



李升, 朱银浩, 尹娟, 杨莹攀, 范家杨, 李东宇. 水炭调控对旱区膜下滴灌马铃薯土壤有机碳、微生物量及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(02): 52-66.
LI Sheng, ZHU Yin hao, YIN Juan, YANG Ying pan, FAN Jia yang, LI Dong yu. Effects of irrigation-biochar regulation on soil organic carbon, microbial biomass and yield of potato under mulched drip irrigation in arid area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 52-66.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.05

水炭调控对旱区膜下滴灌马铃薯土壤有机碳、微生物量及产量的影响

李升¹ 朱银浩¹ 尹娟^{1,2,3*} 杨莹攀⁴ 范家杨¹ 李东宇¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021;

2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程中心, 银川 750021;

3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021;

4. 宁夏回族自治区水利科学研究院, 银川 750021)

摘 要 为揭示水炭调控对土壤质量和马铃薯产量的影响, 于2024年5—10月在宁夏中部旱区开展膜下滴灌试验, 以‘宁薯19号’马铃薯为试材, 采用完全随机区组试验设计, 设置1 260 (W_1)、1 680 (W_2)、2 100 m^3/hm^2 (W_3) 3个灌溉处理和5 (B_1)、15 (B_2)、25 t/hm^2 (B_3) 3个生物炭处理, 以当地不灌溉且不施加生物炭为对照 (CK), 共计10个处理, 测定不同水炭处理下土壤有机碳 (SOC)、易氧化有机碳 (ROC)、可溶性有机碳 (DOC)、颗粒有机碳 (POC)、微生物量碳 (MBC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK) 及产量等指标, 并分析灌溉量、生物炭施用量与土壤有机碳及其组分、微生物量、养分及产量的关系, 同时基于随机森林和结构方程模型识别影响马铃薯产量的关键驱动因子。结果表明: 1) 0—20 cm 土层, 水炭调控处理能够显著增加土壤有机碳及其组分含量 ($P < 0.05$), 其中 W_2B_3 的土壤有机碳 (SOC)、易氧化有机碳 (ROC)、颗粒有机碳 (POC) 和微生物量碳 (MBC) 表现最优, 与 CK 相比分别增加 75.55%、73.99%、79.74% 和 80.91%, 而可溶性有机碳 (DOC) 以 W_2B_2 表现最优, 比 CK 增加 80.18%。2) 相同灌溉条件下, 土壤碳库管理指数由高到低均为 $B_3 > B_2 > B_1$; 相同生物炭条件下, 随着灌溉量的增加土壤碳库管理指数呈先增加后减小的趋势。3) 不同水炭调控均可不同程度提高土壤质量指数 (SQI)。根据计算结果和土壤综合肥力等级, 将 W_2B_2 、 W_2B_3 、 W_3B_3 划分为二级。4) 结构方程模型结果显示, 灌溉是影响马铃薯产量的关键驱动因子, 生物炭主要通过提高土壤有机碳、养分及微生物量间接影响马铃薯产量。综上, 灌溉量 1 680 m^3/hm^2 结合生物炭施用量 15 t/hm^2 (W_2B_2) 为宁夏中部旱区膜下滴灌马铃薯生产的最佳水炭策略。

关键词 生物炭; 马铃薯; 土壤有机碳; 土壤质量; 产量; 灌溉量

中图分类号 S19

文章编号 1007-4333(2026)02-0052-15

文献标志码 A

Effects of irrigation-biochar regulation on soil organic carbon, microbial biomass and yield of potato under mulched drip irrigation in arid area

LI Sheng¹, ZHU Yin hao¹, YIN Juan^{1,2,3*}, YANG Ying pan⁴, FAN Jia yang¹, LI Dong yu¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China;

3. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China;

4. Hydraulic Research Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China)

收稿日期: 2025-04-13; 接受日期: 2025-06-20

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金(2024AAC03124); 宁夏高等学校一流学科(水利工程)建设项目(NXYLXK2021A03)

第一作者: 李升 (ORCID: 0009-0007-0592-3532), 硕士研究生, E-mail: 513926526@qq.com

通讯作者: 尹娟 (ORCID: 0000-0002-4109-6075), 教授, 主要从事水肥资源高效利用研究, E-mail: yj71115@126.com

Abstract To investigate the effects of irrigation and biochar regulation on soil quality and potato yield, a drip irrigation experiment under plastic mulch was conducted in central arid area of Ningxia from May to October 2024, using ‘Ningshu 19’ potato as the test material. A completely randomized block design was adopted with three irrigation treatments of 1 260 (W_1), 1 680 (W_2), and 2 100 m^3/hm^2 (W_3), and three biochar treatments of 5 (B_1), 15 (B_2), and 25 t/hm^2 (B_3), with a local non-irrigated and non-biochar treatment as the control (CK), totaling ten treatments. Soil indicators including soil organic carbon (SOC), readily oxidizable organic carbon (ROC), dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC), microbial biomass carbon (MBC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), and potato yield were determined under different irrigation and biochar treatments. The relationships among irrigation amount, biochar application rate, soil organic carbon and its fractions, microbial biomass properties, nutrient contents, and yield were analyzed. In addition, the key driving factors influencing potato yield were identified based on Random Forest and structural equation modeling. The results showed that: 1) In the 0–20 cm soil layer, irrigation and biochar regulation treatments significantly increased soil organic carbon (SOC) and its fractions ($P < 0.05$). Compared to the control (CK), the W_2B_3 treatment achieved the highest levels of SOC, ROC, POC, and MBC, with increases of 75.55%, 73.99%, 79.74%, and 80.91%, respectively. The highest content of DOC was observed under the W_2B_2 treatment, which was 80.18% higher than that of CK. 2) Under the same irrigation conditions, the soil carbon pool management index decreased in the order of $B_3 > B_2 > B_1$. Under the same biochar conditions, the carbon pool management index showed a trend of first increasing and then decreasing with increasing irrigation amount. 3) Different combinations of irrigation and biochar application improved the soil quality index to varying degrees. Based on the calculated results and the classification of comprehensive soil fertility levels, treatments W_2B_2 , W_2B_3 , and W_3B_3 were categorized as grade II. 4) The results of the structural equation model showed that irrigation was the key driving factor affecting potato yield, while biochar influenced yield indirectly by enhancing soil organic carbon, nutrient contents, and microbial biomass. In summary, an irrigation rate of 1 680 m^3/hm^2 combined with a biochar application rate of 15 t/hm^2 (W_2B_2) was identified as the optimal irrigation and biochar strategy for potato production under mulch drip irrigation in the arid central region of Ningxia.

Keywords biochar; potato; soil organic carbon; soil quality; yield; irrigation capacity

宁夏中部旱区土质疏松、昼夜温差大、光热资源分布与马铃薯(*Solanum tuberosum*)生长发育所需环境条件同期,是马铃薯优势产区^[1]。但该地区缺乏科学的灌溉制度,加之长期重施氮肥导致土壤受损、肥力下降、作物减产等问题突出^[2-3]。近年来,为提升宁夏中部旱区作物产量和品质,科研人员围绕作物灌溉制度和减氮增效机制等方面开展了大量的研究^[4-5];然而,对受损土壤进行合理有效地修复和改良仍是目前面临的重要难题。因此,在减施氮肥的基础上,探索高效节水技术与土壤改良剂的协同作用,以提高土壤肥力、改善土壤生态环境,已成为该地区在农业生产过程中亟待解决的核心问题。

随着环境安全和固碳减排需求的不断提高,生物炭(biochar)作为环境友好型土壤改良剂进入大众视野^[6],它是由生物质在缺氧条件下经过高温转化而成,是一种富含碳素的多孔固体颗粒物质。因其能够提高土壤肥力^[7]、增加土壤碳汇及延缓全球

气候变暖^[8]而成为众多学者关注的热点。土壤活性有机碳是土壤有机碳库的重要组成部分,是土壤肥力综合评价的关键因子^[9],其含量的高低直接影响土壤微生物的活性,进而影响土壤碳汇功能及温室气体的排放^[10]。据报道,添加生物炭后,土壤总有机碳和活性有机碳组分含量显著增加,并可提高微生物活性,从而促进土壤养分矿化与循环^[11]。随着土壤有机碳含量的增加,土壤碳氮比(C/N)也相应提高,这有助于促进土壤养分循环及土壤保持养分的能力,进而提高土壤肥力^[12]。此外,纪仁静等^[13]在北亚热带和中亚热带过渡地区探究节水灌溉耦合生物炭对土壤有机碳的影响时发现,节水灌溉条件下,有机碳含量与生物炭施用量呈正相关。杨威等^[14]研究表明,旱区膜下滴灌结合生物炭可不同程度提升耕层土壤有机质和速效氮含量,并可有效改善玉米的水氮利用效率。同时,生物炭施入土壤后能够提升土壤保水保肥效率,进而提高作物产量^[15-16]。已有研究表明,添加生物炭可以显著提高

土壤养分及土壤综合肥力,且土壤肥力提升效果与生物炭施用量呈正比^[17]。

目前关于土壤有机碳对生物炭单施或有机无机配施的响应机制已形成较完善的研究体系。然而水炭调控对土壤有机碳、养分及微生物量协同效应的研究鲜见报道。本研究以‘宁薯19号’马铃薯为试材,采用二因素完全随机区组试验设计,通过测定土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、微生物量碳(MBC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)及产量等指标,结合土壤质量评价体系明确该地区土壤质量状况,并基于随机森林和结构方程模型识别影响马铃薯产量的关键驱动因子,旨在揭示水炭调控对旱区膜下滴灌马铃薯农田土壤质量和产量的影响规律,以期缓解宁夏旱区土壤退化和实现马铃薯的绿色生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于2024年5月1日—10月1日在宁夏中部旱区同心县预旺镇南塬村(36°47′53″N, 106°21′59″E,海拔1560 m)进行,该地区属于温带大陆性气候,年平均气温9.1℃,年平均降雨量260 mm,年蒸发量2052 mm,降雨量相对较少且集中在7—9月。2024年马铃薯生长季的日平均气温和降雨量见图1。试验区土壤类型为沙壤土,土壤pH为8.54,全氮为0.37 g/kg,全磷为0.68 g/kg,全钾为18.2 g/kg,有效磷为5.82 mg/kg,速效钾为137 mg/kg,有机碳为3.30 g/kg。生物炭购自天津博尔迈环保科技有限公司。生物炭基本性质:pH 5~7,固定碳含量 ≥ 50 g/100 g, Fe ≥ 2 g/100 g,比表面积 > 80 m²/g,全氮为2.05 g/kg、全磷为1.64 g/kg、全钾为6.27 g/kg。

1.2 试验设计

试验采用二因素完全随机区组试验设计,设置1260(W₁)、1680(W₂)和2100 m³/hm²(W₃)3个灌溉量处理,生物炭设置5(B₁)、15(B₂)和25 t/hm²(B₃)3个处理,以当地不灌溉且不施加生物炭为对照(CK)。试验小区长18 m,宽4 m,试验小区面积为72 m²,周围布置隔离行和保护行。试验共设置10个处理,各处理3次重复,合计30个试验小区。马铃薯于2024年5月1日播种,10月1日收获,供试

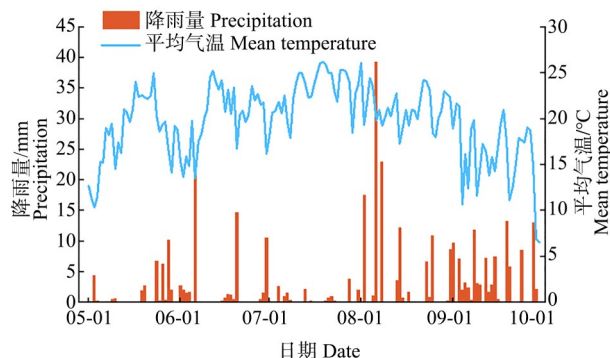


图1 2024年马铃薯生长季的日平均气温及降雨量

Fig. 1 The daily average air temperature and precipitation during the 2024 potato growing season

品种为‘宁薯19号’,马铃薯种植密度为4000株/667 m²,株距为35 cm,行距为50 cm。本试验采用膜下滴灌方式,根据当地种植习惯,采用“1膜2行”的种植模式。膜宽为1.4 m(聚乙烯塑料地膜),膜厚为0.6 mm,所用滴灌带为内镶贴片式,其内径为16 mm,额定工作压力为0.1 Mpa,滴头流量为2.0 L/h,滴头间距为30 cm。

生物炭在翻耕后旋耕前一次性施入。基于宁夏马铃薯种植规程^[18],明确减施化肥10%条件下的氮、磷、钾肥配比,供试肥料包括尿素(N ≥ 46 g/100 g)、过磷酸钙(P₂O₅ ≥ 12 g/100 g)和硫酸钾(K₂O ≥ 52 g/100 g),折算后纯氮、磷、钾总施肥量分别为N 156 kg/hm²、P₂O₅ 80 kg/hm²、K₂O 140 kg/hm²,均于播前统一基施,基施肥采用人工撒施的方式。其他田间管理措施与当地生产习惯一致。

1.3 样品采集及测试

1.3.1 样品采集

于2024年10月1日,在马铃薯成熟期时采用S型取样法进行取样。在各试验小区内选取5个具有代表性样点,采集0—20和 > 20 —40 cm土壤样品,将同层样品混匀作为1个样品,迅速带回实验室进行预处理。部分样品放置4℃条件下保存,用于测定土壤可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)等。其余样品自然风干后,用于测定颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)、全氮(TN)等。

1.3.2 指标测定

土壤全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)分别采用半微量凯氏法测定、碱溶法-钼锑抗比色法、NaOH碱熔-火焰光度计法测定^[19];土壤微生物量氮

(MBN)和微生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸-浸提法测定^[19]。土壤有机碳(SOC)采用高温外加热重铬酸钾氧化法测定;MBC采用氯仿熏蒸浸提法测定;ROC采用0.333 mol/L KMnO₄氧化法测定;DOC采用0.5 mol/L K₂SO₄浸提法测定,POC采用偏磷酸钠浸提法测定^[20]。

1.4 数据计算及分析

1.4.1 碳库管理指数

碳库管理指数能够反映土壤有机碳组分的变化情况,其计算方法如下^[21]:

$$\text{碳库指数(CPI)} = \frac{\text{土壤有机碳}}{\text{对照土壤有机碳}} \quad (1)$$

$$\text{碳库活度(L)} = \frac{\text{土壤活性有机碳}}{\text{总有机碳} - \text{土壤活性有机碳}} \quad (2)$$

$$\text{LI} = \frac{L}{L_{\text{CK}}} \quad (3)$$

$$\text{CPMI} = \text{CPI} \times \text{LI} \times 100 \quad (4)$$

式中:LI为碳库活度指数; L_{CK} 为对照碳库活度;CPMI为碳库管理指数。

1.4.2 土壤肥力综合评价指数

以土壤有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)、全氮(TN)等数据,采用主成分分析、相关性分析结合Norm构建最小数据集(MDS),筛选出最能反映土壤质量状况的指标,进一步确定其隶属度值和指标权重,再根据模糊数学中的加权乘法原则,计算土壤质量综合指数(SQI),计算公式如下^[4]:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n R_i Q_i \quad (5)$$

式中: R_i 为指标权重,通过客观法主成分分析确定,将所有参评指标进行主成分分析,各指标的公因子方差与所有指标公因子方差和的比值为该指标的权重值;隶属度值(Q_i)通过S型隶属度函数计算:

$$F(x) = \begin{cases} 1, (x \geq x_2) \\ 0.1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \cdot 0.9, (x_2 > x > x_1) \\ 0.1, (x \leq x_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为实测指标, x_1, x_2 表示该指标下限值和上限值。依据等间距原则将土壤质量等级划分为五级,其中,一级为 $>0.8 \sim 1.0$ 、二级为 $>0.6 \sim 0.8$ 、三级为 $>0.4 \sim 0.6$ 、四级为 $>0.2 \sim 0.4$ 、五级为 $0 \sim 0.2$,土壤质量等级越高,土壤肥力越高^[17]。

1.5 数据处理

采用Excel 2019进行数据整理与分析,IBM SPSS Statistics 27.0进行方差分析与主成分分析,Origin 2021和R(4.4.1)进行绘图,R建立随机森林模型和结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 水炭调控对膜下滴灌马铃薯土壤有机碳及其组分的影响

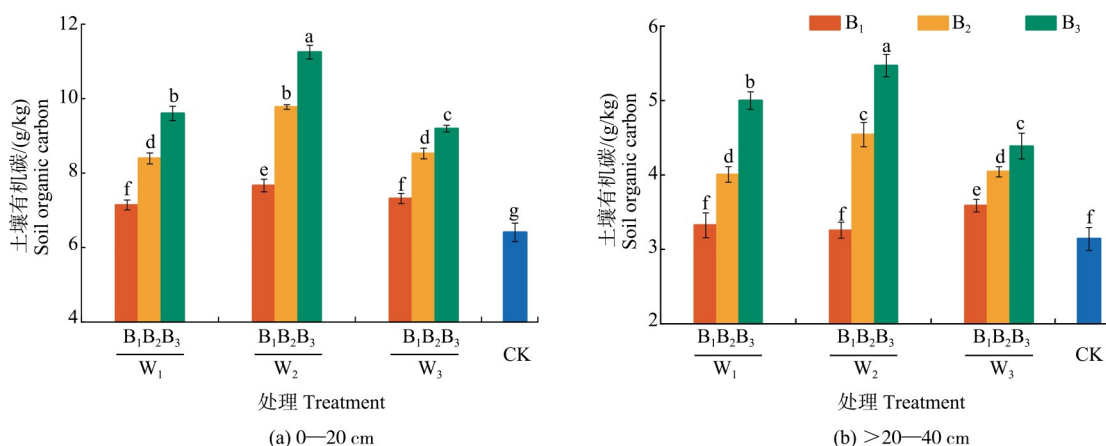
2.1.1 对土壤有机碳的影响

由图2可知,不同灌溉量、生物炭施用量处理及二者互作对膜下滴灌马铃薯不同土层的土壤有机碳(SOC)含量均有极显著影响($P < 0.01$),SOC随着土层深度的增加而降低,且不同土层各灌溉量、生物炭施用量处理的SOC均显著高于不灌溉且不施加生物炭的对照(CK)($P < 0.05$)。0—20和>20—40 cm土层,在1 260(W_1)、1 680(W_2)和2 100 m^3/hm^2 (W_3)水平下,各生物炭施用量处理的SOC由高到低均表现为25(B_3)>15(B_2)>5 t/hm^2 (B_1);各土层灌溉量1 680 m^3/hm^2 、生物炭施量25 t/hm^2 (W_2B_3)处理均表现最优,分别比CK增加了75.55%(0—20 cm)和74.10%(>20—40 cm)。

2.1.2 对土壤有机碳组分的影响

由图3可知,不同灌溉量处理对膜下滴灌马铃薯0—20 cm土层的易氧化有机碳(ROC)含量有极显著影响($P < 0.01$),对>20—40 cm土层的ROC有显著影响($P < 0.05$)。不同生物炭施用量处理对各土层的ROC均有极显著影响($P < 0.01$),而二者互作对各土层的ROC均无显著影响;0—20 cm土层,同一灌溉水平下,各生物炭施用量处理的ROC由高到低均表现为25(B_3)>15(B_2)>5 t/hm^2 (B_1)。不同灌溉处理下, B_1 的ROC与CK无显著差异。>20—40 cm土层的各处理均显著高于CK($P < 0.05$),其中灌溉量1 680 m^3/hm^2 、生物炭施量25 t/hm^2 的处理(W_2B_3)表现最优,比CK高57.3%。

由图4可知,不同灌溉量处理和不同灌溉量、生物炭施用量互作对膜下滴灌马铃薯0—20 cm土层的可溶性有机碳(DOC)含量均有极显著影响($P < 0.01$),不同生物炭施用量处理对0—20 cm土层的DOC有极显著影响($P < 0.01$),对>20—40 cm土



W₁、W₂、W₃分别为1 260、1 680和2 100 m³/hm² 3个灌溉处理；B₁、B₂、B₃分别为5、15和25 t/hm² 3个生物炭处理；CK为当地不灌溉不施加生物炭处理的对照。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

W₁、W₂、W₃ represent three irrigation treatments with water application rates of 1 260, 1 680, and 2 100 m³/hm², respectively; B₁, B₂, and B₃ represent three biochar application treatments at rates of 5, 15, and 25 t/hm², respectively. CK refers to the local control treatment without irrigation and biochar application. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below.

图2 不同水炭处理的土壤有机碳(SOC)含量

Fig. 2 Soil organic carbon (SOC) content under different irrigation and biochar treatments

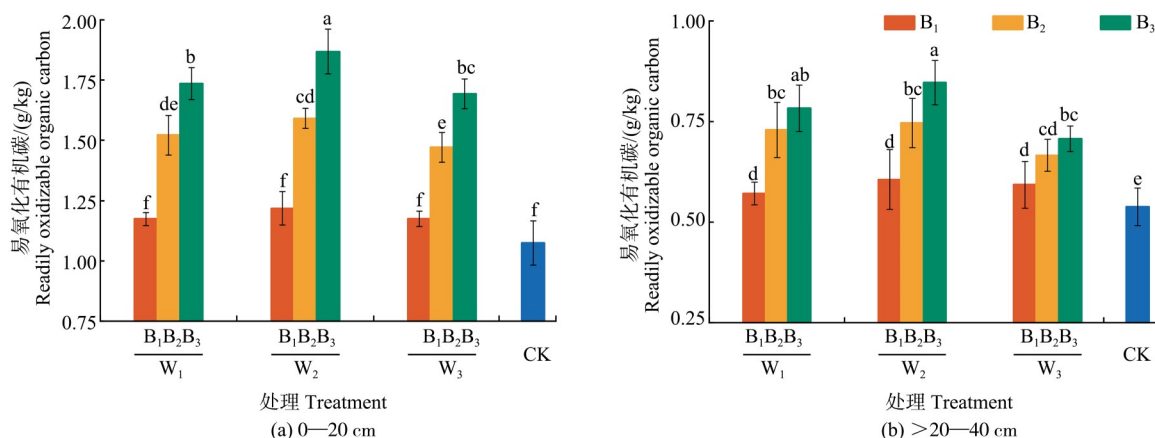


图3 不同水炭处理的土壤易氧化有机碳(ROC)含量

Fig. 3 Soil readily oxidizable organic carbon (ROC) content under different irrigation and biochar treatments

层的DOC有显著影响(P<0.05)。0—20 cm土层,灌溉量为1 260 m³/hm²(W₁),DOC随着生物炭施用量的增加而增加,而灌溉量为1 680(W₂)和2 100 m³/hm²(W₃),DOC随着生物炭施用量的增加呈先增加后减小的趋势。各处理>20—40 cm土层的DOC含量范围为37.39~48.26 g/kg,其中灌溉量1 680 m³/hm²配施生物炭15 t/hm²处理(W₂B₂)表现最优,较CK增加25.62%(P<0.05),见图4(b)。

由图5可知,不同灌溉量和生物炭施用量处理对膜下滴灌马铃薯各土层的颗粒有机碳(POC)含量均有极显著影响(P<0.01),二者互作对0—20 cm土层的POC无显著影响,对>20—40 cm土层的POC有显著影响(P<0.05)。总体而言,同一

灌溉水平下,0—20和>20—40 cm土层的POC均随着生物炭施用量的增加而增加,且不同生物炭用量处理间差异达显著水平(P<0.05)。0—20和>20—40 cm土层各处理的POC均高于CK,其中0—20 cm土层增加了17.46%~79.74%,>20—40 cm土层增加了13.93%~75.65%。

由图6可知,不同灌溉量和生物炭施用量处理对膜下滴灌马铃薯各土层的微生物量碳(MBC)含量均有极显著影响(P<0.01),二者互作对0—20 cm土层的MBC无显著影响,对>20—40 cm土层的MBC有极显著影响(P<0.01)。同一灌溉水平下,0—20 cm土层的MBC由高到低均表现为25(B₃)>15(B₂)>5 t/hm²(B₁);各生物炭处理下,W₂的MBC

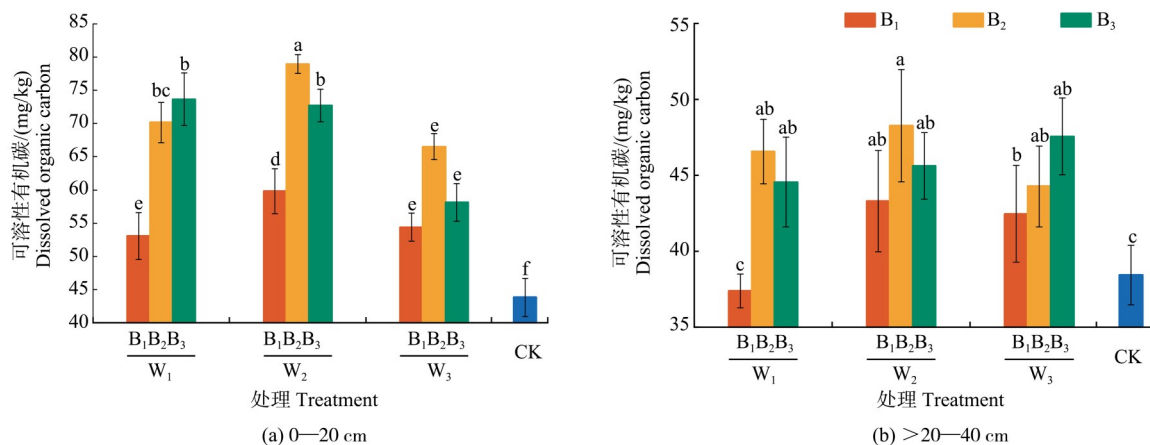


图4 不同水炭处理的土壤可溶性有机碳(DOC)含量

Fig. 4 Soil dissolved organic carbon (DOC) content under different irrigation and biochar treatments

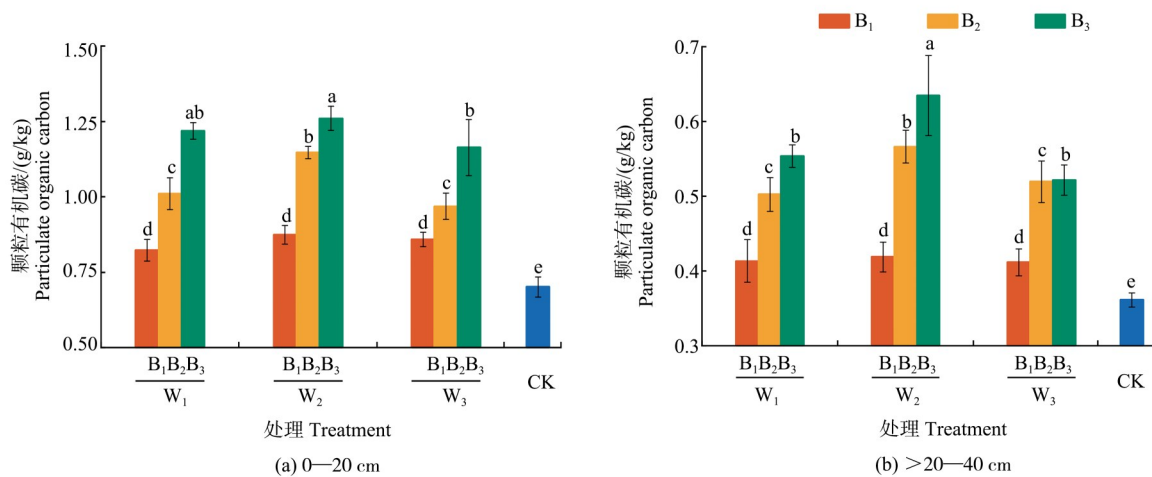


图5 不同水炭处理的土壤颗粒有机碳(POC)含量

Fig. 5 Soil particulate organic carbon (POC) content under different irrigation and biochar treatments

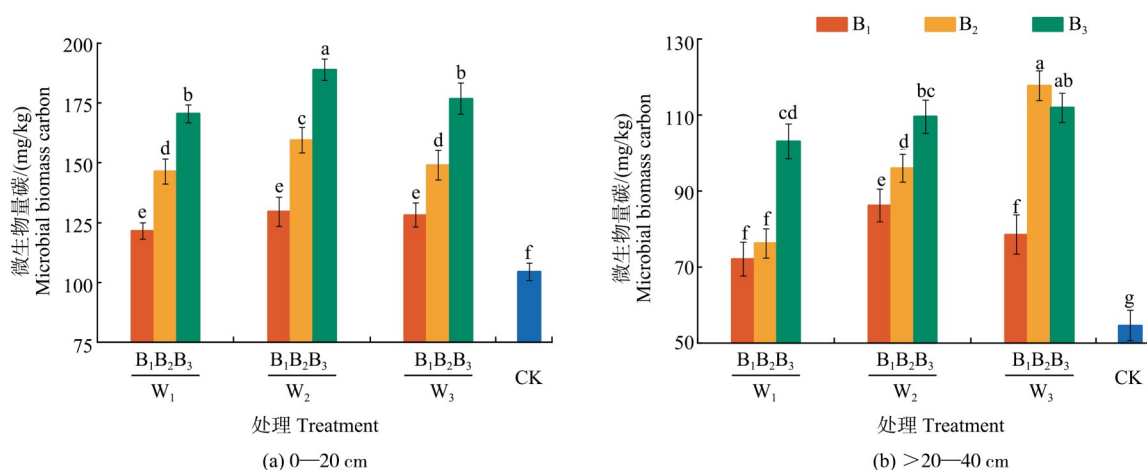


图6 不同水炭处理的土壤微生物量碳(MBC)含量

Fig. 6 Soil microbial biomass carbon (MBC) content under different irrigation and biochar treatments

显著高于其他灌溉处理($P<0.05$),其中灌溉量 $1\,680\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、生物炭施量 $25\text{ t}/\text{hm}^2$ 处理(W_2B_3)表现最优,其MBC为 $189\text{ mg}/\text{kg}$ 。 $>20\text{—}40\text{ cm}$ 土层, W_3 的MBC随着生物炭施用量的增加呈先增后减趋势,灌溉量 $2\,100\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、生物炭施量 $15\text{ t}/\text{hm}^2$ 处理(W_3B_2)表现最优,其MBC为 $117\text{ mg}/\text{kg}$ 。

2.2 水炭调控对膜下滴灌马铃薯土壤碳库管理指数(CPMI)的影响

由表1可知,不同生物炭施用量处理对膜下滴

灌马铃薯0—20 cm土层的碳库管理指数(CPMI)有极显著影响($P<0.01$),对 $>20\text{—}40\text{ cm}$ 土层的CPMI有显著影响($P<0.05$),不同灌溉量处理及二者互作对各土层的CPMI均无显著影响。同一灌溉处理0—20 cm土层的CPMI由高到低均表现为 $25(B_3)>15(B_2)>5\text{ t}/\text{hm}^2(B_1)$,呈现随着生物炭施用量增加而增加的趋势。而随着灌溉量的增加, B_2 和 B_3 处理的CPMI由高到低均表现为 $1\,680(W_2)>1\,260(W_1)>2\,100\text{ m}^3/\text{hm}^2(W_3)$ 。

表1 不同水炭调控的土壤碳库管理指数(CPMI)

Table 1 Soil carbon pool management index (CPMI) under different irrigation and biochar regulation treatments

灌溉水平 Irrigation treatment	生物炭处理 Biochar treatment	土层/cm Soil layer	碳库指数 Carbon pool index	碳库活度 Carbon pool activity	碳库活度指数 Carbon pool activity index	碳库管理指数 Carbon pool management index
W_1	B_1	0—20	1.12 ± 0.02^d	0.44 ± 0.03^{bc}	1.02 ± 0.12^a	113.92 ± 11.09^c
		$>20\text{—}40$	1.06 ± 0.06^f	0.49 ± 0.04^a	1.07 ± 0.14^a	112.96 ± 14.49^b
	B_2	0—20	1.31 ± 0.03^c	0.49 ± 0.02^{ab}	1.15 ± 0.21^a	150.94 ± 24.57^{abc}
		$>20\text{—}40$	1.28 ± 0.08^{de}	0.54 ± 0.14^a	1.16 ± 0.33^a	146.87 ± 33.94^{ab}
	B_3	0—20	1.50 ± 0.08^b	0.51 ± 0.03^a	1.19 ± 0.14^a	177.28 ± 12.82^{ab}
		$>20\text{—}40$	1.60 ± 0.10^b	0.43 ± 0.02^a	0.93 ± 0.15^a	147.43 ± 17.22^{ab}
W_2	B_1	0—20	1.20 ± 0.06^d	0.42 ± 0.00^c	1.00 ± 0.17^a	118.68 ± 13.42^c
		$>20\text{—}40$	1.04 ± 0.08^f	0.55 ± 0.01^a	1.20 ± 0.22^a	123.44 ± 15.67^{ab}
	B_2	0—20	1.53 ± 0.06^b	0.44 ± 0.03^{bc}	1.03 ± 0.20^a	156.83 ± 25.31^{abc}
		$>20\text{—}40$	1.45 ± 0.02^c	0.48 ± 0.11^a	1.03 ± 0.16^a	148.69 ± 23.94^{ab}
	B_3	0—20	1.76 ± 0.10^a	0.46 ± 0.04^{abc}	1.09 ± 0.30^a	189.65 ± 41.55^a
		$>20\text{—}40$	1.74 ± 0.07^a	0.47 ± 0.15^a	1.00 ± 0.26^a	175.80 ± 52.40^a
W_3	B_1	0—20	1.14 ± 0.05^d	0.43 ± 0.03^{bc}	1.03 ± 0.24^a	116.69 ± 21.31^c
		$>20\text{—}40$	1.14 ± 0.08^{ef}	0.46 ± 0.07^a	1.00 ± 0.20^a	113.65 ± 22.45^b
	B_2	0—20	1.33 ± 0.03^c	0.45 ± 0.03^{abc}	1.06 ± 0.13^a	140.91 ± 15.31^{bc}
		$>20\text{—}40$	1.29 ± 0.08^{de}	0.53 ± 0.14^a	1.16 ± 0.40^a	146.90 ± 42.46^{ab}
	B_3	0—20	1.44 ± 0.06^b	0.51 ± 0.04^a	1.19 ± 0.19^a	170.31 ± 20.73^{ab}
		$>20\text{—}40$	1.40 ± 0.12^{cd}	0.47 ± 0.06^a	1.02 ± 0.24^a	141.53 ± 21.56^{ab}
CK		0—20	1.00^e	0.43 ± 0.07^{bc}	1.00^a	100.00^d
		$>20\text{—}40$	1.00^f	0.47 ± 0.09^a	1.00^a	100.00^d

2.3 水炭调控对膜下滴灌马铃薯土壤微生物量的影响

2.3.1 对土壤微生物量氮的影响

由图7可知,不同灌溉量和生物炭施用量处理对膜下滴灌马铃薯不同土层的微生物量氮(MBN)含量有极显著影响($P<0.01$),二者互作对0—20和 $>20\text{—}40\text{ cm}$ 土层的MBN均有极显著影响($P<$

0.01)。与CK相比,灌溉量 $2\,100\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、生物炭施量 $15\text{ t}/\text{hm}^2$ 处理(W_3B_2)的0—20 cm土层的MBN含量显著升高,其增幅达 67.14% ($P<0.05$);而 $>20\text{—}40\text{ cm}$ 土层的灌溉量 $1\,680\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、生物炭施量 $25\text{ t}/\text{hm}^2$ 处理(W_2B_3)表现最优,MBN含量为 $26.33\text{ mg}/\text{kg}$,比CK高 53.20% 。

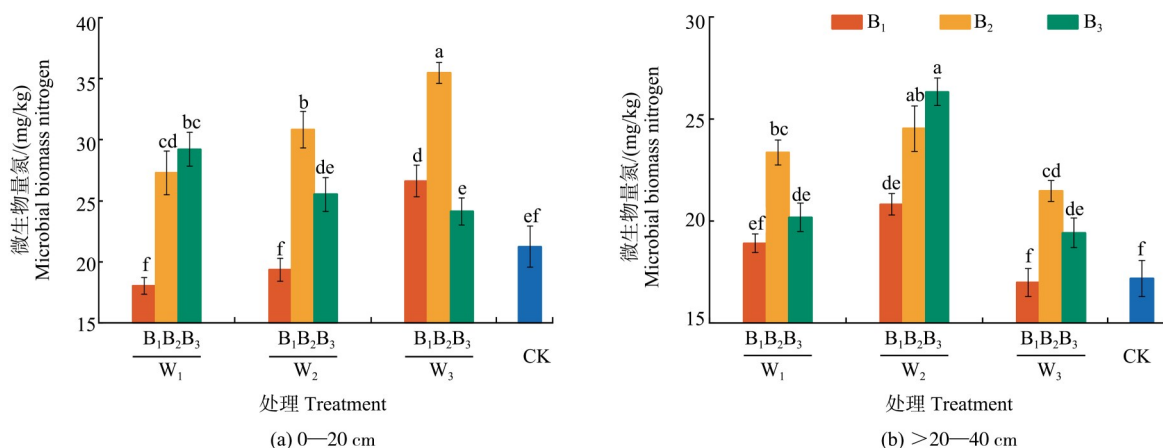


图7 不同水炭处理的土壤微生物量氮(MBN)含量

Fig.7 Soil microbial biomass nitrogen (MBN) content under different irrigation and biochar treatments

2.3.2 对土壤微生物量磷的影响

由图8可知,不同灌溉量和生物炭施用量处理对膜下滴灌马铃薯0—20 cm土层的微生物量磷(MBP)含量均有极显著影响($P < 0.01$),对>20—40 cm土层的MBP无显著影响,二者互对各土层的MBP有显著影响($P < 0.05$)。不同水炭处理0—20 cm土层的MBP均显著高于CK,其中灌溉量

1 680 m³/hm²、生物炭施用量15 t/hm²处理(W₂B₂)的表现最优,灌溉量2 100 m³/hm²、生物炭施用量15 t/hm²处理(W₃B₂)次之,MBP含量分别为1.48、1.38 mg/kg,分别较CK增加了67.50%、56.10%。B₂(15 t/hm²)、B₃(25 t/hm²)水平下,随着灌溉量的增加,0—20和>20—40 cm土层的MBP均呈先增后减的趋势。

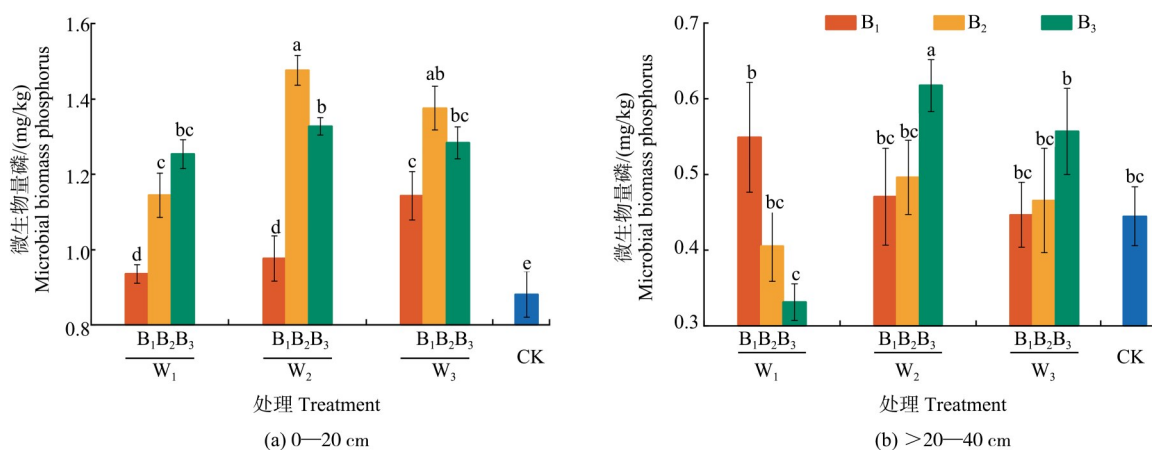


图8 不同水炭处理的土壤微生物量磷(MBP)含量

Fig. 8 Soil microbial biomass phosphorus (MBP) content under different irrigation and biochar treatments

2.4 水炭调控对膜下滴灌马铃薯土壤养分的影响

由表2可知,不同灌溉量对膜下滴灌马铃薯土壤全氮(TN)和全磷(TP)含量无显著影响,对全钾(TK)含量的影响显著($P < 0.05$),对土壤碳氮比(C/N)的影响极显著($P < 0.01$);不同生物炭施用量处理对TN、TK及C/N的影响极显著

($P < 0.01$),对TP的影响显著($P < 0.05$);二者互作仅对TP的影响极显著($P < 0.01$);相同灌溉条件下,各生物炭施用量处理的,TN、TK、C/N均表现为25(B₃)>15(B₂)>5 t/hm²(B₁);相同生物炭施用量条件下,随着灌溉量的增加TN、TP、TK及C/N均呈先增加后减小的趋势;整体而言,节水灌溉配合施用生物炭有利于土壤养分的积累。

表2 不同水炭处理的土壤养分含量和碳氮比(C/N)

Table 2 Soil nutrients and C/N ratio under different irrigation and biochar treatments

灌溉水平 Irrigation treatment	生物炭处理 Biochar treatment	全氮/(g/kg) TN	全磷/(g/kg) TP	全钾/(g/kg) TK	碳氮比 C/N
W ₁	B ₁	0.48±0.03 ^d	0.80±0.04 ^e	18.38±0.76 ^e	14.88±0.54 ^e
	B ₂	0.52±0.03 ^{bcd}	0.88±0.02 ^b	20.25±0.88 ^{de}	16.26±0.66 ^{bc}
	B ₃	0.56±0.01 ^{ab}	0.93±0.05 ^{ab}	24.74±1.26 ^{ab}	17.24±0.78 ^{ab}
W ₂	B ₁	0.50±0.01 ^{cd}	0.81±0.03 ^e	19.70±1.03 ^{de}	15.23±0.49 ^e
	B ₂	0.54±0.05 ^{bc}	0.92±0.05 ^{ab}	21.72±0.92 ^{cd}	18.28±1.53 ^a
	B ₃	0.60±0.03 ^a	0.96±0.03 ^a	25.66±0.94 ^a	18.72±1.05 ^a
W ₃	B ₁	0.49±0.02 ^{cd}	0.95±0.03 ^{ab}	19.40±1.06 ^e	14.85±0.45 ^e
	B ₂	0.54±0.04 ^{bc}	0.90±0.05 ^{ab}	23.11±1.70 ^{bc}	15.71±1.05 ^{bc}
	B ₃	0.57±0.01 ^{ab}	0.81±0.03 ^e	25.09±1.57 ^{ab}	16.21±0.35 ^{bc}
CK		0.44±0.03 ^e	0.78±0.03 ^d	18.16±1.15 ^e	14.57±0.99 ^e

2.5 土壤肥力综合指数评价

选取土壤有机碳及其组分、土壤微生物量和土壤养分等10项相关指标进行主成分分析(表3),提取特征值>1的2个主成分,累计方差贡献率为92.92%,说明主成分能够较好地解释土壤各项指标的变异特征。根据主成分载荷矩阵将10项土壤指标分为2组,

每组中满足Norm最高值10%范围内(>2.51)的指标纳入最小数据集。结合相关性分析,去除相关系数绝对值≥0.5的指标,最终确定土壤有机碳(SOC)、全磷(TP)、微生物量碳(MBC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)、全氮(TN)、全钾(TK)和可溶性有机碳(DOC)8个指标进行土壤质量综合评价。

表3 土壤质量评价指标主成分分析及Norm计算结果

Table 3 Principal component analysis and Norm calculation results of soil quality evaluation indicators

指标 Index	主成分 Principal components		分组 Group	范数 Norm	指标 Index	主成分 Principal components		分组 Group	范数 Norm
	PC ₁	PC ₂				PC ₁	PC ₂		
SOC	0.98	-0.01	1	2.79	MBP	0.88	0.27	1	2.51
TP	0.98	-0.14	1	2.79	MBN	0.84	0.33	1	2.41
MBC	0.97	-0.11	1	2.77	DOC	-0.14	0.96	2	1.14
POC	0.97	0.10	1	2.77	特征值 Eigenvalue	8.06	1.23		
ROC	0.97	0.09	1	2.76	贡献率/% Contribution rate	80.58	12.34		
TN	0.96	-0.05	1	2.71	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	80.58	92.92		
TK	0.94	-0.27	1	2.68					

由图9可知,与CK相比,不同灌溉量和生物炭施用量处理均可显著提高土壤质量指数(SQI) ($P<0.05$)。各处理的SQI由高到低为 $W_2B_3>W_3B_3>W_2B_2>W_1B_3>W_3B_2>W_1B_2>W_2B_1>W_3B_1>W_1B_1>$

CK。整体而言,SQI与生物炭施用量呈正比。根据土壤综合肥力等级标准, W_2B_2 、 W_2B_3 、 W_3B_3 为二级, W_1B_2 、 W_1B_3 、 W_3B_2 为三级, W_1B_1 、 W_2B_1 、 W_3B_1 为四级,CK为五级。

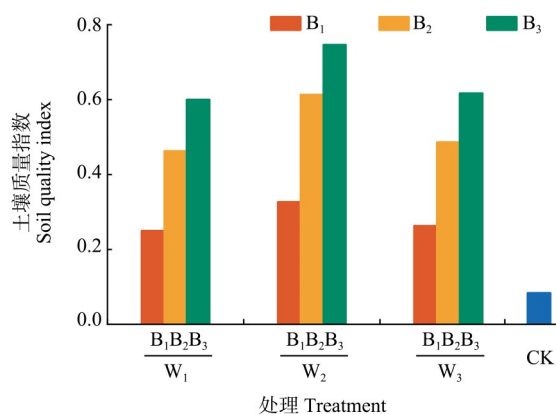


图9 不同水炭处理的土壤质量指数(SQI)

Fig. 9 Soil quality index (SQI) under different irrigation and biochar treatments

2.6 水炭调控对膜下滴灌马铃薯产量的影响

由图10可知,不同灌溉量、生物炭施用量处理及二者互作对膜下滴灌马铃薯产量均有极显著影响($P<0.01$)。整体而言,各水炭处理均可提高马铃薯产量,其中灌溉量 $2\ 100\ m^3/hm^2$ 、生物炭施量

$15\ t/hm^2$ 处理(W_3B_2)的产量最高,比CK高50.14%。不同灌溉量处理中, W_1 中 B_3 的产量表现最优,比CK高28.42%。而 W_2 中 B_2 的产量表现最优,比CK高44.03%。 B_1 、 B_2 和 B_3 处理中均以 W_3 的产量表现最优。

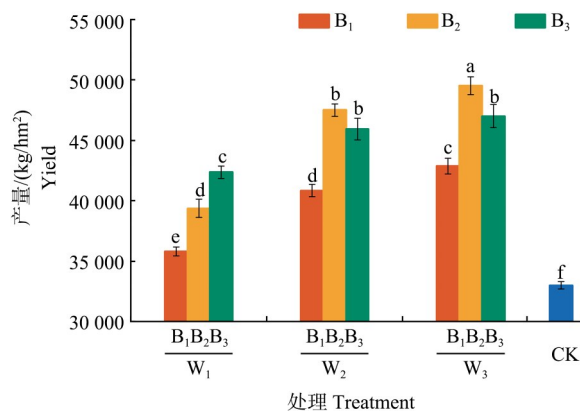


图10 不同水炭处理的膜下滴灌马铃薯产量

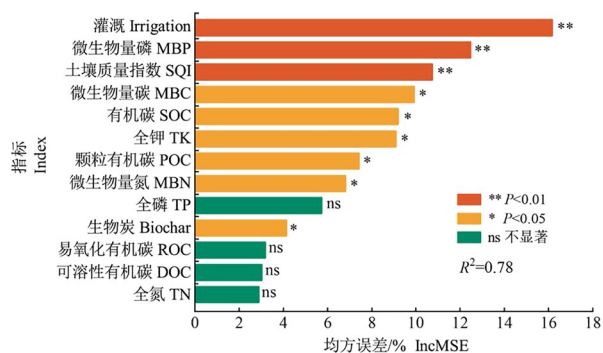
Fig.10 Potato yield under different irrigation and biochar treatments with mulch drip irrigation

由图11可知,灌溉量(irrigation)、微生物量磷(MBP)和土壤质量指数(SQI)均对膜下滴灌马铃薯产量有极显著影响($P<0.01$),微生物量碳(MBC)、有机碳(SOC)、全钾(TK)、颗粒有机碳(POC)、微生物量氮(MBN)以及生物炭(biochar)均对产量有显著影响($P<0.05$)。基于结构方程模型,以土壤有

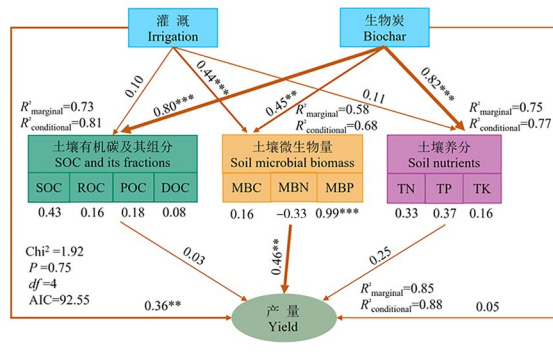
机碳及其组分、土壤微生物量、土壤养分为潜变量,产量、SOC、ROC、DOC等指标为观察变量,构建水炭-土壤-产量驱动模型,模型适配度指标 $Chi^2=1.92$; $P=0.75$, $df=4$, $AIC=92.55$,以上结果表明模型拟合较好,灌溉量、生物炭、土壤有机碳及其组分、土壤微生物量和土壤养分共同解释了产量

变化的88%;灌溉和生物炭分别解释了土壤有机碳及其组分、土壤微生物量、土壤养分变化的81%、

68%、77%。灌溉的直接作用对产量产生显著的正效应,生物炭对产量具有一定促进作用,但不显著。



(a) 随机森林模型结果 Random forest model results



(b) 结构方程模型结果 Structural equation modeling results

SOC, 土壤有机碳; ROC, 易氧化有机碳; POC, 颗粒有机碳; DOC, 可溶性有机碳; MBC, 微生物量碳; MBN, 微生物量氮; MBP, 微生物量磷; TN, 全氮; TP, 全磷; TK, 全钾。*表示显著相关 ($P < 0.05$); **表示极显著相关 ($P < 0.01$); ***表示极高显著相关 ($P < 0.001$); ns 表示不显著; 指示箭头上的数值表示标准化路径系数。

SOC, soil organic carbon; ROC, readily oxidizable carbon; POC, particulate organic carbon; DOC, dissolved organic carbon; MBC, microbial biomass carbon; MBN, microbial biomass nitrogen; MBP, microbial biomass phosphorus; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TK, total potassium. *, significant correlation ($P < 0.05$); **, highly significant correlation ($P < 0.01$); ***, extremely significant correlation ($P < 0.001$); ns, not significant. The values on the arrows represent standardized path coefficients.

图 11 随机森林模型与结构方程模型

Fig. 11 Random forest model and structural equation model

3 讨论

3.1 水炭调控对膜下滴灌马铃薯土壤有机碳及其组分的影响

土壤有机碳(SOC)在养分循环和保持、调节气候、提高作物产量等方面发挥重要作用^[22];本研究结果表明,水炭调控可显著提高SOC。首先,生物炭所含丰富的碳是SOC增加的主导因素^[12];其次,添加生物炭可导致马铃薯地上和地下部生物量增加,地上部凋落物、根系分泌物进入土壤,通过微生物分解,增加SOC;此外,灌溉能够通过改变土壤水分状况、作物生产力、微生物群落代谢,进而增加SOC^[23]。本试验表明,随着生物炭施用量的增加SOC呈增加趋势,这与张文丽等^[24]、牟芝熠等^[25]研究结果一致,而与Xu等^[8]的研究结果不一致,这主要归因于生物炭自身特性与制备条件^[6]、土壤特性^[12]以及气候条件^[26]等。灌溉量2 100 m³/hm²(W₃)的0—20 cm土层各生物炭处理的SOC均显著低于灌溉量1 680 m³/hm²(W₂),这与Yao等^[27]的研究结论相似。这可能是由于灌溉对土壤微生物活动、有机物分解的影响大于其对土壤碳输入的影响,从而减缓土壤有机碳的净积累^[28]。此外,在全

球范围内,灌溉通常会抑制土壤有机碳的含量,并支持灌溉减少土壤碳储量的理论^[27]。土壤活性碳组分可以反映土壤碳库的变化,直接影响土壤碳循环^[29]。土壤活性碳组分对环境因素十分敏感,尤其是受有机质的供应量、土壤水热条件及环境因素的影响显著^[30]。本试验结果表明,易氧化有机碳(ROC)、颗粒有机碳(POC)和微生物量碳(MBC)均随生物炭施用量的增加呈增加趋势,且各处理间差异显著,这是因为生物炭可有效改善土壤团聚体的形成和稳定性,土壤团聚体的增加有助于保护POC免于快速分解^[31];生物炭具有较大的比表面积和多孔结构的特性,可以通过保持水分和空气为微生物提供良好的栖息环境,同时为其生长提供碳源,有效促进微生物的活性和碳的利用效率^[32]。本试验中,添加5 t/hm²生物炭处理(B₁)的土壤可溶性有机碳(DOC)和碳氮比(C/N)均显著低于15(B₂)和25 t/hm²(B₃)施用量处理,表明可供微生物利用的碳源相对不足(图3和表2)。碳源不足的情况下,水分的增加无法有效驱动MBC的积累^[33]。

碳库管理指数(CPMI)有助于揭示土壤碳库变化对土壤管理措施的响应规律^[29]。一般而言,CPMI与土壤碳库的质量和数量均呈正比^[34]。本研

究结果表明,与对照(CK)相比,添加生物炭可不同程度提高CPMI,表明生物炭能够增强土壤碳储存和土壤养分的循环,进而促进土壤生态系统的健康可持续发展,这与Sun等^[35]的研究结果相一致。0—20 cm土层的CPMI高于>20—40 cm土层,这可能是由于0—20 cm土层为植物残体、根系分泌物和生物炭输入的主要区域^[36],进而间接驱动CPMI,而>20—40 cm土层主要依赖于表层有机碳的淋溶和迁移^[37],碳源供给相对较少^[38],限制了碳库活性和更新能力。

3.2 水炭调控对膜下滴灌马铃薯土壤微生物量及土壤质量的影响

土壤微生物量是土壤有机质、养分转化和循环的动力,它能够敏感地指示生态系统功能和土壤质量状况^[39]。水炭调控下,0—20 cm土层的微生物量氮(MBN)和微生物量磷(MBP)变化趋势基本一致;随着生物炭施用量的增加, W_2 、 W_3 的土壤MBN和MBP均呈先增后减的趋势,其中灌溉量 $1\ 680\ m^3/hm^2$ 、生物炭施量 $15\ t/hm^2$ (W_2B_2)和灌溉量 $2\ 100\ m^3/hm^2$ 、生物炭施量 $15\ t/hm^2$ (W_3B_2)的MBN均显著高于其他处理。一方面是由于适量的碳源补充有助于缓解土壤碳限制,促进微生物活性,进而提高MBN和MBP含量;另一方面,过量施用生物炭可能导致微生物间竞争加剧,抑制了微生物对氮、磷的吸收利用^[40]。本研究中>20—40 cm土层的MBP显著低于0—20 cm土层,这与土壤通气性和含氧量随土层深度增加而降低,导致微生物代谢缓慢有关^[41]。土壤质量评价是推动土壤可持续发展的重要途径^[42]。本研究基于模糊数学加权乘法原则,对宁夏中部旱区土壤状况进行诊断,结果表明,相同灌溉条件下,施加生物炭能够不同程度地提高土壤质量指数(SQI),且生物炭施用量越高,对土壤质量提升效果越显著,这与杨威等^[14]、刘慧等^[17]的研究结论相一致。

3.3 膜下滴灌马铃薯产量驱动模型

生物炭主要由碳素组成,同时富含氮、磷、钾等营养元素^[6]。施入土壤后,能够有效调节农田土壤养分平衡,促进作物对养分的吸收利用^[43],进而提高作物产量;它还能够通过改善土壤理化特性,优化土壤结构,提高土壤肥力,从而有效促进作物生长发育^[44]。已有研究表明,在节水灌溉条件下,添加生物炭后水稻产量比未添加生物炭的稻田高

24.43%^[45]。本研究发现,与CK相比,水炭调控处理可显著提高膜下滴灌马铃薯产量,但在 W_2 、 W_3 水平下,马铃薯产量随着生物炭施量的增加呈先增加后减少的趋势。这与Wang等^[46]的结论一致,说明产量对生物炭施用量的响应存在临界值。本研究中,添加 $15\ t/hm^2$ 的生物炭处理(B_2)比添加 $25\ t/hm^2$ 的处理(B_3)增产效果更显著,表明适量的生物炭施用量能够改善养分供应的动态平衡,从而促进作物生长;此外,过量施加生物炭可能会导致其吸附更多的可溶性养分,减少马铃薯对氮、磷、钾等关键养分的吸收,抑制马铃薯产量的提升。

马铃薯产量受多因子协同影响^[4,15]。本研究发现,灌溉是产量的直接控制因素,生物炭主要通过提高土壤有机碳及其组分、土壤微生物量和土壤养分间接影响马铃薯产量,其中土壤微生物量对产量贡献较大,而土壤有机碳及其组分对产量的贡献最小,这一方面是由于土壤有机碳及其组分的作用更多体现在改善土壤结构和促进微生物活性,并非直接为植株提供关键养分^[47];另一方面是添加生物炭后,土壤有机碳及其组分中的碳释放速率较慢,其对土壤肥力的提升需要长期的累积效应^[38]。

4 结 论

灌溉量为 $1\ 680\ m^3/hm^2$ 、生物炭施量 $15\ t/hm^2$ (W_2B_2)时,宁夏中部旱区膜下滴灌马铃薯0—20 cm土层的土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)、土壤质量指数(SQI)和产量比CK分别增加52.54%、48.17%、80.18%、15.08%和44.03%。相同灌溉条件下,随着生物炭施用量的增加土壤碳库管理指数(CPMI)呈增加趋势;相同生物炭条件下,CPMI随着灌溉量的增加呈先增加后减小的趋势。基于结构方程模型,灌溉对产量的贡献最大,生物炭主要通过土壤有机碳及其组分、土壤微生物量、土壤养分间接影响产量。因此,灌溉量 $1\ 680\ m^3/hm^2$ 配施生物炭 $15\ t/hm^2$ (W_2B_2)是宁夏中部旱区膜下滴灌马铃薯生产中最佳的水炭策略。

参考文献 References

- [1] 吴军斌,张文兵,宋成飞,李凤丽,李小莹.宁夏中部干旱区马铃薯最优灌溉制度研究现状与发展趋势[J].农业与技术,2022,42(6):90-92
Wu J B, Zhang W B, Song C F, Li F L, Li X Y. Research status and

- development trend of optimal irrigation system for potato in the central arid area of central Ningxia[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(6):90-92(in Chinese)
- [2] 郭鑫年, 周涛, 纪立东, 尹志荣, 梁锦秀, 孙娇, 金鑫, 马洪涛. 宁夏中部干旱带土壤肥力综合评价:以同心县为例[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15):66-73
Guo X N, Zhou T, Ji L D, Yin Z R, Liang J X, Sun J, Jin X, Ma H T. Comprehensive evaluation of soil fertility in the arid zone of central Ningxia: A case of Tongxin County[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(15):66-73(in Chinese)
- [3] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4):783-795
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):783-795 (in Chinese)
- [4] 杨莹攀, 尹娟, 朱银浩, 李升. 水氮调控对宁夏中部旱区马铃薯产量与土壤质量的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9):358-370, 458
Yang Y P, Yin J, Zhu Y H, Li S. Effect of water and nitrogen regulation on potato yield and soil quality evaluation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(9):358-370, 458(in Chinese)
- [5] 孙富斌, 尹娟, 魏小东, 马正虎, 杨莹攀, 王顺. 灌水和氮肥基追比对旱区马铃薯产量、水肥利用效率和酶活性影响评价[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 48-56
Sun F B, Yin J, Wei X D, Ma Z H, Yang Y P, Wang S. Comprehensive evaluation of effects of irrigation and nitrogen topdressing ratio on potato yield, water & fertilizer use efficiency and soil enzyme activity [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(1):48-56(in Chinese)
- [6] Zhang Y F, Wang J M, Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review [J/OL]. *CATENA*, (2021-03-18). DOI:doi.org/10.1016/j.catena.2021.105284
- [7] Ding Y, Liu Y G, Liu S B, Li Z W, Tan X F, Huang X X, Zeng G M, Zhou L, Zheng B H. Biochar to improve soil fertility: A review [J/OL]. *Agronomy for Sustainable Development*, (2016-05-31). DOI:doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z
- [8] Xu H, Cai A D, Wu D, Liang G P, Xiao J, Xu M G, Colinet G, Zhang W J. Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis[J/OL]. *Soil and Tillage Research*, (2021-07-01). DOI:doi.org/10.1016/j.still.2021.105125
- [9] 何伟, 王会, 韩飞, 胡国庆, 姜燕宏, 宋付朋, 潘红, 魏猛, 诸葛玉平. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. 土壤学报, 2020, 57(2):425-445
He W, Wang H, Han F, Hu G Q, Lou Y H, Song F P, Pan H, Wei M, Zhuge Y P. Effect of long-term application of organic manure expanding organic carbon fractions in fluvo-aquic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2):425-434(in Chinese)
- [10] Amelung W, Bossio D, de Vries W, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Amundson R, Bol R, Collins C, Lal R, Leifeld J. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy [J/OL]. *Nature Communications*, (2020-10-27). DOI:doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7
- [11] Abbas T, Rizwan M, Ali S, Adrees M, Mahmood A, Zia-Ur-Rehman M, Ibrahim M, Arshad M, Qayyum M F. Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148:825-833
- [12] Zhang N H, Ye X, Gao Y, Liu G X, Liu Z H, Zhang Q L, Liu E K, Sun S K, Ren X L, Jia Z K, Siddique K H M, Zhang P. Environment and agricultural practices regulate enhanced biochar-induced soil carbon pools and crop yield: A meta-analysis[J/OL]. *Science of the Total Environment*, (2023-09-23). DOI:doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167290
- [13] 纪仁婧, 胡梦阳, 和玉璞, 时元智, 宋皓晨, 冯政超. 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤养分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1):47-53
Ji R J, Hu M Y, He Y P, Shi Y Z, Song H C, Feng Z C. Effects of biochar amendment on bioavailable nutrients in paddy soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(1): 47-53(in Chinese)
- [14] 杨威, 屈忠义, 张如鑫, 杨旖璇, 贾咏霖, 高晓瑜, 高利华. 膜下滴灌制度与生物炭用量对玉米生长及水氮利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1):313-322
Yang W, Qu Z Y, Zhang R X, Yang Y X, Jia Y L, Gao X Y, Gao L H. Effects of drip-irrigation schedule under film-mulching and biochar amount on corn growth and water-nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):313-322(in Chinese)
- [15] 杨玲, 张富仓, 孙鑫, 张少辉, 王海东, Abdelghany Ahmed Elsayed, 陈占飞, 方玉川. 生物炭和滴灌量对陕北榆林沙土性质和马铃薯生长的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(3):221-233
Yang L, Zhang F C, Sun X, Zhang S H, Wang H D, Elsayed A, Chen Z F, Fang Y C. Effects of biochar and drip irrigation amounts on soil properties and growth of potato in blown-sand region of northern Yulin, Shaanxi province [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(3): 221-233(in Chinese)
- [16] 王小非, 寇长林, 李太魁, 骆晓声, 毛保民, 冀建华. 秸秆生物炭与炭基肥对冬小麦田氮挥发及小麦产量的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报, [2025-03-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1437.S.20250303.1734.002.html
Wang X F, Kou C L, Li T K, Luo X S, Mao B M, Ji J H. Effect of straw biochar and carbon-based fertilizer on ammonia volatilization and wheat yield in winter wheat field [J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, [2025-03-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1437.S.20250303.1734.002.html(in Chinese)
- [17] 刘慧, 焦岩, 窦婉毓, 张文龙, 裴巍. 减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9):391-401, 469
Liu H, Jiao Y, Dou W Y, Zhang W L, Pei W. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(9):391-401, 469 (in Chinese)
- [18] 宁夏回族自治区水利厅, 宁夏水利科学研究院. 宁夏滴灌工程规划设计导则和优势特色作物滴灌种植技术规程[M]. 银川:宁夏人民出版社, 2017
Ningxia Water Resources Department, Ningxia Institute of Water Resources Science. *Planning and Design Guidelines for Drip Irrigation Projects in Ningxia and Technical Regulations for Drip Irrigation Planting of Dominant Crops*[M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2017(in Chinese)
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2000
Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000(in Chinese)
- [20] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):252-259
Zhang F F, Yue S C, Li S Q. Chemical methods to determine soil organic

- carbon fractions and carbon indexes: A review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):252-259(in Chinese)
- [21] De Troyer I, Amery F, Van Moorleghem C, Smolders E, Merckx R. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ^{13}C labelled residue: A batch incubation study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3):513-519
- [22] Luo B L, Zhou J, Yao W, Wang Y X, Guillaume T, Yuan M, Han D W, Bilyera N, Wang L X, Zhao L, Yang Y D, Zeng Z H, Zang H D. Maize and soybean rotation benefits soil quality and organic carbon stock [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, (2024-11-16). DOI: doi. org/10.1016/j.jenvman.2024.123352
- [23] Ball K R, Malik A A, Muscarella C, Blankinship J C. Irrigation alters biogeochemical processes to increase both inorganic and organic carbon in arid-calcic cropland soils [J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, (2023-10-14). DOI:doi. org/10.1016/j.soilbio.2023.109189
- [24] 张文丽, 林启美, 李贵桐, 赵小蓉, 李彩斌, 文德峰, 王玉川, 刘燕翔, 何轶. 生物炭对两种植烟土壤活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 59-66
- Zhang W L, Lin Q M, Li G T, Zhao X R, Li C B, Wen D F, Wang Y C, Liu Y X, He Y. Effects of biochar on labile organic carbon in two tobacco growing soils [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(9):59-66(in Chinese)
- [25] 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平. 生物炭施用5 a后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(12):6869-6879
- Mou Z Y, Shen Y Y, Cao Y, Wang Z H, Chen Y S, Teng Q M, Huang K C, Mao X Y, Xu G P. Effects of biochar application on soil organic carbon component in *Eucalyptus* plantations after five years in northern Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12):6869-6879(in Chinese)
- [26] Tian L J, Shao G C, Gao Y, Song E Z, Lu J. Effects of biochar on soil organic carbon in relation to soil nutrient contents, climate zones and cropping systems: A Chinese meta-analysis [J/OL]. *Land*, (2024-10-03). DOI:doi. org/10.3390/land13101608
- [27] Yao X C, Zhang Z Y, Yuan F H, Song C C. The impact of global cropland irrigation on soil carbon dynamics [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2024-04-01). DOI:doi. org/10.1016/j.agwat.2024.108806
- [28] Arroita M, Causapé J, Comín F A, Díez J, Jimenez J J, Lacarta J, Lorente C, Merchán D, Muñiz S, Navarro E, Val J, Elosegi A. Irrigation agriculture affects organic matter decomposition in semi-arid terrestrial and aquatic ecosystems [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263:139-145
- [29] Ma L J, Lv X B, Cao N, Wang Z, Zhou Z G, Meng Y L. Alterations of soil labile organic carbon fractions and biological properties under different residue-management methods with equivalent carbon input [J/OL]. *Applied Soil Ecology*, (2021-02-24). DOI:doi. org/10.1016/j.apsoil.2020.103821
- [30] 黎嘉成, 高明, 田冬, 黄容, 徐国鑫. 秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5):39-50
- Li J C, Gao M, Tian D, Huang R, Xu G X. Effects of straw and biochar on soil organic carbon and its active components [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5):39-50(in Chinese)
- [31] Yuan X M, Ban G C, Luo Y B, Wang J R, Peng D J, Liang R, He T G, Wang Z T. Biochar effects on aggregation and carbon-nitrogen retention in different-sized aggregates of clay and loam soils: A meta-analysis [J/OL]. *Soil and Tillage Research*, (2024-11-25). DOI: doi. org/10.1016/j.still.2024.106365
- [32] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, Wimmer B, Soja G. Long-term effects of biochar on soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2016, 282:96-102
- [33] Manzoni S, Taylor P, Richter A, Porporato A, Ågren G I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1):79-91.
- [34] Yang X, Wang D, Lan Y, Meng J, Jiang L L, Sun Q, Cao D Y, Sun Y Y, Chen W F. Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4):1569-1578
- [35] Sun T, Gao G, Yang W H, Sun Y B, Huang Q Q, Wang L, Liang X F. High-efficiency remediation of Hg and Cd co-contaminated paddy soils by Fe-Mn oxide modified biochar and its microbial community responses [J/OL]. *Biochar*, (2024-06-05). DOI:doi. org/10.1007/s42773-024-00346-x
- [36] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, 8(3): 512-523
- [37] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle [J]. *Plant and Soil*, 338(1): 143-158
- [38] Fontaine S, Barot S, Barré P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply [J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-280
- [39] Chen Y L, Sun K, Yang Y, Gao B, Zheng H. Effects of biochar on the accumulation of necromass-derived carbon, the physical protection and microbial mineralization of soil organic carbon [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2024, 54(1):39-67
- [40] 王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5):2425-2433
- Wang Q, Geng Z C, Xu C Y, Guo J Y, Li Q Q, Liu L L, Zhao H H, Du X G. Effects of biochar application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in Lou soil [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2425-2433(in Chinese)
- [41] Wei L, Ge T D, Zhu Z K, Ye R Z, Peñuelas J, Li Y H, Lynn T M, Jones D L, Wu J S, Kuzyakov Y. Paddy soils have a much higher microbial biomass content than upland soils: A review of the origin, mechanisms, and drivers [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (2021-11-27). DOI:doi. org/10.1016/j.agee.2021.107798
- [42] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 李建辉, 任万平, 高中灵. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12):311-318
- Zhang W S, Li X X, Huang W J, Li J H, Ren W P, Gao Z L. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12):311-318(in Chinese)
- [43] Liu J, Jiang B S, Shen J L, Zhu X, Yi W Y, Li Y, Wu J S. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (2021-01-30). DOI:doi. org/10.1016/j.agee.2020.107286
- [44] Khan Z, Zhang K K, Khan M N, Zhu K M, Hu L Y. Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient

- utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 154: 127096
- [45] Chen X, Yang S H, Ding J, Jiang Z W, Sun X. Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation[J/OL]. *Water*, (2021-01-30). DOI:doi.org/10.3390/w13020209
- [46] Wang X F, Li Y, Wang H R, Wang Y Z, Biswas A, Wai Chau H, Liang J P, Zhang F C, Bai Y G, Wu S F, Chen J Y, Liu H G, Yang G, Pulatov A. Targeted biochar application alters physical, chemical, hydrological and thermal properties of salt-affected soils under cotton-sugarbeet intercropping[J/OL]. *Catena*, (2022-05-29). DOI: doi.org/10.1016/j.catena.2022.106414
- [47] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1-2):1-22

责任编辑:吕晓梅



第一作者简介:李升,宁夏大学土木与水利工程学院水利工程专业硕士研究生。2024年12月—2025年3月赴马来西亚彭亨大学交流学习。参与宁夏回族自治区自然科学基金项目(2024AAC03124)、宁夏高等学校一流学科(水利工程)建设项目(NXYLXK2021A03)等科研工作。荣获“工程与地理学部首届研究生创新学术论坛暨土木与水利工程学院第十六届研究生创新学术论坛”一等奖。



通讯作者简介:尹娟,博士,土木与水利工程学院教授,博士生导师。主要从事节水灌溉理论与新技术、农业水土资源高效利用等领域研究。主持完成国家自然科学基金项目、国家支撑计划项目子课题、国家重点研发计划子课题、宁夏回族自治区自然科学基金项目、水利工程“一流学科建设项目”、横向项目等30余项,主持在研项目4项。以第一作者和通讯作者身份公开发表学术论文70余篇,其中SCI/EI收录9篇;出版专著2部,获得授权发明专利4项,实用新型专利6项,软件著作权6项。