CK ₂
CK ₃	CPB ₃	CP ₃	CB ₃

图 1 试验样地设计图

Figure 1 Test plot design

CK 表示对照区, CB 表示添加生物炭基磷肥区, CP 表示补播区, CPB 表示施肥加补播区。数字表示重复小区编号; 下同。

CK means control area, CB means biochar-based phosphate fertilizer addition area, CP means supplementary sowing area, CPB means fertilization plus supplementary sowing area, numbers indicate repeating cell numbers. This is applicable for figures and tables as well.

小区生物炭基磷肥处理采用开沟施肥的方法, 在 2021 年 6 月初用开沟器在草地开沟, 开沟深度为 15 cm 左右, 开沟施肥后将土原位回填, 相邻开沟的距离为 25 cm。CB 处理施肥量按照 15 kg·hm⁻²

进行施肥, 然后均匀撒到施肥沟里。

CP 处理时间在 6 月初进行, 待施生物炭基磷肥处理稳定后, 地面湿度较大时进行补播, 补播时蒙古冰草播种量为 18 kg·hm⁻², ‘草原 3 号’苜蓿播种量为 15 kg·hm⁻², 蒙古冰草和‘草原 3 号’苜蓿按照 1:1 的比例进行补播处理。补播深度为 2 cm, 开沟后, 均匀撒入补播种子后原位覆土。

土壤呼吸测量设备底座在 6 月安装, 购置直径为 22 cm 的白色 PVC 管 15 cm, 砸入地下 10 cm, 地上部分保留 5 cm, 每个小区各设置一个, 位置居中用于后期测量。

1.4 土壤呼吸速率、理化性质指标与地上生物量的测定

土壤呼吸测量的底座安装后, 待土壤恢复一段时间后, 从 6 月开始数据采集, 每次采集前一天将 PVC 管内的植物齐地面剪掉, 清除地表以上的动植物后开始测量。在 2021 年 6 月—10 月每个月采用开路式土壤碳通量测量系统 Li-8100 (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA) 测量两次土壤呼吸速率, 测量时间均为上午, 每个小区重复 3 次, 测量频率按时间线均匀分开, 如遇降雨则等地面干燥后再继续测量。

土壤温湿度的测定: 使用 WET 温湿度传感器测量 0—20 cm 深的土壤含水量与土壤温度。土壤碳和磷含量的测定: 在牧草生长旺盛期 8 月中旬用土钻采集 0—20 cm 深的土样, 经风干后过 2 mm 筛, 用于测定土壤有机碳和速效磷含量指标。土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定, 速效磷含量采用钼锑抗比色法测定^[20]。

地上生物量的测定在牧草生长旺盛的 8 月中旬进行, 使用 1 m × 1 m 的样方框, 随机取样, 齐地面刈割后带回实验室称量植物鲜重, 并在 65 °C 恒温烘干至恒重, 称植物干重并计算生物量。

1.5 数据处理

运用 Excel 2016 对数据进行初步整理, 用 SAS 9.4 软件分别对土壤呼吸速率、土壤理化性质以及植物鲜重和地上生物量进行单因素方差分析, 并使用 SPSS 26.0 软件分析土壤呼吸速率与各因素之间的相关关系并构建回归模型。多重比较和回归分析结果采用 Sigmaplot 14.0 进行图形绘制, 其中方差分析调用 GLM (General Linear Models) 过程, 多重比较

采用 Duncan 检验法, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤温度、含水量和呼吸速率月动态的影响

不同处理下的土壤温度均在 7 月—8 月达到最大值, 10 月降到最小值 (图 2A)。CK 处理下的土壤平均温度最高且相对稳定, 变化趋势比较平稳。在生长季内 (6 月—9 月) 土壤含水量变化较为稳定, 各处理之间相差较小 (图 2B)。不同处理下的土壤含水量均在 9 月初达到最大值, 在 10 月中旬降到最小值, 可以看出不同处理下 9 月—10 月土壤含水量快速下降, 且在这个范围内各个处理相差较大。土壤呼吸速率均在 8 月达到最大值, 处理 CK、CB、CP 和 CPB 土壤呼吸速率最高值分别为 3.34、3.68、4.21 和 4.23 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 在 10 月出现最小值, 处理 CK、CB、CP 和 CPB 土壤呼吸速率分别为 1.52、1.45、1.46 和 1.43 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (图 2C)。

2.2 不同处理对土壤理化性质和植被地上生物量的影响

不同处理下土壤温度、土壤含水量和土壤呼吸速率的变化如表 1 所列。土壤温度从低到高在不同处理下的顺序为 CPB < CP < CB < CK, 且 CK 与 CP、CPB, CB 与 CP、CPB 处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。比较来看, CK 处理下的土壤温度显著高于 CP 和 CPB 处理 ($P < 0.05$), CPB 和 CP 处理土壤温度较低且变化较大。

土壤含水量和土壤呼吸速率变化趋势相同, 均为 CK < CB < CP < CPB。但不同的是, 土壤含水量在 CK 与 CPB、CP, CB 与 CPB 处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。土壤呼吸速率在 CK 与 CP 和 CPB 处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

不同处理下土壤有机碳含量在 CB 与 CPB 处理下的值较高, 在 CK 与 CP 处理下的值较低 (图 3A)。土壤速效磷含量在 CB 处理下的值最高, 且 CB 与 CK、CP, CPB 与 CK 处理下均存在显著差异 ($P < 0.05$) (图 3B)。

不同处理下地上生物量无论是植被鲜重 (图 4A) 还是植被地上生物量 (干重) (图 4B) 在不同处理下均要显著高于 CK ($P < 0.05$), 其他各处理之间无显

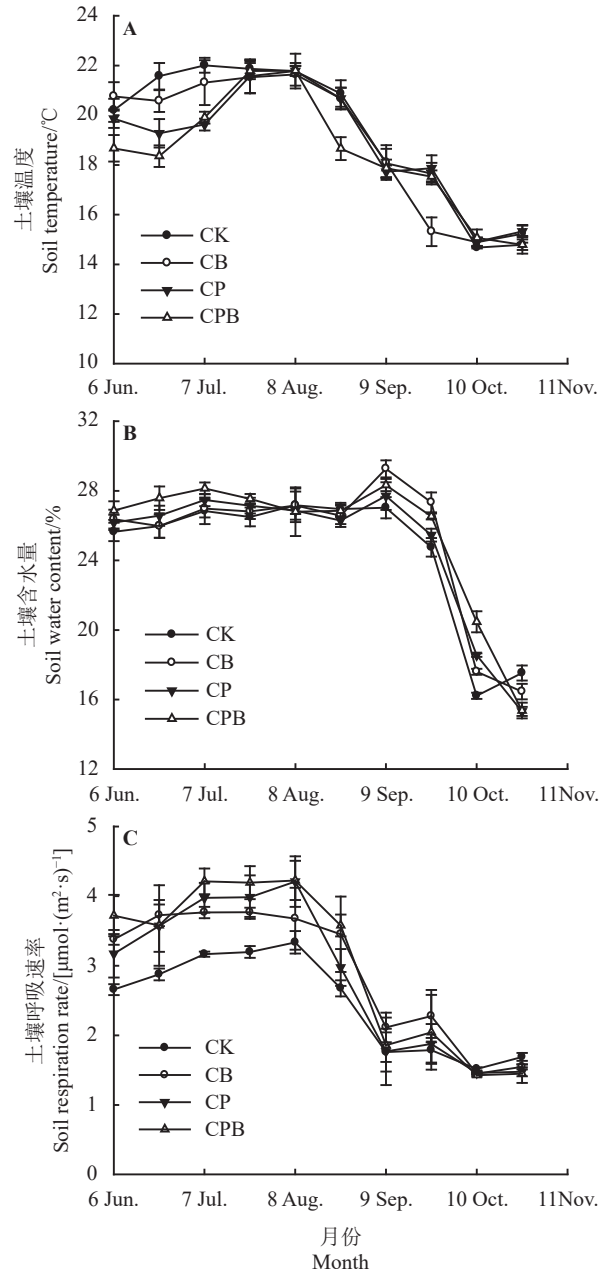


图 2 不同处理下土壤温度、含水量和呼吸速率的月动态变化图

Figure 2 Dynamic changes in soil temperature, soil moisture, and soil respiration rate in different months

著差异 ($P > 0.05$)。不同处理措施均促进了草地地上生物量, 但这些处理在短时间内对地上生物量的优势并未体现出来。

2.3 土壤呼吸速率与各因素之间的关联性关系

Pearson 相关性分析表明, 土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量之间存在极显著相关关系 ($P < 0.01$), 其相关系数分别为 0.834 和 0.667; 与土壤有机碳和土壤速效磷无显著相关关系 ($P > 0.05$), 因

表 1 不同处理下土壤温度、土壤含水量和土壤呼吸的变化
Table 1 Changes in soil temperature, soil moisture, and soil respiration under different treatments

处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature/°C	土壤含水量 Soil moisture/%	土壤呼吸速率 Soil respiration rate/[$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]
CK	19.63 ± 1.48a	21.66 ± 2.27c	2.22 ± 0.43b
CB	18.99 ± 1.58a	22.81 ± 2.42bc	2.67 ± 0.55ab
CP	18.51 ± 1.46b	24.17 ± 2.85ab	2.83 ± 0.71a
CPB	18.41 ± 1.27b	24.94 ± 2.84a	2.89 ± 0.72a

同列不同小写字母表示不同处理下差异性显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters within the same column indicate significant differences under different treatments at the 0.05 level.

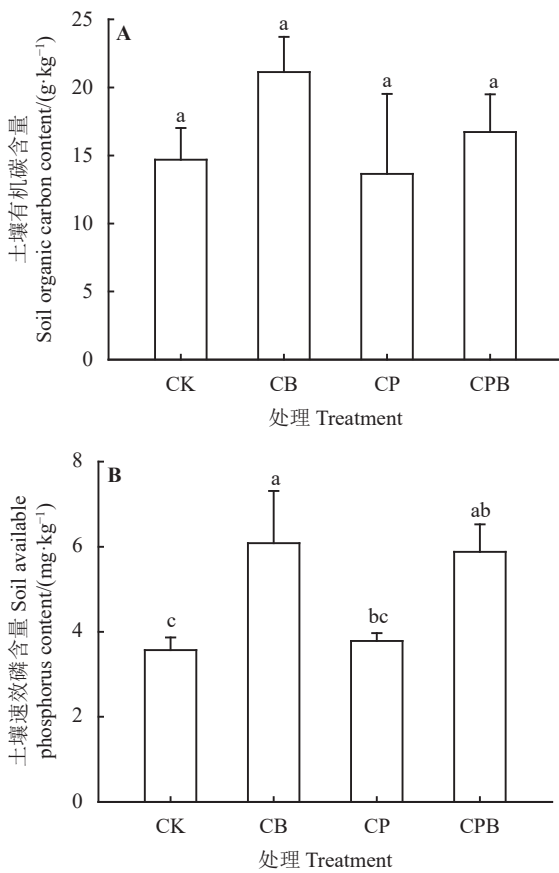


图 3 不同处理对土壤有机碳和速效磷含量的影响
Figure 3 Effects of different treatments on soil organic carbon and available phosphorus content

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Different lowercase letters indicate significant differences under different treatments at the 0.05 level. This is applicable for the following figures as well.

此, 利用回归分析的统计方法对土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量之间进行一元二次回归方程拟合 (图 5)。

土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量之间拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.849 和 0.635, 说明这

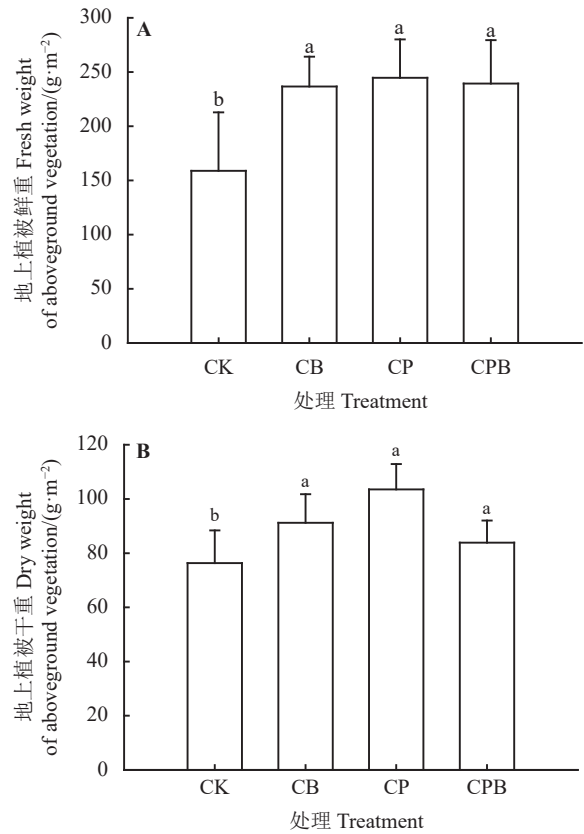


图 4 不同处理对地上生物量的影响
Figure 4 Effects of different treatments on aboveground biomass

两个模型拟合效果良好。土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量拟合的一元二次回归方程分别是 $y = -1.29x^2 + 9.45x + 4.01$ 和 $y = -3.29x^2 + 20.93x - 4.44$ 。可以明显看出, 土壤呼吸速率为 $3.65 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 是研究土壤呼吸速率与土壤温度相关关系的分界点, 土壤呼吸速率数值在 $0 \sim 3.65 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 二者存在正相关关系, 大于 $3.65 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 则存在负相关关系。土壤呼吸速率为 $3.18 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 是研究土壤呼吸速率与土壤含水量相关关系的分界

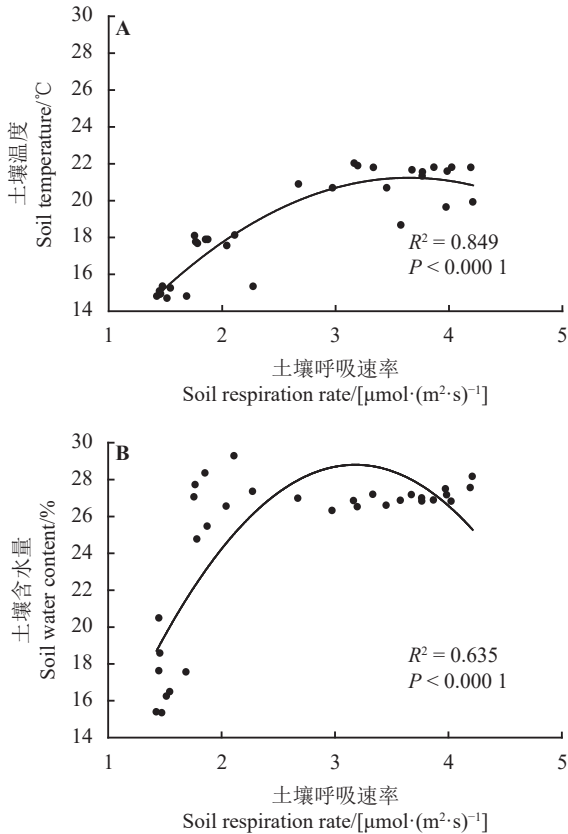


图 5 土壤呼吸与土壤温度和土壤含水量之间的关系
Figure 5 Relationship between soil respiration, soil temperature, and soil moisture

点, 土壤呼吸速率数值在 $0 \sim 3.18 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 二者存在正相关关系, 大于 $3.18 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 则存在负相关关系。

3 讨论

3.1 不同处理对土壤理化性质的影响

施肥和补播会影响退化草地土壤的理化性质。在本研究中 CB 和 CPB 处理下土壤温度相对 CK 有明显下降趋势且变化范围较大, 这与 Wali 等^[19]得出的结论并不相同, 可能是由于 CB 和 CPB 在短期处理下土壤呼吸影响因子主要来自于对土壤的扰动, 生物炭基磷肥对土壤温度的影响在长期会起到促进作用, 而且在进入 10 月后生物炭基磷肥对土壤温度的降低作用在降低甚至消失。本研究中发现短期 CP 处理降低了土壤温度, 在这方面目前尚未发现补播对土壤温度的相关影响, 但有研究表明在荒漠草原土壤含水量与土壤温度是呈负相关关系甚至是显著负相关关系^[21]。在本研究中土壤含水量

在 CPB 和 CP 处理下的值均较高, 这为本研究中补播降低土壤温度的结论找到了相关依据, 即补播措施提高了土壤含水量、增强土壤热容量进而降低了土壤温度。

补播对土壤呼吸速率的短期影响主要是通过改善土壤理化性质, 由于补播对土壤的扰动, 土壤孔隙度增加, 改善了土壤保水性和土壤通透性^[22]。大多研究认为补播较长时间后土壤中的植物根系分泌物增多, 土壤活性炭含量增加, 土壤呼吸增强, 这与本研究的研究结果一致^[14]。本研究中土壤呼吸速率在 CB 处理下的值均小于 CPB 和 CP 处理。这可能是由于 CP 处理对土壤扰动较大, 土壤孔隙度增加使得土壤氧气含量增加, 给土壤异养呼吸的动物、微生物和植物根系提供了良好的生存环境, 使得其更加活跃, 促进了土壤呼吸作用^[23]。

生物炭基磷肥能够降低土壤 CO_2 排放, 这与 Sun 等^[24]和崔骁勇等^[25]的研究结果相似。其原因可能是生物炭中含有的矿物质对 CO_2 有较强的固定作用, 生成更稳定的团聚体, 减少土壤 CO_2 排放^[26]。为了更深入地了解土壤呼吸控制机理及过程, 仍需深入研究土壤化学性质的变化。有机碳是土壤微生物底物供应的主要来源, 陈仕阳等^[27]的研究表明, 长期施肥显著改变了土壤的理化性质并提升土壤有机碳含量。这与本研究的研究结果一致, 土壤有机碳和速效磷含量在 CB 处理下的值均较高。速效磷含量较高可能是因为本研究试验地为以短花针茅为建群种的荒漠草原, 生态环境脆弱, 土壤养分中缺少磷元素, 施加磷肥短期内促进了土壤中磷元素的补充。此外, 自然状况下土壤养分的变化是一个长期缓慢的过程, 凋落物的分解归还对土壤磷的影响也是一个非常复杂的过程, 是生物因素和非生物因素共同作用的结果^[28]。

3.2 不同处理下土壤呼吸速率对土壤温度和含水量的响应

尽管影响土壤呼吸速率的因素较多, 但土壤温度和含水量对土壤呼吸速率的影响作用更大, 并且干旱条件下会加大影响程度^[29-30]。在本研究中这两个因素对土壤呼吸速率的相关系数较大且呈现一元二次的回归关系, 土壤呼吸速率为 $3.65 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 是研究土壤呼吸速率与土壤温度相关关系的分界点。在一定范围内, 土壤温度升高对植物根系的呼

吸作用、土壤微生物活动和有机质分解均有促进作用,但在高温状态下,土壤呼吸速率对温度的变化敏感性会降低^[31-32]。土壤含水量是影响土壤呼吸速率的另一个关系因素。在干旱条件下土壤含水量和土壤呼吸速率呈正相关关系,土壤含水量过高会阻碍土壤呼吸速率。土壤呼吸速率与该地的降水量息息相关。Wang 等^[33]在呼伦贝尔草甸草原研究表明土壤呼吸速率随着降水增加而下降。宋晓辉等^[34]和王忠武等^[35]在短花针茅荒漠草原的研究表明降水显著增加,土壤呼吸也随着显著增加。本研究结果显示,在一定程度上土壤呼吸速率与土壤含水量呈正相关关系。这可能是因为荒漠草原常年干旱缺水,土壤水分含量对土壤呼吸起主要限制作用^[36]。

由于土壤呼吸变化是一个复杂的过程,在不同的修复措施下除土壤理化性质外,土壤微生物、凋落物的变化均会对土壤呼吸速率产生影响,因此还需要开展多因素的长期观测研究,为土壤碳循环和减少温室气体排放提供更多的理论依据。

4 结论

土壤温度和土壤含水量是四子王旗荒漠草原不同草地修复措施下土壤呼吸的主要影响因子。补播和施肥加补播措施提高了土壤含水量,增强土壤热容量,降低了土壤温度,进而促进了土壤呼吸作用,生物炭基磷肥处理显著地增加了土壤养分含量。因此,补播和施肥补播措施对荒漠草原修复过程中的土壤碳排放有显著影响。

参考文献 References:

- [1] LIU S W, CHENG J, WANG C, CHEN J, JIN Y G, ZOU Z H, LI S Q, NIU S L, ZOU J W, KNOPS J. Climatic role of terrestrial ecosystem under elevated CO₂: A bottom-up greenhouse gases budget. *Ecology Letters*, 2018, 21(1): 1108-1118.
- [2] JEONG S H, EOM J Y, LEE J H, LEE J S. Effect of rainfall events on soil carbon flux in mountain pastures. *Journal of Ecology and Environment*, 2017, 41(1): 37.
- [3] CHEN Z M, XU Y H, FAN J L, YU H, DING W. Soil autotrophic and heterotrophic respiration in response to different N fertilization and environmental conditions from a cropland in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110(6): 103-115.
- [4] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, NEWKIRK H, LUX F, BOWLES F P, CATRICALA C, MAGILL A, AHRENS T, MORRISSEAU S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2003, 298: 2173-2176.
- [5] 张智起, 张立旭, 徐炜, 汪浩, 王金洲, 王妮, 贺金生. 气候变暖背景下土壤呼吸研究的几个重要问题. *草业学报*, 2019, 28(9): 164-173.
ZHANG Z Q, ZHANG L X, XU W, WANG H, WANG J Z, WANG W, HE J S. Several important issues of soil respiration under climate warming. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 164-173.
- [6] YAN T, XUE J, ZHOU Z, WU Y. Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous area. *Science of the Total Environment*, 2021, 794(31): 148757.
- [7] 包建平, 袁根生, 董方圆, 李佳星, 梁辰飞, 徐秋芳, 秦华, 陈俊辉. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响. *土壤学报*, 2020, 57(3): 721-729.
BAO J P, YUAN G S, DONG F Y, LI J X, LIANG C F, XU Q F, QIN H, CHEN J H. Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 721-729.
- [8] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展. *土壤与作物*, 2012, 1(4): 219-226.
ZHANG Q F, WANG G H. Research progress of physiochemical properties of biochar and its effects as soil amendments. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 219-226.
- [9] VENTURA M, ALBERTI G, VIGER M, JENKINS J R, GIRARDIN C, BARONTI S, ZALDEI A, TAYLOR G, RUMPEL C, MIGLIETTA F, TONON G. Biochar mineralization and priming effect on SOM decomposition in two European short rotation coppices. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(5): 1150-1160.
- [10] CROSS A, SOHI S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status.

- Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(10): 2127-2134.
- [11] SONG X, PAN G, ZHANG C, LYU Z, WANG H. Effects of biochar application on fluxes of three biogenic greenhouse gases: A Meta-analysis. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(2): 243-257.
- [12] REN F, YANG X, ZHOU H, ZHU W Y, ZHANG Z H, CHEN L T, COA Z M, HE J S. Contrasting effects of nitrogen and phosphorus addition on soil respiration in an alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Entific Reports*, 2017, 6(7): 34786.
- [13] RUI W, SUN Q, YING W, LIU Q F, DU L L, ZHAO M, GAO X, HU Y X, GUO S L. Temperature sensitivity of soil respiration: Synthetic effects of nitrogen and phosphorus fertilization on Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2017, 574(1): 1665-1673.
- [14] 王祥, 郑伟, 朱亚琼, 关正翔, 唐高溶. 昭苏山地草甸不同土地利用方式下的土壤呼吸特征及其水热关系的比较研究. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 76-83.
- WANG X, ZHENG W, ZHU Y Q, GUAN Z Y, TANG G R. Comparative studies on soil respiration characteristics and relationship between water contents and temperature under different utilization ways in mountain meadow soil in Zhaosu. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 76-83.
- [15] FANG C, WEBER K T, SCHNASE J L. Assessing the success of post-fire reseeding in semiarid rangelands using terra MODIS. *Rangeland Ecology and Management*, 2012, 65(5): 468-474.
- [16] NAGATAKE A, MUKUMBUTA I, YASUDA K, SHIMIZU M, KAWAI M, HATANNO R. Temporal dynamics of nitrous oxide emission and nitrate leaching in renovated grassland with repeated application of manure and/or chemical fertilizer. *Atmosphere*, 2018, 9(12): 485.
- [17] 张英俊, 杨高文, 刘楠, 常书娟, 王晓亚. 草原碳汇管理对策. *草业学报*, 2013, 22(2): 290-299.
- ZHANG Y J, YANG G W, LIU N, CHANG S J, WANG X Y. Review of grassland management practices for carbon sequestration. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2): 290-299.
- [18] RAIESI F, BEHESHTI A. Soil C turnover, microbial biomass and respiration, and enzymatic activities following range and conversion to wheat-alfalfa cropping in a semi-arid climate. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(12): 5073-5088.
- [19] WALI F, NAVEED M, BASHIR M A, ASIF M, AHMAD Z, AIKHAHTANI J, AIWAHIBI M S, EISHIKH M S. Formulation of biochar-based phosphorus fertilizer and its impact on both soil properties and chickpea growth performance. *Sustainability*, 2020, 12(22): 3-4.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2013: 61-131.
- BAO S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis (Third Version). Beijing: China Agriculture Press, 2013: 61-131.
- [21] GARG A, HUANG H, CAI W L, REDDY N G, CHEN P, HAN Y, KAMCHOOM V, GAURAV S, ZHU H H. Influence of soil density on gas permeability and water retention in soils amended with in-house produced biochar. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(3): 593-602.
- [22] 李晓娜, 王超, 张微微, 赵春桥, 史瑞双, 薛瑞彬, 樊冉冉. 京郊荒滩地短期植被恢复对土壤理化性质及微生物群落结构的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 343-348, 357.
- LI X N, WANG C, ZHANG W W, ZHAO C Q, SHI R S, XUE R B, FAN R R. Effects of short-term vegetation restoration on soil physicochemical characteristics and microbial community structures in the wasteland of Beijing Suburb. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 343-348, 357.
- [23] 蒋德明, 贺山峰, 曹成有, 押田敏雄, 李雪华. 翻耙补播对科尔沁碱化草地土壤理化性质和生物活性的影响. *中国草地学报*, 2006, 28(4): 6-23.
- JIANG D M, HE S F, CAO C Y, YATIAN M X, LI X H. Effect of plowing and reseeding on soil physicochemical properties and biological activities of alkalinized grassland in Horqin area. *Chinese Journal of Grassland*, 2006, 28(4): 6-23.
- [24] SUN J, WANG B, GANG X, SHAO H. Effects of wheat straw biochar on carbon mineralization and guidance for large-scale soil quality improvement in the coastal wetland. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1): 43-47.
- [25] 崔骁勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展. *生态学报*, 2001, 21(2): 315-325.
- CUI X Y, CHEN Z Z, CHEN S Q. Progress in research on soil respiration of grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 315-325.
- [26] HUANG R, LAN M L, LIU J, GAO M. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: The role of

- different straws returning. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(36): 27942-27952.
- [27] 陈仕阳, 杨荣, 苏永中, 杜泽玉. 河西绿洲农田土壤呼吸特征及其对长期施肥的响应. *中国沙漠*, 2022, 42(3): 178-186.
CHEN S Y, YANG R, SU Y Z, DU Z Y. Characteristics of soil respiration in farmland of Hexi oasis and its response to long-term fertilization. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(3): 178-186.
- [28] 王星丽, 殷秀琴, 宋博, 辛未冬, 李波, 马宏彬. 羊草草原主要凋落物分解及土壤动物的作用. *草业学报*, 2011, 20(6): 143-149.
WANG X L, YIN X Q, SONG B, XIN W D, LI B, MA H B. Main species litter decomposition and function of soil fauna in *Leymus chinensis* grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6): 143-149.
- [29] 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.
WANG X Y, LI Y L, ZHAO X Y, MAO W, CUI D, QU H, LIAN J, LUO Y Q. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [30] 韩丹, 李玉霖, 杨红玲, 宁志英, 张子谦. 模拟增温和改变降雨频率对干旱半干旱区土壤呼吸的影响. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 100-108.
HAN D, LI Y L, YANG H L, NING Z Y, ZHANG Z Q. Effects of simulated temperature increase and change of rainfall frequency on soil respiration in arid and semi-arid areas. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 100-108.
- [31] 刘春霞, 王玉杰, 王云琦, 冯华敏, 胡波. 重庆缙云山3种林型土壤呼吸及其影响因子. *土壤通报*, 2013, 44(3): 587-593.
LIU C X, WANG Y J, WANG Y Q, FENG H M, HU B. Soil respiration and impact factors of 3 forest types in Jinyun mountain of Chongqing. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 587-593.
- [32] 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. *生态学报*, 2007, 32(5): 1960-1968.
WANG X G, ZHU B, WANG Y Q, ZHENG D H. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 32(5): 1960-1968.
- [33] WANG X, YAN Y, ZHAO S, XIN X P, YANG G X, YAN R R. Variation of soil respiration and its environmental factors in Hulunber meadow steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(1): 1-4.
- [34] 宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 康慧, 刘晨, 李治国, 屈志强, 韩国栋. 不同放牧强度和水分处理下荒漠草原土壤呼吸与群落地下生物量的关系. *草地学报*, 2019, 27(4): 962-968.
SONG X H, WANG Y H, WANG Z W, KANG H, LIU C, LI Z G, QU Z Q, HAN G D. Relationship between soil respiration and community underground biomass of desert steppe under different grazing intensities and water treatments. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 962-968.
- [35] 王忠武, 宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 闫宝龙, 韩国栋. 模拟降水对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 111-116.
WANG Z W, SONG X H, WANG Y H, WANG Z W, YAN B L, HAN G D. Effects of simulated precipitation on soil respiration of *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(1): 111-116.
- [36] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 719-733.
HAN G X, ZHOU G S, XU Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 719-733.

(责任编辑 王芳)