

生物炭施用对冬麦田土壤水热环境及土壤呼吸的影响

吕梦凡,马向成,蔡铁,贾志宽

(西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:探究施用生物炭对冬麦田土壤水热因子及土壤呼吸的影响,对生物炭在麦田应用及农田固碳减排有重要的实践意义。2018年10月至2021年6月在关中灌区连续3a进行了麦田生物炭施用试验,试验设置生物炭施用量水平分别为:0 t·hm⁻²·a⁻¹(C0)、10 t·hm⁻²·a⁻¹(C10)、20 t·hm⁻²·a⁻¹(C20),通过测定小麦生长季的土壤温度、土壤水分、土壤呼吸速率及产量,明确不同施炭量对冬小麦田土壤水热因子及土壤呼吸的影响。各处理生育期内土壤呼吸速率及全生育期CO₂排放量存在显著性差异($P<0.05$),均表现为C0>C20>C10。生物炭施入增加了生育期内的平均土壤温度,同时显著提高了0~20 cm土壤含水量($P<0.05$),并减弱了土壤水分在生育期内的变化幅度。C10、C20处理3a平均土壤含水量较C0分别增加了17.0%、29.0%。5 cm及10 cm土壤温度能分别解释土壤呼吸变化的54.7%~61.1%、57.1%~64.5%;但土壤呼吸与0~20 cm土壤含水量相关性不显著。整个研究周期内,温度敏感性(Q_{10})在3.25~3.71之间,同一土层的 Q_{10} 值随着施炭量的增加而增加。与C0相比,C10和C20处理3a小麦平均产量分别显著提高了7.1%和5.3%($P<0.05$)。因此,施用生物炭可以提高关中地区冬小麦产量,降低土壤呼吸作用,调节水热因子,但增加了土壤呼吸的温度敏感性。

关键词:生物炭;土壤呼吸;土壤水热;冬小麦

中图分类号:S512.1+1 **文献标志码:**A

Effects of biochar application on soil hydrothermal environment and soil respiration in winter wheat field

LÜ Mengfan, MA Xiangcheng, CAI Tie, JIA Zhikuan

(College of Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: It is important to explore the impacts of biochar application on soil hydrothermal factors and soil respiration in winter wheat fields. Furthermore, it is practical for applying biochar in wheat fields to sequester carbon and reduce emission in farmland. A winter wheat field experiment with biochar application was conducted during 2018–2021 in Guanzhong Irrigation District, China. The biochar application levels were: 0 (C0), 10 (C10), and 20 t·hm⁻²·a⁻¹ (C20). The soil temperature, moisture, respiration rate, and yield were measured during the wheat growing season to determine the effects of different amounts of biochar on soil hydrothermal factors and soil respiration in winter wheat fields. There were significant differences in the soil respiration rate and the cumulative CO₂ emission during the growth period of each treatment ($P<0.05$), and both showed the same trend as C0>C20>C10. The biochar application increased the average soil temperature during the growth period. It significantly increased the 0~20 cm soil moisture content ($P<0.05$) and reduced the variation of soil moisture content during the growth period. The average soil moisture content of C10 and C20 treatments increased by 17.0% and 29.0% compared with C0 in three years. The 5 cm and 10 cm soil temperatures explained 54.7%~61.1% and 57.1%~64.5% of soil respiration, respectively. However, the correlation between soil respiration and 0~20 cm soil moisture content was not significant. In this study, Q_{10} varied between 3.25~3.71, and it increased with the increase of the amount of biochar applied. The average yield of C10 and C20 wheat was significantly higher than that of C0 by 7.1% and

5.3%。The application of biochar increased winter wheat yield in Guanzhong Plain, reduced soil respiration and regulated hydrothermal factors. However, it increased the temperature sensitivity of soil respiration.

Keywords: biochar; soil respiration; soil hydrothermal; winter wheat

生物炭是生物质材料在限氧条件下经热裂解生成的高度芳香化的固态富碳物质^[1],具有比表面积大、孔隙度丰富、吸附能力强等特点^[2],在土壤中周转周期可长达数百年^[3],具有很强的稳定性和固碳减排潜力^[4]。我国每年作物秸秆焚烧量约为 1.12×10^8 t,若将这部分秸秆炭转化为生物炭,可降低约一半因秸秆焚烧而产生的碳排放量^[5],而且生物炭还田后可以改良土壤理化性质^[6]、改善土壤肥力^[7-8]、促进作物增产^[9]、增加土壤碳库储量^[10]等。这对农业废弃物高效资源化利用、降低农田碳排放及缓解气候变化具有十分重要的意义。

关于生物炭施用对土壤呼吸的影响已有大量研究,由于试验区的水热生态环境、土壤质地、生物炭性质等不同研究结果差异较大。Liu 等^[11]通过 Meta-analysis 研究得出,生物炭可有效抑制中性及石灰性土壤本底有机质矿化,降低碳排放;曹坤坤等^[12]的室内培养试验发现,生物炭添加初期对土壤有机碳有短期的激发效应,而后期显著抑制了土壤呼吸;田冬等^[13]研究发现,生物炭还田显著抑制了土壤呼吸作用;也有报道,生物炭对土壤呼吸产生促进作用^[14]或无显著影响^[15-17];关于生物炭对土壤呼吸影响的研究,目前大多是基于室内培养^[16-17]及盆栽^[18-19]等的短期试验,在大田条件下的多年试验较为少见。本研究采取田间定位试验,探究关中地区不同秸秆炭施用量下麦田土壤水热因子变化特征、土壤呼吸季节变化规律及其对冬小麦产量的影响,以期为农田固碳减排及土壤健康管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学试验田(108°04'E,34°20'N),年均气温约 13.5℃,年平均降水量 580.5 mm,全年太阳总辐射约为 4.808×10^5 J·cm⁻²,属于暖温带半湿润气候,冬、春季降水偏少、干旱。试验地平坦,土壤为瘠土,播前 0~20 cm 土层基础地力为:全氮 0.94 g·kg⁻¹,有机质 13.22 g·kg⁻¹,速效磷 11.1 mg·kg⁻¹,速效钾 110.69 mg·kg⁻¹,硝态氮 33.54 mg·kg⁻¹,铵态氮 15.08 mg·kg⁻¹,容重 1.25 g·cm³,pH 值 7.59。

1.2 试验设计

本试验于 2018 年 10 月—2021 年 6 月进行,采

用随机区组设计。试验设 3 个生物炭施用水平:0 t·hm⁻²·a⁻¹(C0)、10 t·hm⁻²·a⁻¹(C10)、20 t·hm⁻²·a⁻¹(C20),各处理均 3 次重复,共 9 个小区,每个小区面积为 7.2 m²(2.4 m×3 m)。供试小麦品种为‘西农 979’,种植方式为传统平作条播,播种量为 225 万株·hm⁻²,于每年 10 月中上旬播种,次年 6 月上旬收获。每年播前施入生物炭及肥料,试验所选生物炭为作物秸秆炭,其碳含量为 205.6 g·kg⁻¹,氮含量 6.5 g·kg⁻¹,磷含量 11.34 g·kg⁻¹,钾含量 17.42 g·kg⁻¹,pH 值 9.27。人工均匀撒施生物炭于土壤表面,后翻耕与耕层土壤混匀,各处理氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥施用量分别为 225、75、150 kg·hm⁻²,于每年越冬期和拔节期分 2 次进行灌溉,每次灌水量为 75 mm,其它田间管理措施同当地大田。

1.3 指标测定

1.3.1 土壤呼吸 土壤呼吸(R_s)采用 Li-8100 开路式土壤碳通量测量系统于冬小麦苗期(S)、返青期(R)、拔节期(J)、抽穗期(H)、开花期(A)、灌浆期(G)、成熟期(M)晴天上午的 9:00—11:00^[20]进行测定。在小麦出苗后,将仪器配备的 PVC 呼吸环(内径 20.3 cm,外径 21.4 cm,高 11.5 cm)置于小麦行间并垂直压入土壤 8.5 cm,为避免土壤扰动及植物呼吸对 R_s 测定的影响,基座安置后不再移动且在每次测定 24 h 前去除呼吸环内的植物活体和凋落物。

1.3.2 土壤温度 土壤温度采用曲管地温计进行定位观测。在播种后将地温计垂直埋于冬小麦行间 5、10 cm 土层中,土壤温度的测定与土壤呼吸测定时间同步。

1.3.3 土壤水分 采用 TDR 土壤水分速测仪对 0~20 cm 土层土壤水分进行测定。土壤水分测定与土壤呼吸测定时期同步。

1.3.4 冬小麦产量 在冬小麦成熟期,各处理的每个小区收取具有代表性的 1 m²样方小麦地上部分,晒干至恒重后脱粒测产,并折算成公顷产量(kg·hm⁻²)。

1.4 数据处理与统计分析

用极值比和变异系数表征土壤含水量的数值变化程度^[21]:

$$K_a = X_{\max}/X_{\min} \quad (1)$$

$$C_v = \sigma/\bar{x} \quad (2)$$

式中, K_a 为极值比, X_{\max} 为最大值, X_{\min} 为最小值, C_v 为变异系数, σ 为均方差, \bar{x} 为算术平均值。

土壤呼吸与土壤温度的关系采用 Van't Hoff 经验指数模型进行拟合^[13]:

$$R_s = ae^{bT} \quad (3)$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T 为土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$), a 为温度为 0°C 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应系数。

土壤呼吸的温度敏感性采用如下模型:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (4)$$

式中, Q_{10} 表示温度每升高 10°C 土壤呼吸增加的倍数, b 由(3)式获得。

全生育期 CO_2 总排放量:

$$T_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^n \frac{R_{s(i+1)} + R_{s(i)}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 3.80 \times 10 \quad (5)$$

式中, T_{CO_2} 为整个生育期内单位面积上的 CO_2 总排

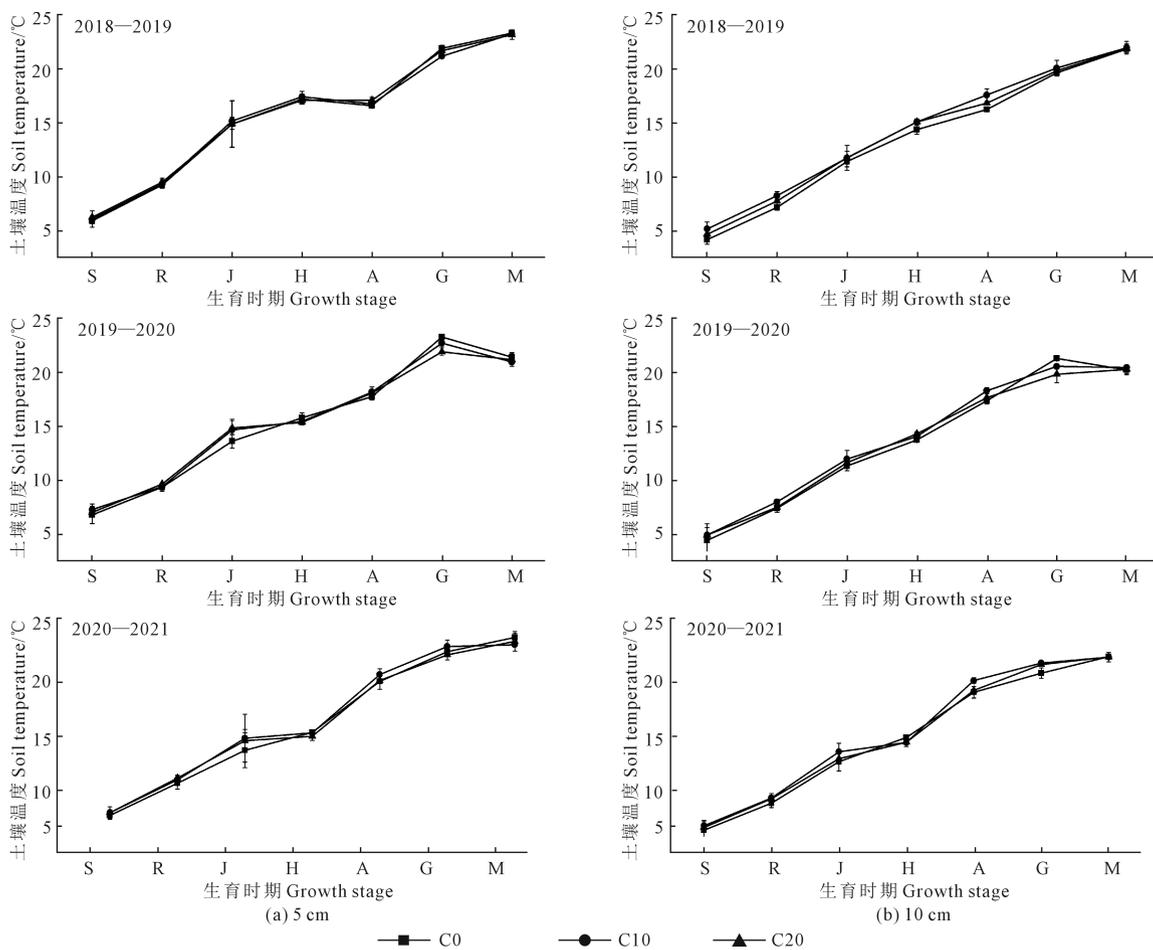
放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), i 和 n 分别为当前和最后测定日期, R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), t 为播种后天数, 3.80×10 为转换系数。

采用 Excel 2019 软件整理数据, Origin 2018 进行绘图, SPSS 21.0 进行方差分析、相关分析及多重比较分析(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭条件下土壤温度及土壤水动态变化

由图1可知, 2018—2021年冬小麦生育期内各土层土壤温度变化规律相似, 总体上随生育期的推进呈上升趋势, 不同处理间差异不显著, C0、C10和C20地下5cm土壤温度变化范围分别为: $6.0^{\circ}\text{C} \sim 23.4^{\circ}\text{C}$ 、 $6.1^{\circ}\text{C} \sim 23.3^{\circ}\text{C}$ 、 $6.3^{\circ}\text{C} \sim 23.3^{\circ}\text{C}$, 10cm土壤温度变化范围为 $4.3^{\circ}\text{C} \sim 21.9^{\circ}\text{C}$ 、 $5.0^{\circ}\text{C} \sim 22.5^{\circ}\text{C}$ 、 $4.8^{\circ}\text{C} \sim 22.0^{\circ}\text{C}$ 。总体上, 5cm平均土壤温度高于10cm处。



注: C0、C10、C20 分别表示生物炭施用量为 0、10、20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 下同; S、R、J、H、A、G、M 分别代表苗期、返青期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期及成熟期。

Note: C0, C10 and C20 represent 0, 10 and 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ biochar application, respectively. The same below; S, R, J, H, A, G, M represent seeding, reviving, jointing, heading, anthesis, grouting and maturing stage respectively.

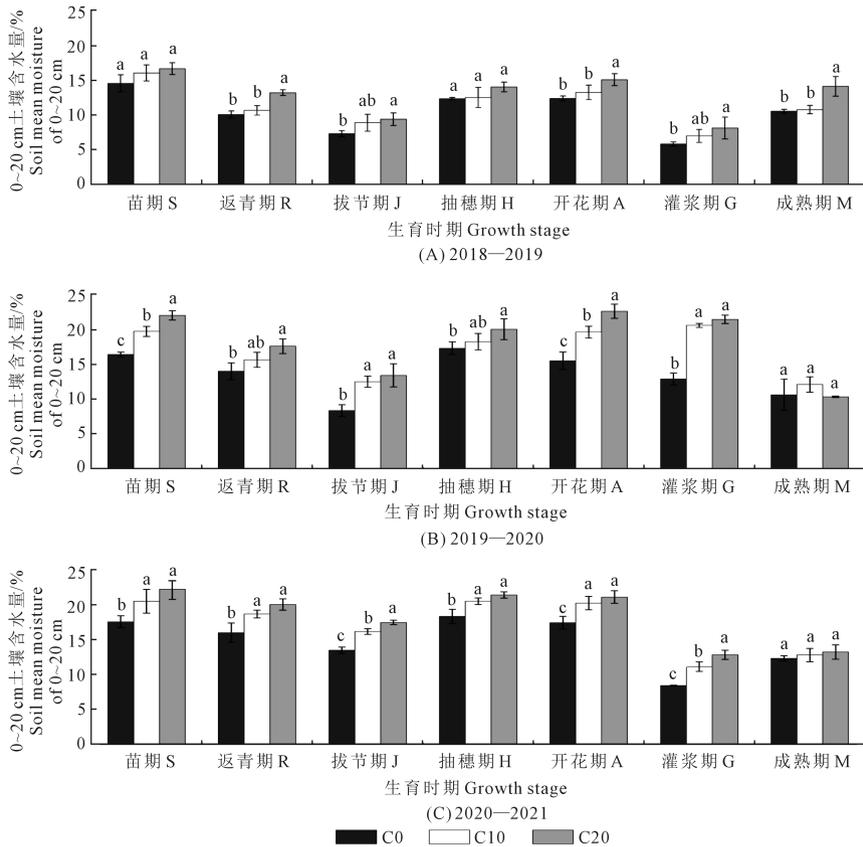
图1 2018—2021年不同施炭量下冬小麦生育期土壤温度变化规律

Fig.1 Variations of soil temperature during the growth period of winter wheat under different biochar application rates from 2018 to 2021

三年冬小麦苗期至开花期,施用生物炭处理增加了土壤温度,而在灌浆和成熟期土壤温度有所降低,各生育期土壤温度随土层深度的增加而降低。整个研究周期内,C10、C20 地下 5 cm 土层平均土壤温度相较于 C0 处理分别增加了 0.9%、0.4%,10 cm 土层平均土壤温度分别增加 3.8%、1.7%。

如图 2 所示,2018—2021 年各处理 0~20 cm 土壤含水量在冬小麦生育期内的变化规律均呈先降低后升高又降低的趋势,不同处理间差异显著($P < 0.05$)。土壤含水量随生物炭施用量的增加而增加,各生育阶段均表现为 $C20 > C10 > C0$ 。2018—2019 年

C10 和 C20 相较于 C0 处理土壤含水量增幅范围分别为 2.0%~21.0%、14.0%~39.0%。2019—2020 年,C10 和 C20 处理土壤水分与 C0 相比增幅均在灌浆期达到最大,分别增加了 59.0% 和 66.0%。2020—2021 年与前两年土壤水分变化规律相似,生物炭施入显著提高了土壤含水量,但是苗期、返青期、抽穗期、开花期及成熟期 C10 和 C20 间差异不显著。虽然 2019—2021 年的变化规律与 2018—2019 年相似,但总体上土壤水分含量较高。C10 和 C20 的三年平均土壤含水量较 C0 增加了 17.0% 和 29.0%。



注:不同字母表示同一生育期、不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different letters indicate significant differences between different treatments in the same growth period at $P < 0.05$, the same below.

图 2 2018—2021 年不同施炭量下冬小麦生育期 0~20 cm 土壤水分变化规律
Fig.2 Variations of soil moisture at 0~20 cm during the growth period of winter wheat under different biochar application rates from 2018 to 2021

由表 1 可知,小麦 3 个生长年土壤含水量变化幅度表现出的规律相似,生物炭施入降低了土壤水分的极值比和变异系数,不同处理下的 K_a 和 C_v 值均表现为 $C0 > C10 > C20$,这表明生物炭施入耕层后可以减弱 0~20 cm 土壤含水量的变化幅度,且随着施用年限的增加土壤含水量的变化幅度及变异程度有降低趋势。

表 1 小麦生育期内 0~20 cm 土壤水分变化的统计分析结果
Table 1 Statistical analysis results of 0~20 cm soil moisture changes during the wheat growth period

年度 Year	处理 Treatment					
	C0		C10		C20	
	K_a	C_v	K_a	C_v	K_a	C_v
2018—2019	2.47	0.87	2.28	0.78	2.04	0.72
2019—2020	2.06	0.75	1.70	0.74	1.68	0.74
2020—2021	2.17	0.87	1.85	0.88	1.73	0.82

注: K_a 表示极值比; C_v 表示变异系数

Note: K_a means extreme value ratio; C_v means coefficient of variation.

2.2 施用生物炭条件下土壤呼吸速率变化规律

由图3可知,生物炭显著影响冬小麦生育期内的土壤呼吸速率($P<0.05$),三年各处理的土壤呼吸速率表现出的变化规律基本一致,均呈现先升高后降低的趋势。苗期至返青期土壤呼吸速率较小,拔节至抽穗期土壤呼吸速率迅速上升,抽穗至灌浆期土壤呼吸速率仍保持在较高水平,到了成熟期土壤呼吸速率则降低。各生育阶段不同处理间的土壤呼吸速率差异显著($P<0.05$),均表现为 $C0>C20>C10$ 。2018—2019、2019—2020和2020—2021年与 $C0$ 相比, $C10$ 和 $C20$ 的平均土壤呼吸速率分别降低了30.5%、18.2%、15.4%、5.7%和27.9%、9.9%。

2018—2021年冬小麦生育期内 $C0$ 、 $C10$ 和 $C20$ 的土壤呼吸速率范围分别为:0.40~6.76、0.34~5.51、0.34~6.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $C10$ 和 $C20$ 相较于 $C0$ 3年平均土壤呼吸速率降低了24.3%、11.2%。

2.3 土壤呼吸与土壤水热因子的关系

如表2所示,各处理土壤呼吸与5 cm和10 cm土层土壤温度均呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数为0.621~0.683。同一深度土壤温度与土壤呼吸的相关性均表现为 $C10>C20>C0$ 。但不同处理土壤呼吸与0~20 cm土壤水分相关不显著。

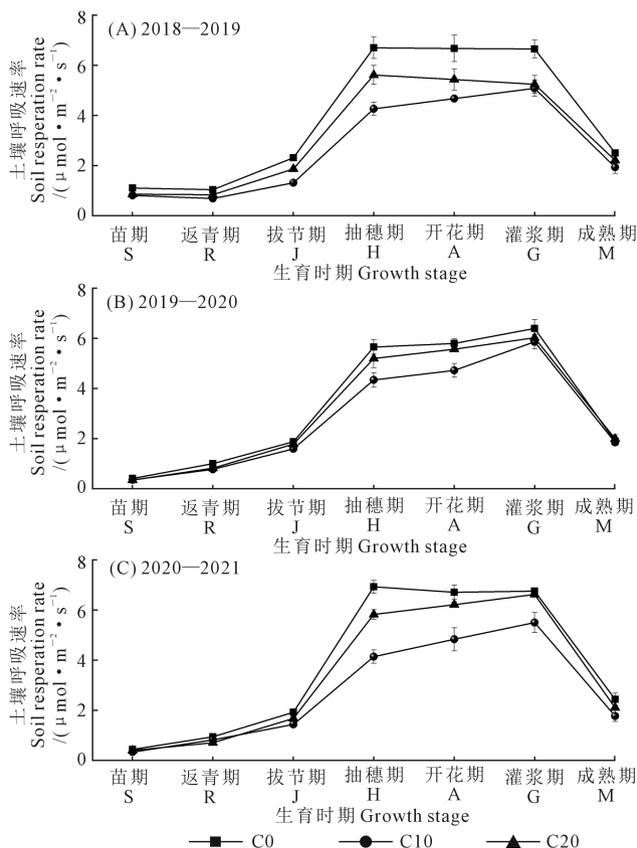


图3 2018—2021年不同施炭量下土壤呼吸速率季节变化规律
Fig.3 Seasonal variation of soil respiration rate under different biochar application rates from 2018 to 2021

土壤呼吸(R_s)及土壤温度(T)的指数模型拟合结果显示(图4),土壤呼吸与土壤温度呈极显著指数相关关系($P<0.001$),土壤呼吸速率随温度的升高呈现上升趋势。温度较低时,散点在曲线附近较为聚集,随着温度的上升,散点逐渐发散。地下5 cm和10 cm土壤温度分别可以解释土壤呼吸变化的54.7%~61.1%、57.1%~64.5%。整个研究周期内,5 cm及10 cm处的 Q_{10} 值依次为: $C20(3.71)>C10(3.54)>C0(3.25)$ 、 $C20(3.65)>C10(3.53)>C0(3.26)$ 。不同土壤深度下, $C20$ 和 $C10$ 较 $C0$ 的增幅分别为14.2%、8.9%(5 cm),12.0%、8.3%(10 cm)。

2.4 施用生物炭条件下小麦全生育期土壤 CO_2 累积排放量变化特征

施用生物炭显著降低了冬小麦各生育阶段土壤 CO_2 累积排放量(表3),2018—2021年表现出的规律较为一致,各生育阶段土壤 CO_2 累积排放量均表现为: $C0>C20>C10$ 。苗期至返青期,施用生物炭的碳排放总量显著低于不施炭处理,但 $C10$ 与 $C20$ 间差异不显著,该时期排放总量均高于其他生育时期。2018—2019、2019—2020和2020—2021年, $C10$ 和 $C20$ 处理的全生育期土壤 CO_2 累积排放量相较于 $C0$ 分别降低了31.6%、19.3%、16.7%、8.8%和25.1%、12.3%。2018—2021年 $C0$ 、 $C10$ 、 $C20$ 冬小麦全生育期 CO_2 累积排放量范围分别为:15001.49~18522.72、12251.36~12668.71和13673.88~14954.26 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $C10$ 和 $C20$ 相较于 $C0$ 3年平均土壤 CO_2 总排放量分别降低了24.9%、13.9%。

2.5 施用生物炭对小麦产量的影响

2018—2019年,冬小麦产量随生物炭施用量的增加而增加, $C10$ 和 $C20$ 相较于 $C0$ 处理分别增加了1.9%、3.6%,但处理间差异不显著。2019—2020年施用生物炭处理的小麦产量显著高于不施炭处理,表现为 $C10>C20>C0$ 。与 $C0$ 相比, $C10$ 与 $C20$ 增产幅度分别为8.5%和5.9%($P<0.05$),2020—2021年则分别显著增加了9.4%、5.9%($P<0.05$)。

表2 不同施炭量下土壤呼吸与土壤水热因子的相关性

处理 Treatment	5 cm 土壤温度 Soil temperature of 5 cm	10 cm 土壤温度 Soil temperature of 10 cm	0~20 cm 土壤水分 Soil mean moisture of 0~20 cm
$C0$	0.621 **	0.655 **	-0.026
$C10$	0.683 **	0.672 **	0.037
$C20$	0.631 **	0.669 **	0.061

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$), *** 代表 $P<0.001$ 。

Note: ** represents significant correlation at 0.01 levels, *** represents significant correlation at 0.001 levels.

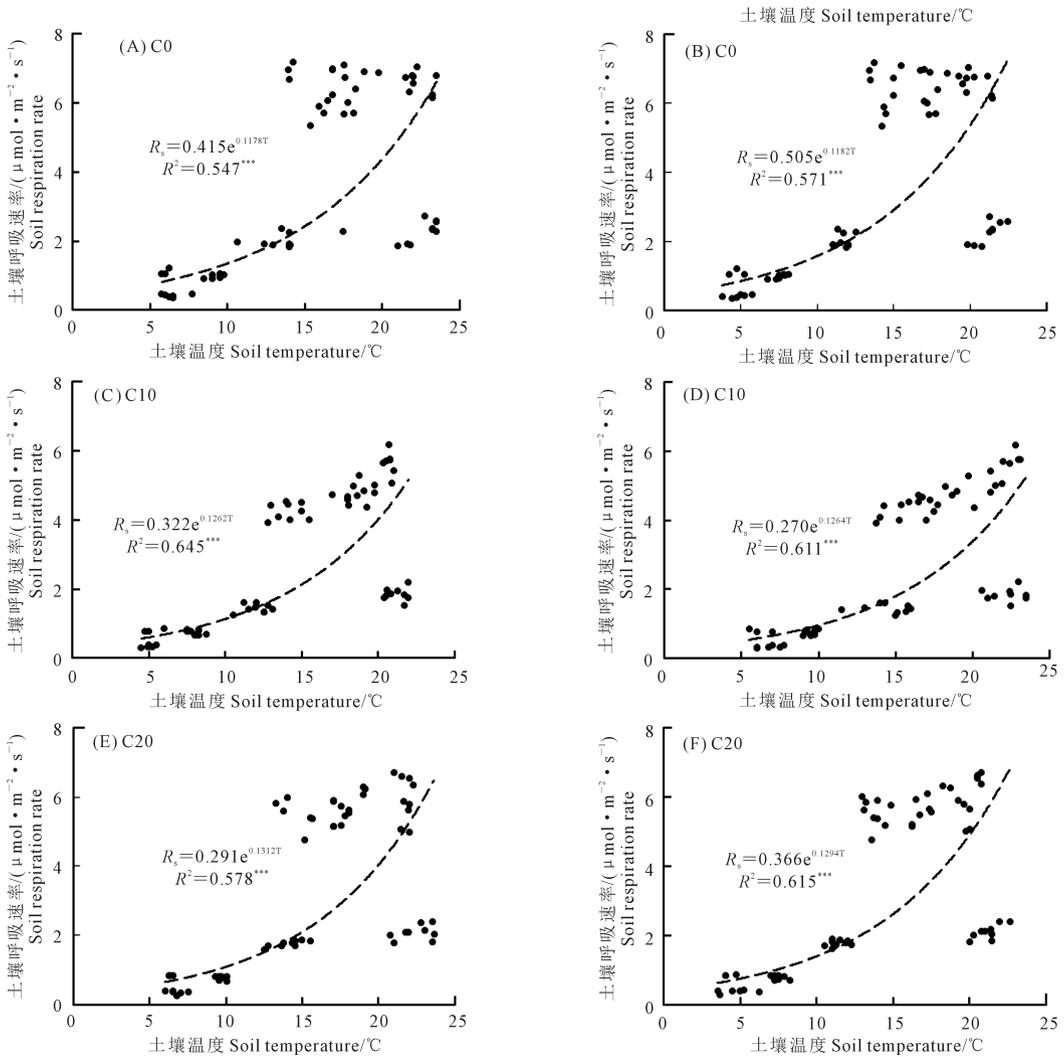


图 4 冬小麦生育期内土壤温度和土壤呼吸的关系

Fig.4 Relationship between soil temperature and soil respiration during the growth period of winter wheat

表 3 冬小麦各生育期土壤 CO₂ 排放总量/(kg·hm⁻²)Table 3 Total CO₂ emissions from soil at each growth stage of winter wheat

年度 Year	处理 Treatment	苗期~返青期 S~R	返青~拔节期 R~J	拔节~抽穗期 J~H	抽穗~开花期 H~A	开花灌浆期 A~G	灌浆成熟期 G~M	全生育期 All growth stage
2018—2019	C0	5470.16a	2029.9a	3761.74a	1269.85a	3036.59a	2954.48a	18522.72a
	C10	3800.83c	1206.15c	2329.00c	848.43c	2221.86b	2262.45b	12668.71c
	C20	4304.07b	1635.54b	3124.84b	1049.15b	2433.88b	2406.77b	14954.26b
2019—2020	C0	3573.68a	1742.86a	3146.06a	1087.04a	2776.84a	2674.99a	15001.49a
	C10	2838.03b	1426.15c	2473.17b	859.57c	2412.45c	2489.49a	12498.86c
	C20	2946.48b	1568.95b	2909.68a	1021.79b	2642.07b	2584.91a	13673.88b
2020—2021	C0	3550.82a	1747.49a	3704.07a	1297.34a	3074.04a	2972.72a	16346.49a
	C10	2976.47b	1374.76c	2335.25c	853.53c	2358.52b	2352.84b	12251.36c
	C20	2841.49b	1451.55b	3138.87b	1145.11b	2931.1a	2822.16a	14330.29b

注:不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different letter syndicate significant differences between different treatments in the same period ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 施用生物炭对土壤温度和水分的影响

生物炭为黑色固体颗粒,添加在土壤中可以加深土壤颜色,提升土壤吸热能力,降低土壤导热率

和表面反射率^[8],进而提高土壤温度^[22]。本研究表明,土壤温度呈现出明显的季节性变化,这与大气温度变化密切相关,同时施用生物炭对冬小麦生育期内平均土壤温度具有一定的提升效果,但处理间差异不显著,这可能是由于作物覆盖缩小了处理间

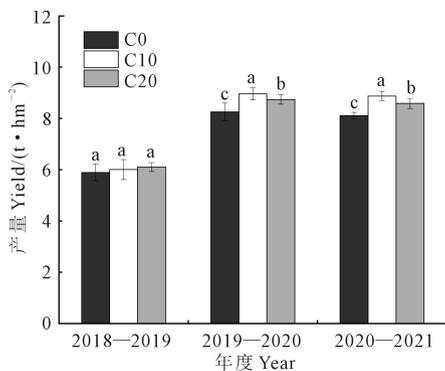


图5 2018—2021年不同施炭量下冬小麦产量

Fig.5 Winter wheat grain yield under different application rates of biochar from 2018 to 2021

的地表反射率差异^[23]、削弱了生物炭的吸热能力导致的,与田冬等^[13]的研究结果相似。本研究中,施用生物炭处理相较于C0在灌浆期至成熟期土壤温度略微下降,与王月玲等^[24]的研究结果相似,这可能是由于该时期在整个生育期内气温相对较高,生物炭可以通过增加土壤保水性和土壤比热来减缓季节尺度上的温度波动^[25],降低土壤高温,具有“削峰填谷”的效果^[8]。武玉等^[25]指出,土壤比热在一定程度上影响土壤的升温效果,而土壤水分及土壤颜色均为土壤比热的重要影响因素,纯净水的比热高于干土壤,因此较低土壤含水量的生物炭可能会引起土壤温度的最大上升,对土壤的增温效果更好。本试验中,虽然C20较C10施炭量大,土壤颜色更深,但同时生育期内土壤含水量更高,土壤升温效果可能因较高的土壤含水量而减小,因此生育期平均土壤温度表现为C10>C20>C0,处理间差异不显著。

大量研究表明,生物炭对土壤持水性能有显著影响^[3,26]。生物炭具有微孔结构丰富及比表面积大等特点,施入土壤可降低土壤容重^[6]和水分蒸发潜力^[27],提高总孔隙度^[28],从而提高耕层含水量及持水能力^[7]。一般而言,土壤含水量随施炭量的增加而增加^[29],但由于生物炭具有疏水基团,施用过量(80 t · hm⁻²)会使土壤产生一定的斥水性^[26],对土壤含水量产生负效应^[30]。本研究生物炭施用量在上述范围内,显著提高了0~20 cm 垆土土壤含水量,并减弱了冬小麦生育期内土壤含水量的变化幅度,与勾芒芒等^[21]的研究结果一致。这表明生物炭具有稳定保水能力,且以C20提升效果最好。

3.2 施用生物炭对土壤呼吸的影响

本研究表明,关中地区冬麦田土壤呼吸速率具有明显的季节变化规律,即随着生育期的推进呈现出先升高后降低的趋势,这是由作物生长特点及外

界环境变化所决定的,与陈述悦等^[31]研究得出的华北平原冬麦田土壤呼吸速率冬季较低、夏季较高的规律基本一致。苗期至返青期植株较小且气温低,根系活力及微生物活性低,因此该时期土壤呼吸速率较小;拔节至抽穗期小麦生长发育随气温的回升而加快,根系及微生物呼吸作用加强,土壤呼吸速率迅速增加;抽穗至灌浆期小麦生长旺盛,根系及微生物活性仍较强,土壤呼吸速率保持在较高水平;成熟期土壤呼吸速率出现降低趋势,原因可能是小麦生长后期根系活力降低。

李亚森等^[32]发现,连续5年施入15 t · hm⁻²生物炭显著降低了烤烟季土壤呼吸作用;成功等^[33]研究发现,秸秆炭配施化肥与单施化肥相比,石灰性土壤CO₂累积排放量显著降低15.4%。上述结论与本试验中施用生物炭显著降低了土壤呼吸速率及全生育期CO₂累积排放量的研究结果一致,原因可能是:一方面,生物炭施入土壤后促进了团聚体^[24]及有机-无机复合体^[34]的形成,对土壤有机质形成物理保护及封存作用,从而降低了微生物和酶对有机碳的分解^[35];另一方面,芳香化及缩合度较高的作物秸秆裂解产生的秸秆炭稳定性好,不易被分解^[4],而且生物炭中含有的Ca、Mg、Fe等矿质元素可以与CO₂结合生成CaMg(CO₃)₂、Fe(OH)₂CO₃等碳酸盐,抑制CO₂的排放^[36-37]。本研究中C20土壤呼吸速率高于C10,这可能是因为施炭量与土壤呼吸速率间并非简单的线性关系,当施炭量超过一定阈值时土壤通气性增加且养分效果得到改善,呼吸速率呈现增加趋势,因此固碳减排效果下降,这与马雯琪等^[38]的研究结果一致。同时,也有关于生物炭促进^[14]或者对土壤呼吸没有显著影响^[15-17]的报道,与本试验研究结果不一致,这种差异可能是由于生物炭性质、土壤类型、作物种类等不同而导致的。因此,有关生物炭对农田土壤碳排放的影响还需进一步的试验研究。

3.3 土壤温度和水分对土壤呼吸的影响

土壤呼吸受到生物因子(植被类型、地下部生物量等)、非生物因子(土壤温度、湿度、pH等)及人为因素(施肥、管理措施等)的综合影响^[39],其中土壤温度和湿度可以解释土壤呼吸的大部分变异^[40]。土壤温度通过影响微生物活性、植物生长、有机质分解等过程来调控土壤呼吸,两者间的关系可以用线性、指数或二次函数等来描述^[41]。本研究表明,土壤温度与土壤呼吸呈极显著指数相关关系($P < 0.001$),5 cm和10 cm土壤温度分别可以解释土壤呼吸季节变化的54.7%~60.6%、57.1%~64.5%,这

与李亚森等^[32] 研究结果中的 55%~65% 接近。当温度较低时,植物根系及微生物代谢的主要限制因子是土壤温度,土壤呼吸和土壤温度相关性较好,而随着温度的升高可能增加了植物生物量、运输代谢产物等对土壤呼吸速率的影响,温度不再是唯一限制因子^[42]。本研究还表明,土壤呼吸与 0~20 cm 土壤水分无显著相关性,与丁瑞霞等^[43] 的研究结果相似,原因可能是:田间环境下影响土壤呼吸的因素众多且机制复杂,水分对土壤呼吸的影响被其他因子或系统误差所掩盖^[44];此外,土壤呼吸对本试验中的土壤水分变化范围不敏感,不足以影响土壤微生物及根系活性,以致土壤水分和土壤呼吸相关性不显著。

土壤温度的敏感性 Q_{10} 表示温度每升高 10℃ 时土壤呼吸增加的倍数,受土壤生物、底物质量及土壤水热等因子的调控^[45]。本研究表明, Q_{10} 不是常数,而是随土壤深度和管理措施的不同而变化的变量。整个研究周期内,不同处理的 Q_{10} 介于 3.25~3.71,符合 Zheng 等^[46] 测定的农田 Q_{10} 值范围(1.28~4.75)。施用生物炭增加了 Q_{10} ,这与前人研究结果一致^[13, 47],原因可能是:有研究表明,成分越复杂、越难分解的有机物,具有的活化能越高、分解速度越慢, Q_{10} 越高^[48],生物炭具有高度羧酸酯化、芳香化等结构^[1],性质稳定难分解且转化周期长,施入后增加了土壤呼吸底物质量,故 Q_{10} 增大;此外,在一定范围内,土壤呼吸温度敏感性随土壤水分的升高而增大^[49],本试验中土壤含水量随生物炭的增加而增加,故 Q_{10} 表现为 $C20 > C10 > C0$ 。本研究结果表明,施用生物炭降低了土壤呼吸速率同时却增加了土壤温度敏感性,意味着施用生物炭增加了土壤呼吸对温度变化的响应程度,这与田冬等^[13] 及 Ge 等^[50] 的研究结果一致。同时也有施用生物炭降低 Q_{10} 值的报道^[12],这可能与土壤有机质质量、生物群落数量和酶活性的差异有关,因此有关生物炭施入对 Q_{10} 的影响有待进一步研究。

3.4 施用生物炭对冬小麦产量的影响

前人研究表明,生物炭施入可改善土壤理化性质,提高土壤持水性能,延缓营养元素释放、降低淋溶,进而提高水分利用效率^[51] 及养分利用效率^[52],促进作物增产。本研究表明,施用生物炭提高了冬小麦产量,但第一年不同处理间小麦产量差异不显著,第二、三年小麦产量因生物炭施入而显著提高,与 Major 等^[9] 的研究结果相同,施用生物炭第一年玉米产量差异不显著,随后 3 年产量分别显著提高 28%、30%、140%。纪立东等^[53] 研究表明,当生物炭

超过一定的阈值时对作物的增产效果下降,当施炭量从 $6.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米产量增幅由 41.4% 降至 26.1%,本研究得到了类似的结果,C10 增产效果优于 C20,原因可能是:施炭量的增加使可溶有机碳及 C/N 比也随之增加,促使微生物与作物竞争土壤氮,降低了冬小麦的氮素利用率,因此增产效果下降^[54]。2019—2021 年产量总体上均高于第一年,这可能与生育期内降雨量差异有关。有研究指出,当生物炭施用量小于 $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,对产量的作用基本为正效应^[55],本研究中生物炭施用量在其范围内,3 年小麦产量增幅范围为 1.9%~9.4%,符合上述结论。同时,也有关于生物炭抑制作物生长的报道。魏永霞等^[56] 通过在草甸黑土上连续 4 年施加 $100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆炭发现,玉米产量及水分利用效率均受到抑制,与本研究结果不一致的原因一方面可能是施炭量过高使土壤 C/N 比大幅提升,增加了微生物对 N 的固定,氮素可利用性及有效态养分降低,作物生长受到抑制,另一方面生物炭施入造成的土壤 pH 变幅超出了对 pH 较为敏感作物的承受范围^[1]。

4 结 论

施用生物炭提高了关中地区冬小麦生育期内的平均土壤温度和水分含量,显著降低了土壤呼吸速率和 CO_2 累积排放量。与 C0 相比,C10 和 C20 处理 3 年小麦平均产量分别显著提高了 7.1% 和 5.3%。因此,施用生物炭可以增加冬小麦产量,降低农田土壤呼吸作用,调节水热因子,但增加了土壤呼吸对温度的敏感性。

参 考 文 献:

- [1] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [2] LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [3] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil [J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.
- [4] 江明华,程建中,李心清,等. 生物炭对农田土壤 CO_2 排放的影响研究进展[J]. 地球与环境, 2021, 49(6): 726-736.
JIANG M H, CHENG J Z, LI X Q, et al. The effect of biochar on the farmland soil CO_2 emission: a review [J]. Earth and Environment, 2021, 49(6): 726-736.
- [5] 李飞跃,汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1-7.
LI F Y, WANG J F. Estimation of carbon emission from burning and car-

- bon sequestration from biocharproducing using crop straw in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 1-7.
- [6] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4): 591-596.
- [7] 张新学,张国辉,王效瑜,等.不同栽培模式下生物炭对土壤水分保持能力的影响[J].农业科学研究,2017,38(1):44-47.
ZHANG X X, ZHANG G H, WANG X Y, et al. Effects of biological carbon on soil water retention capacity under different cultivation patterns [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2017, 38(1): 44-47.
- [8] ZHANG Q Z, WANG Y D, WU Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1478-1487.
- [9] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, 333(1): 117-128.
- [10] LU W W, DING W X, ZHANG J H, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 76: 12-21.
- [11] LIU S W, ZHANG Y J, ZONG Y J, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment; a meta-analysis[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, 8(2): 392-406.
- [12] 曹坤坤,张沙沙,胡学玉,等.生物质炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化[J].环境科学,2020,41(11):5185-5192.
CAO K K, ZHANG S S, HU X Y, et al. Effect of biochar on changes of the temperature sensitivity of soil respiration and bacterial community structure[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5185-5192.
- [13] 田冬,高明,黄容,等.油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J].环境科学,2017,38(7):2988-2999.
TIAN D, GAO M, HUANG R, et al. Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2988-2999.
- [14] STEWART C E, ZHENG J Y, BOTTE J, et al. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013, 5(2): 153-164.
- [15] 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,等.生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J].环境科学,2015,36(9):3393-3400.
GUO Y L, WANG D D, ZHENG J Y, et al. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region [J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3393-3400.
- [16] 张桃香,郑钰钢,陈辉.不同温度生物炭对油茶林红壤呼吸作用和酶活性的影响研究[J].土壤通报,2019,50(1):96-102.
ZHANG T X, ZHENG Y Y, CHEN H. Effects of biochar with different pyrolytic temperatures on the respiration and enzyme activities of red soil under oil tea forest[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 96-102.
- [17] PRAYOGO C, JONES J E, BAEYENS J, et al. Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(4): 695-702.
- [18] 于晓娜,周涵君,张晓帆,等.基于盆栽试验的施用烟秆生物炭对植烟土壤呼吸速率的影响[J].烟草科技,2017,50(12):29-37.
YU X N, ZHOU H J, ZHANG X F, et al. Effects of tobacco stalk biochar on respiration rate of tobacco-planting soil based on pot experiment [J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(12): 29-37.
- [19] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
CHEN X X, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [20] XU M, QI Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.
- [21] 勾芒芒,屈忠义.生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响[J].农业机械学报,2018,49(11):283-288.
GOU M M, QU Z Y. Coupling effect of biochar and fertilizer on soil water content and tomatoyield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 283-288.
- [22] VENTURA F, SALVATORELLI F, PIANA S, et al. The effects of biochar on the physical properties of bare soil[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2012, 103(1): 5-11.
- [23] 张阳阳,胡学玉,邹娟,等.生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响[J].环境科学,2017,38(4):1622-1632.
ZHANG Y Y, HU X Y, ZOU J, et al. Effects of biochar on surface albedo and soil respiration in suburban agricultural soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1622-1632.
- [24] 王月玲,耿增超,王强,等.生物炭对塿土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J].环境科学,2016,37(9):3634-3641.
WANG Y L, GENG Z C, WANG Q, et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3634-3641.
- [25] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(1):68-79.
WU Y, XU G, LV Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties; current status and knowledge gaps [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79.
- [26] DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana [C]//Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 2010: 9-12.
- [27] 王浩,焦晓燕,王劲松,等.生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):253-257,287.
WANG H, JIAO X Y, WANG J S, et al. Effects of biochar on water characteristics of soil and sorghum growth under conditions of soil water stress [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 253-257, 287.
- [28] 潘全良,陈坤,宋涛,等.生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J].水土保持研究,2017,24(1):115-121.
PAN Q L, CHEN K, SONG T, et al. Influences of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention in brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 115-121.
- [29] 董飞,闫秋艳,段增强,等.生物炭对不同浇水条件下冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].华北农学报,2020,35(1):149-157.
DONG F, YAN Q Y, DUAN Z Q, et al. Effects of biochar addition on yield and water use efficiency of winter wheat under different irrigation conditions [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(1): 149-157.
- [30] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J].中国农学通报,2011,27(24):207-213.
GAO H Y, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based Nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 207-213.

- [31] 陈述悦,李俊,陆佩玲,等.华北平原麦田土壤呼吸特征[J].应用生态学报,2004,15(9):1552-1560.
CHEN S Y, LI J, LU P L, et al. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1552-1560.
- [32] 李亚森,丁松爽,殷全玉,等.多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响[J].环境科学,2019,40(2):915-923.
LI Y S, DING S S, YIN Q Y, et al. Effect of long-term biochar application on soil respiration in flue-cured tobacco planting fields in Henan province[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 915-923.
- [33] 成功,陈静,刘晶晶,等.秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析[J].环境科学,2017,38(2):792-801.
CHENG G, CHEN J, LIU J J, et al. Comparative analysis on effect of wheat straw and its biochar amendment on net global warming potential under wheat-maize rotation ecosystem in the Guanzhong plain[J]. Environmental Science, 2017, 38(2): 792-801.
- [34] 陈颖,刘玉学,陈重军,等.生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J].应用生态学报,2018,29(1):314-320.
CHEN Y, LIU Y X, CHEN C J, et al. Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 314-320.
- [35] WANG D Y, FONTE S J, PARIKH S J, et al. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates[J]. Geoderma, 2017, 303: 110-117.
- [36] XU X Y, KAN Y, ZHAO L, et al. Chemical transformation of CO₂ during its capture by waste biomass derived biochars[J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 533-540.
- [37] GASCÓ G, PAZ-FERREIRO J, CELY P, et al. Influence of pig manure and its biochar on soil CO₂ emissions and soil enzymes[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 19-24.
- [38] 马雯琪,蒋靖伯伦,李典鹏,等.施用生物炭5年后夏玉米土壤呼吸研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):111-118.
MA W Q, JIANG J B L, LI D P, et al. Effect of biochar application on soil respiration in a summer maize crop after five years[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(1): 111-118.
- [39] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J].地球科学进展,2005,20(7):778-785.
ZHANG D Q, SHI P L, ZHANG X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 778-785.
- [40] REINERS W A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota Forests[J]. Ecology, 1968, 49(3): 471-483.
- [41] FANG C, MONCRIEFF J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.
- [42] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.土壤呼吸对温度升高的适应[J].生态学报,2004,24(11):2649-2655.
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Acclimatization of soil respiration to warming[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2649-2655.
- [43] 丁瑞霞,王维钰,张青.两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(8):1106-1118.
DING R X, WANG W Y, ZHANG Q. Effect of straw mulching on soil respiration and its temperature sensitivity under different crop rotation systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1106-1118.
- [44] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.水分对土壤呼吸的影响及机理[J].生态学报,2003,23(5):972-978.
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972-978.
- [45] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等.土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J].生态学报,2011,31(8):2301-2311.
YANG Q P, XU M, LIU H S, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [46] ZHENG Z M, YU G R, FU Y L, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a Trans-China based case study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [47] 葛晓改,周本智,肖文发,等.生物质炭添加对毛竹林土壤呼吸动态和温度敏感性的影响[J].植物生态学报,2017,41(11):1177-1189.
GE X G, ZHOU B Z, XIAO W F, et al. Effects of biochar addition on dynamics of soil respiration and temperature sensitivity in a phyllostachysedulisforest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(11): 1177-1189.
- [48] KNORR W, PRENTICE I C, HOUSE J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. Nature, 2005, 433(7023): 298-301.
- [49] JASSAL R S, BLACK T A, NOVAK M D, et al. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand[J]. Global Change Biology, 2008, 14(6): 1305-1318.
- [50] GE X G, CAO Y H, ZHOU B Z, et al. Combined application of biochar and N increased temperature sensitivity of soil respiration but still decreased the soil CO₂ emissions in moso bamboo plantations[J]. Science of the Total Environment, 2020, 730:e139003.
- [51] UZOMA K C, INOUE M, ANDRY H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 205-212.
- [52] 张万杰,李志芳,张庆忠,等.生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(10):1946-1952.
ZHANG W J, LI Z F, ZHANG Q Z, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 1946-1952.
- [53] 纪立东,柳晓桐,司海丽,等.生物炭对土壤理化性质和玉米生长的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(5):114-120.
JI L D, LIU X T, SI H L, et al. Effects of biomass charcoal on soil physicochemical properties and corn growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 114-120.
- [54] 宋大利,刁向银,黄绍敏,等.秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):369-379.
SONG D L, XI X Y, HUANG S M, et al. Effects of combined application of straw biochar and nitrogen on soil carbon and Nitrogen contents and crop yields in a fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(2): 369-379.
- [55] LEHMANN J, WEIGL D, PETER I, et al. Nutrient interactions of alley cropped Sorghum bicolor and Acacia saligna in a runoff irrigation system in Northern Kenya[J]. Plant and Soil, 1999, 210(2): 249-262.
- [56] 魏永霞,冯超,石国新,等.黑土区坡耕地连年施加生物炭的最佳模式研究[J].农业机械学报,2019,50(10):269-277.
WEI Y X, FENG C, SHI G X, et al. Optimal application mode of biochar in sloping farmland of black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 269-277.