

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.006.

王佳敏, 严俊霞, 刘菊, 等. 施肥和生物炭添加对高粱—玉米轮作土壤呼吸的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 112-122.

Wang Jiamin, Yan Junxia, Liu Ju, et al. Effect of Fertilization and Biochar Addition on Soil Respiration in a Sorghum-Maize Rotation Agroecosystem [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 112-122.

施肥和生物炭添加对高粱—玉米轮作土壤呼吸的影响

王佳敏¹, 严俊霞¹, 刘菊^{2,3}, 王琰¹

(1. 山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西省林业和草原科学研究院, 太原 030012; 3. 山西五台山山地草甸生态系统定位观测研究站, 山西 忻州 035515)

摘要: [目的] 探明农田生态系统中施肥和生物炭添加对土壤呼吸(R_s)、环境因子和植被指数的影响, 及生物因子和非生物因子对土壤呼吸的影响, 为农田生态系统作物生长和碳排放评估提供依据。 [方法] 以太原盆地高粱—玉米轮作地连续 5 年(2011—2015 年)施肥和生物炭添加 4 种处理(对照: CK; 生物炭: B; 无机肥: INF; 无机肥+生物炭: INF+B)下的土壤为研究对象, 利用连续 2 年(2015—2016 年)对生育期的 R_s 、生物因子和非生物因子定期观测数据, 分析 4 种处理对 R_s 及其与生物因子、非生物因子关系的影响。 [结果] (1) 与 CK 处理相比, B, INF 和 INF+B 处理降低土壤温度(2.8%~4.2%), 提高 R_s 的温度敏感性(Q_{10})(4.5%~20.2%)、 R_s 速率(0.5%~8.8%)和 3 种植被指数(VI): 增强植被指数(EVI)(1.5%~6.2%)、差值植被指数(DVI)(0.7%~6.0%)、归一化植被指数(NDVI)(1.2%~5.4%), 但其对这些因子的影响均未达显著水平($p > 0.05$)。 (2) B, INF 和 INF+B 处理对 R_s 的影响在不同生育期不同, 它们均提高了生育前期的 R_s , 而生育后期 CK 处理的 R_s 高于其他处理(除灌浆期的 B 处理), 导致各处理 R_s 在整个生育期无显著差异。 (3) 3 种植被指数中, DVI 的季节变化对 R_s 季节变化的解释度最高, 为 75.5%, 10 cm 深度的土壤温度(T_{10})和土壤湿度(W_s)分别解释 R_s 季节变化的 30.8% 和 20.1%。从 R^2 和 AIC 值来看, 以 T_{10} , W_s 和 DVI 为自变量的三因子模型对 R_s 季节变化的预测效果较好。 [结论] 高粱全生育期 4 个处理间 R_s 均无显著差异, 施肥和生物炭添加并未增加 R_s 。研究结果可为无机肥和生物炭添加对农田土壤碳排放与土壤改良、农作物生长之间的影响关系提供依据。

关键词: 生物炭; 无机肥; 土壤呼吸; 土壤水热因子; 高光谱植被指数

中图分类号: S154

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0112-11

Effect of Fertilization and Biochar Addition on Soil Respiration in a Sorghum-Maize Rotation Agroecosystem

Wang Jiamin¹, Yan Junxia¹, Liu Ju^{2,3}, Wang Yan¹

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Academy of Forestry and Grassland Science, Taiyuan 030012, China; 3. Mountain Meadow Ecosystem Observation and Experiment Station in Mount Wutai of Shanxi, Xinzhou, Shanxi 035515, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the effects of fertilization and biochar addition on soil respiration (R_s), environmental factors and vegetation index, and the effects of biotic factors and abiotic factors on soil respiration, and to provide the reference for the assessment of crop growth and carbon emission in farmland ecosystem. [Methods] In a sorghum-corn rotation agroecosystem of Taiyuan basin after a continuous 5-year (2011—2015) fertilization and biochar addition with 4 treatments (control: CK, biochar: B; inorganic fertilizer: INF and inorganic fertilizer + biochar: INF + B), based on periodic observations of R_s , biological and abiotic factors for 2 consecutive years (2015—2016), we analyzed the effects of the 4 treatments on R_s and its relationship with biological and abiotic factors. [Results] (1) Compared with CK, B, INF and INF+B reduced soil temperature (2.8%~4.2%), and increased temperature sensitivity (Q_{10}) of

收稿日期: 2023-09-07

修回日期: 2024-03-22

资助项目: 山西省自然科学基金项目(20210302123449); 山西省科技创新人才团队专项资助项目(202204051001010); 国家自然科学基金(41977412)

第一作者: 王佳敏(1999—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统碳循环。E-mail: jiawang202202@163.com

通信作者: 严俊霞(1976—), 女, 山西太原人, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态系统碳循环。E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

soil respiration (4.5%~20.2%) and soil respiration rate (0.5%~8.8%), increased the enhanced vegetation index (EVI) by 1.5%~6.2%, difference vegetation index (DVI) by 0.7%~6.0%, normalized vegetation index (NDVI) by 1.2%~5.4%, respectively; but the influence on these factors did not reach a significant level ($p>0.05$). (2) The effects of B, INF and INF+B on R_s differed in different growth stages. B, INF and INF+B increased the R_s in the early growth stage, while the R_s of CK treatment was higher than that in other treatments (except B treatment in the grouting stage) ($p<0.05$) in the later growth stage, resulting in no significant difference in R_s among all treatments in the whole growing stage. (3) Among the three vegetation indices, the seasonal variation of DVI showed the highest interpretation of the seasonal variation in R_s at 75.5%. Soil temperature in 10 cm depth (T_{10}) and soil moisture over 0—10 cm depth (W_s) explained 30.8% and 20.1% of the seasonal variation of R_s , respectively. From the R^2 and AIC values, the three-factor model with T_{10} , W_s and DVI as independent variables predicted the seasonal change of R_s well. [Conclusion] There was no significant difference in R_s between the four treatments in whole sorghum, and R_s did not increase by fertilization and biochar addition. The results provided the basis for the relationship between inorganic fertilizer and biochar application on soil carbon emission, soil improvement and crop growth.

Keywords: biochar; inorganic fertilizer; soil respiration; soil water and heat factors; hyperspectral vegetation index

土壤是陆地生态系统最大的碳库,表层 1 m 深度内大约有 1 500 Pg C,其值是大气碳总量的两倍,土壤碳库的微小变化会对大气 CO_2 浓度产生重大影响^[1]。农业生态系统每年向大气排放的 CO_2 约占全球人为排放量的 26%,是全球碳平衡的重要组成部分^[2]。土壤呼吸包括生物和物理 2 个主要过程,前者包括植物根系、菌根真菌、微生物和土壤动物在土壤中产生 CO_2 的过程,后者主要是土壤 CO_2 向土壤表面的扩散过程^[3]。土壤呼吸速率(R_s)受许多因素的影响,一般可分为非生物因素(土壤温度、土壤含水量、土壤特性等)和生物因素(植被类型、冠层光合作用、土壤动物、植物根系及根际微生物等)^[3]。许多研究表明土壤温度与 R_s 在时空尺度上具有较大的相关性,在构建模型预测 R_s 中起着重要作用。由于土壤水分与土壤呼吸过程密切相关,其对土壤呼吸的影响更为复杂^[4]。虽然土壤温度和土壤含水量总是同时对 R_s 发挥作用,但在不同的气候条件下,它们的相对重要性可能不同^[5]。此外,植物生长和微生物群落也会影响碳基质的供应和分解^[6]。研究表明,当土壤水热因子、土壤质地等自然因素一致时,生物因子尤其是根系生物量成为影响土壤呼吸的主要因素^[7]。高光谱植被指数是反映生物因子(如作物长势、光合作用和叶面积指数)的重要参数,与土壤呼吸有较高的相关性,可以作为预测 R_s 季节变化的重要指标^[3]。

生物炭是一种含碳量高的芳香化合物,由于具有高水平的孔隙度和比表面积大以及呈碱性等自身特点,施入土壤后可以促进土壤团聚体形成,提高土壤保水保肥能力和通气性,改良酸性土壤。此外生物炭含有丰富的矿质养分,可以为土壤提供氮、磷、钾等矿物质^[8]。迄今

为止,关于生物炭对土壤 CO_2 排放的影响结果具有较大的不确定性,王青阳等^[9]报道了不同生物炭施用量能显著增加土壤 CO_2 排放量和土壤碳储量;刘晓宇等^[10]发现施加生物炭对土壤呼吸没有影响,但使表土有机碳储量平均增加 38%,生物炭不会通过增加农田土壤 CO_2 排放量来抵消净碳积累量;张叶叶等^[11]对 74 项独立研究进行荟萃分析发现施用生物炭显著促进了土壤有机碳矿化,这势必会影响生物炭在农田土壤固碳减排方面的评估。生物炭的直接有效养分有限,但与氮肥配施大大提高了土壤肥力^[12],而且也会影响植物根系、微生物群落结构及活性^[13],从而影响土壤呼吸。研究表明,施加无机肥使 R_s 显著增加^[14],而无机肥与生物炭配施在不同区域不同时间对土壤呼吸的影响不同,仍需进一步深入研究^[7]。

近年来研究主要基于室内短期试验揭示生物炭添加对土壤理化性质和土壤呼吸的影响,对野外自然条件下无机肥与生物炭配施的长期效应研究相对较少^[15],同时基于土壤水热因子和高光谱植被指数建立的土壤呼吸模型预测则更少。高粱是我国重要的杂粮作物,山西省适宜的水热条件使其位居中国高粱种植面积省份前列。本研究在山西高粱地开展,旨在明确:无机肥和生物炭施加及其配施对土壤呼吸、环境因子和植被指数的影响;影响土壤呼吸季节变化的主要因素;建立基于土壤水热因子和植被指数的土壤呼吸最优模型。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在山西省农业科学院东阳试验基地(112°40'E, 37°32'N)进行。该基地海拔 799.4~804.6 m,属于暖

温带大陆性季风气候,年平均降水量 440.7 mm,年降水的 80%集中在 6—8 月,年平均气温 9.7 °C,1 月平均气温 -7 °C,7 月平均气温 23.5 °C,雨热同期。年日照时数 2 662 h,无霜期 158 d。供试土壤类型为石灰性褐土,土壤质地为壤质砂土,土壤有机质含量为 6.4 g/kg,全氮、有效磷和速效钾含量分别为 0.98 g/kg, 5.43 mg/kg, 243 mg/kg, pH 值为 8.4。

1.2 试验设计

供试高粱为晋杂 34,每年 5 月初播种,10 月初收获。播种前灌水 900 m³/hm²,生育期不再灌溉。生物炭改良试验 2011 年开始,采用随机区组设计,4 个处理:对照(CK)、单施生物炭(B)、单施无机肥(INF)

和无机肥与生物炭配施(INF+B),每个处理 3 个重复,小区面积为 75 m²(5 m×15 m)。无机肥施用量为 N 225 kg/(hm²·a),P₂O₅ 60 kg/(hm²·a),K₂O 60 kg/(hm²·a);生物炭施用量根据秸秆还田量计算得到,施用量为 4.50 t/(hm²·a)。生物炭、1/2 氮肥、磷肥和钾肥作为基肥于播种前施入,剩余 1/2 氮肥在高粱拔节期追施。供试生物炭由山西省工霄商社生产,在 700 °C 限氧条件下由玉米秸秆碳化而成,生物炭总碳、全氮、有效磷和速效钾含量分别为 369.87, 6.56, 0.69, 49.33 g/kg, pH 为 10.22,电导率为 10.97 mS/cm。高粱生育期划分见表 1,以植株某一特征显著变化达小区 50%为该生育时期记录标准。

表 1 高粱生育期划分

Table 1 The growth period of sorghum

年份	播种(月-日)	出苗(月-日)	拔节(月-日)	抽穗(月-日)	灌浆(月-日)	成熟(月-日)
2016	05-05	05-14	06-16	07-21	08-03	09-10
2017	05-08	05-18	06-22	07-25	08-08	09-18

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤呼吸、土壤温度和土壤水分测定 采用 LI-COR 8100 土壤碳通量自动测量系统于 2016 年和 2017 年的 5—10 月测定土壤呼吸速率(R_s)。每月选择晴朗天气测定 1~2 次。每年开始测定前一周,在每个处理小区行间呈三角形放置 3 个 PVC 环(直径 19 cm,高 5 cm),测定期间 PVC 环位置不变,定期去除环内杂草,当年测定结束后取出。10 cm 深度的土壤温度(T_{10})采用 LI-COR 8100 碳通量自动测量系统自带的温度探针测定。0—10 cm 深度的土壤水分(W_s)采用烘干法测定,3 个重复。

1.3.2 土壤理化性质测定 在 2017 年高粱成熟期,在各处理样地按“S”形多点采集 0—10 cm 深度的土壤样品,重复 3 次,风干后过 2 mm 筛,用于测定土壤理化性质。土壤容重采用环刀法测定, pH 采用电位法测定。土壤全氮采用开氏法测定,有效磷采用碳酸氢钠—钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵提取,火焰光度计法测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定。参照严昶升^[17]方法测定土壤酶活性:蔗糖酶活性测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法,过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾滴定法。

1.3.3 光谱数据获取与处理 各处理的植被指数仅在 2017 年高粱生育期测定。在测定土壤呼吸的当天(晴朗无云)10:00—14:00 采用手持式地物光谱仪(FieldSpecHandHeld2, ASD 公司,美国)测定冠层光谱,探头视场角为 25°,光谱范围为 325~1 075 nm。

测量时保持光谱仪探头垂直向下,距作物冠层垂直高度 1 m 左右。在每次数据采集前后对各处理小区进行白板校正,每个处理选择 3 个点测定,每个点获得 10 条光谱曲线,每个处理样地得到 30 条反射率曲线,最终取平均值作为测量结果。采用软件 ViewSpecPro 对原始光谱曲线进行预处理,得到小区的冠层反射率,据此计算增强植被指数(EVI)、差值植被指数(DVI)和归一化植被指数(NDVI),计算公式见表 2。

表 2 植被指数的计算公式

Table 2 The calculation formula of the vegetation index

植被指数	计算公式	公式来源
EVI	$2.5(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+6R_{680}-7.5R_{450}+1)$	参考文献[18]
DVI	$R_{800}-R_{680}$	参考文献[19]
NDVI	$(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$	参考文献[20]

注: R_{800} 、 R_{680} 、 R_{450} 分别为波长 800, 680, 450 nm 处的作物冠层反射率。

1.4 数据分析

使用 SPSS 27.0 进行数据分析,各处理间和生育期间差异采用单因素方差分析,差异显著性采用最小显著差数法 LSD 检验, R_s 与环境因子的相关关系采用相关分析法分析,所有图件绘制采用 Origin 2023 完成。

R_s 与 T_{10} 、植被指数(VI)之间的单因素关系采用指数方程来拟合:

$$\ln R_s = a T_{10} + \ln b \quad (1)$$

$$\ln R_s = a VI + \ln b \quad (2)$$

R_s 与 W_s 之间的单因素关系采用幂函数来拟合:

$$\ln R_s = a \ln W_s + \ln b \quad (3)$$

R_s 与 T_{10} 和 W_s 之间的双因素关系采用非线性模型拟合:

$$\ln R_s = aT_{10} + b \ln W_s + \ln c \quad (4)$$

R_s 与 T_{10} , W_s 和 VI 之间的 3 因素关系采用 3 个非线性模型分析:

$$\ln R_s = aT_{10} + b \ln W_s + cVI + \ln d \quad (5)$$

$$\ln R_s = aT_{10} + b \ln W_s + c \ln VI + \ln d \quad (6)$$

$$\ln R_s = a \ln T_{10} + b \ln W_s + c \ln VI + \ln d \quad (7)$$

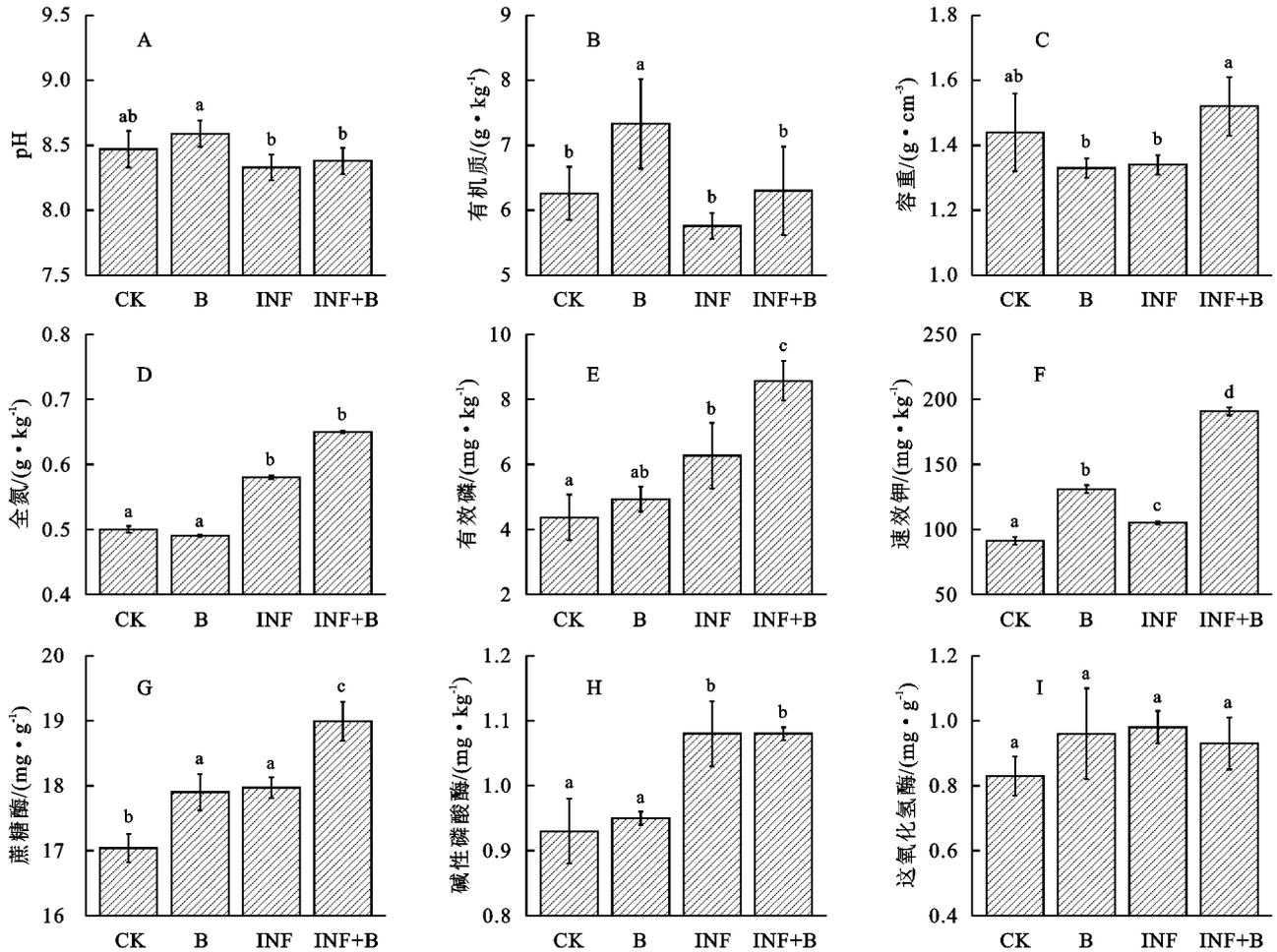
式中: R_s 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; T_{10} 为 10 cm 土层的土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$); W_s 为 0—10 cm 土壤混合土样的质量含水率 (%); VI 为 EVI, DVI 或 NDVI; a, b, c, d 为拟合参数。

土壤呼吸的温度敏感系数 (Q_{10}) 表示 R_s 对 T_{10} 的响应程度, 即 T_{10} 每增加 10°C 时 R_s 所增加的倍数, 计算公式为: $Q_{10} = e^{10b}$ (b 为 R_s 与 T_{10} 的指数方程的拟合系数)。

2 结果与分析

2.1 对土壤理化性质的影响

图 1 为 4 种处理下环境因子的变化情况。B 处理的土壤 pH 值最高, 显著高于 INF 和 INF+B 处理 ($p < 0.05$), 与 CK 处理差异不显著 ($p > 0.05$), 在 8.33~8.59 范围内; B 处理的有机质含量最高, 显著高于其他处理 ($p < 0.05$), INF 处理最低, 在 5.76~7.33 g/kg 范围内; B 处理的土壤容重最低, INF+B 处理最高, 在 1.33~1.52 g/cm³ 范围内; INF 和 INF+B 处理的全氮含量显著高于 CK 和 B 处理 ($p < 0.05$), 4 种处理全氮在 0.49~0.65 g/kg 范围内; 与 CK 处理相比, B, INF 和 INF+B 处理提高土壤有效磷、速效钾成分和土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶 3 种酶活性 (图 1)。



注: 不同字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 1 4 种处理土壤理化性质 One-Way 方差分析结果

Fig. 1 ANOVA results of soil physical and chemical properties among the 4 treatment

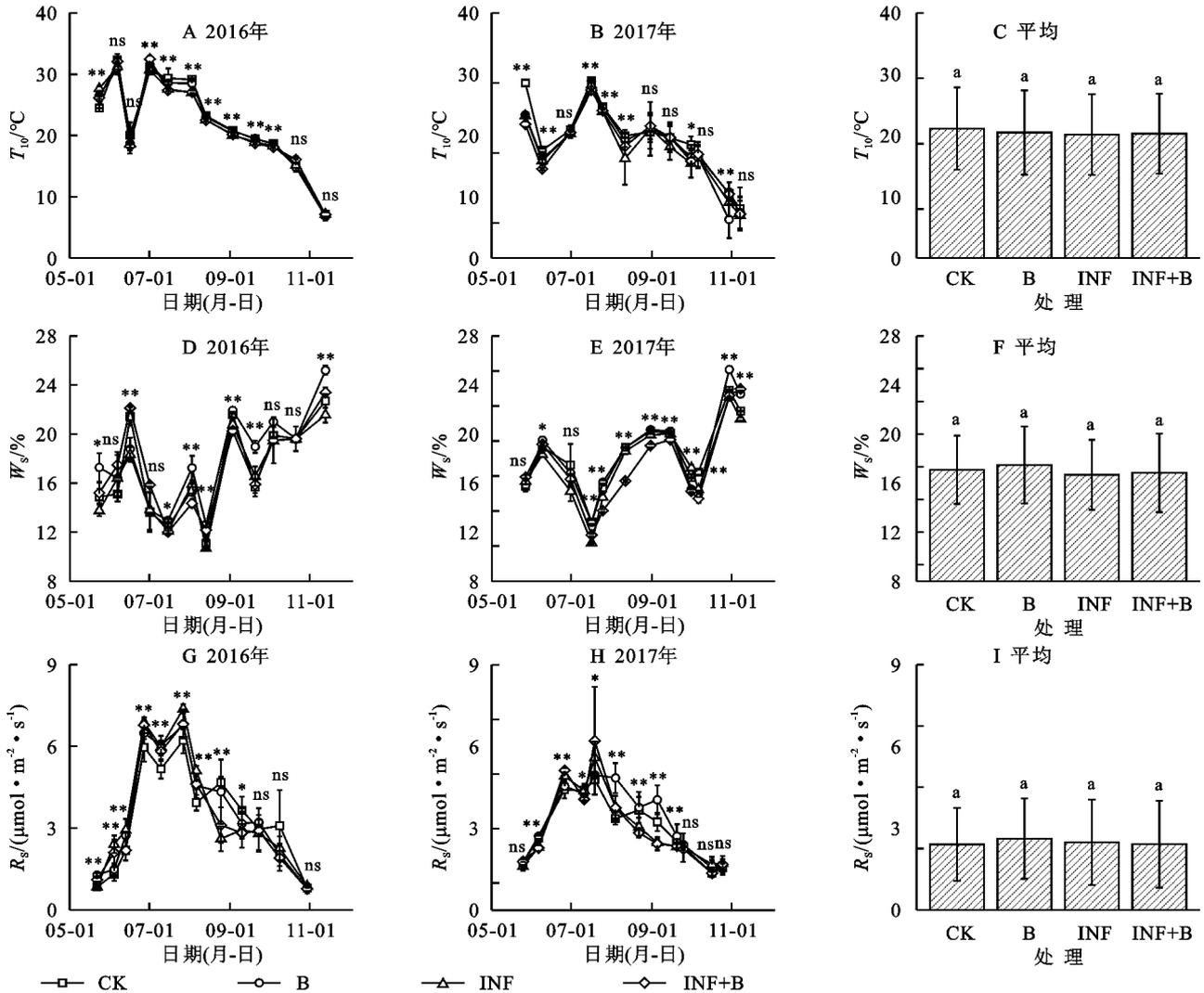
2.2 施肥与生物炭对土壤水热因子、土壤呼吸和植被指数的影响

2.2.1 对土壤水热因子的影响 4 种处理 T_{10} 的季节变化趋势基本一致, 均具有明显的季节变化, 最高值均出现在 7 月, 2016 年、2017 年观测期间 T_{10} 的变化范围

分别为 6.79~32.49 $^{\circ}\text{C}$ 和 10.51~30.37 $^{\circ}\text{C}$, 两年 4 种处理 T_{10} 平均值大小为 CK>B>INF+B>INF, B, INF 和 INF+B 在一定程度上降低 T_{10} , 但处理间差异均未达到显著水平 ($p > 0.05$) (图 2C)。 W_s 受多种因素影响, 包括降水和灌溉以及植被。2016 年、2017 年 4 种处理的 W_s

最高值均出现在10月下旬,滞后于 T_{10} 和植被指数最高值出现时间。2016年、2017年各处理的 W_s 排序分别为 $B>INF+B>CK>INF$ 和 $B>CK>INF>INF+B$,两年

平均的 W_s 排序为 $B>CK>INF+B>INF$,B处理较其他处理土壤水分含量增加3.7%~7.9%(两年数据)。两年4种处理间 W_s 均值差异不显著($p>0.05$)(图2)。



注: **, * 和 ns 分别表示相同时间点不同处理间具有极显著($p<0.01$)、显著($p<0.05$)和不显著差异($p>0.05$),相同字母表示处理间差异不显著($p>0.05$)。

图2 4种处理10 cm深度的土壤温度,0—10 cm深度的土壤水分和土壤呼吸速率的动态变化及One-Way方差分析结果

Fig. 2 Dynamic changes and ANOVA results of soil temperature at 10 cm depth, soil water at 0—10 cm depth and soil respiration rate among the 4 treatments

2.2.2 对土壤呼吸的影响 从整个高粱生育期来看,2016年、2017年各处理 R_s 呈单峰变化趋势(图2),B,INF和INF+B处理并没有改变 R_s 的季节变化趋势,与 T_{10} 的变化趋势基本一致。2016年和2017年各处理的 R_s 最大值均出现在7月下旬,而两年间土壤温度的最大值均出现在7月初,表明 R_s 相比土壤温度出现了滞后现象。将高粱生育期分为5个阶段(苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期),4种处理 R_s 在高粱苗期到抽穗期呈上升趋势,在抽穗期到成熟期呈下降趋势(表3)。方差分析表明,4个处理拔节期和抽穗期的 R_s 均显著高于灌浆期、成熟期和苗期($p<0.05$),灌浆期均显著高于成熟期和苗期。

B,INF和INF+B处理对不同生育期 R_s 影响不同,苗期各处理间 R_s 无显著变化($p>0.05$);拔节期各处理与CK处理相比 R_s 均有所上升,但未达到显著水平;抽穗期各处理与CK处理相比 R_s 均有所上升,其中B处理显著高于其他处理($p<0.05$);灌浆期INF和INF+B处理与CK处理相比 R_s 显著下降($p<0.05$);成熟期各处理与CK处理相比 R_s 均有所下降,但未达显著水平($p>0.05$),表明B,INF和INF+B处理均提高了生育前期的 R_s (苗期—抽穗期),而生育后期(灌浆期—成熟期)CK处理的 R_s 高于其他处理(除灌浆期的B处理)。2016年、2017年各处理的 R_s 排序分别为 $INF>B>INF+B>CK$ 和

B>INF>INF+B>CK,两年总 R_s 排序为 B>INF>INF+B>CK,总体来说 B,INF 和 INF+B 处理促进了土壤呼吸,方差分析表明两年各处理间 R_s 差异未达

显著水平,说明虽然 B,INF 和 INF+B 处理改变了 R_s 在不同生育期的动态变化,各处理 R_s 在整个生育期却无显著差异。

表 3 不同生育期土壤呼吸速率差异性分析

Table 3 Analysis of differences in soil respiration rates during different reproductive periods $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

处理	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	1.59±0.68aC	4.51±1.54aA	4.62±1.41aA	3.55±0.92aB	1.90±1.28aC
B	1.93±0.85aD	4.95±1.33aB	6.18±0.81bA	3.98±1.10aC	1.78±1.03aD
INF	1.92±1.10aC	5.23±1.67aA	5.46±1.69aA	2.87±1.09bB	1.81±0.93aC
INF+B	1.68±0.60aC	5.17±1.71aA	5.21±1.49aA	2.79±0.94bB	1.66±0.88aC

注:同列数据不同小写字母表示同一生育期 4 种处理差异显著($p<0.05$),同行数据不同大写字母表示同一处理不同生育期差异显著($p<0.05$)。

2.2.3 对植被指数的影响 从图 3 中可以看出,在高粱生育期中,3 种植被指数(EVI,DVI 和 NDVI)季节变化规律相似,均表现为从苗期到抽穗期逐渐增加、从抽穗期到成熟期逐渐降低的趋势。与 NDVI 相比,EVI 和 DVI 在 7 月 21 日之后的下降趋势更加明显。整个生育期间 4 种处理的 3 种植被指数大小均表现为 INF+B > INF > B > CK,差值分别为 0.27,0.15,0.34,说明 B,INF 和 INF+B 处理提高了植被盖度,促进了高粱的生长。4 种处理间植被指数均未达显著差异水平($p>0.05$)。从不同生育期来看,4 种处理 DVI 在苗期最低,拔节期和抽穗期较高,灌浆期和成熟期降低(表 4),与不同生育期

R_s 的变化趋势基本一致。方差分析表明 4 个处理拔节期 DVI 显著高于苗期($p<0.05$)。

B,INF 和 INF+B 处理对不同生育期 DVI 影响不同。除拔节期的 B 处理外,苗期和拔节期各处理与 CK 处理相比 DVI 均有所增加,但未达到显著水平($p>0.05$);抽穗期各处理 DVI 均显著高于 CK 处理($p<0.05$);灌浆期各处理与 CK 处理相比 DVI 均有所下降,但未达到显著水平($p>0.05$);成熟期 INF 和 INF+B 处理 DVI 显著低于 CK 和 B 处理($p<0.05$)。总的来说,INF 和 INF+B 处理使苗期到抽穗期 DVI 增加、灌浆期和成熟期 DVI 降低。

表 4 不同生育期 DVI 差异性分析

Table 4 Analysis of differences in DVI during different reproductive periods

处理	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	0.06±0.02aB	0.30±0.04aA	0.27±0.01cAB	0.25±0.03aAB	0.16±0.01aAB
B	0.07±0.03aB	0.28±0.02aA	0.32±0.01aA	0.24±0.02aAB	0.17±0.01aAB
INF	0.08±0.02aB	0.31±0.03aA	0.30±0.01bAB	0.23±0.07aAB	0.10±0.01bAB
INF+B	0.07±0.02aB	0.31±0.04aA	0.32±0.01abA	0.24±0.07aAB	0.08±0.01bAB

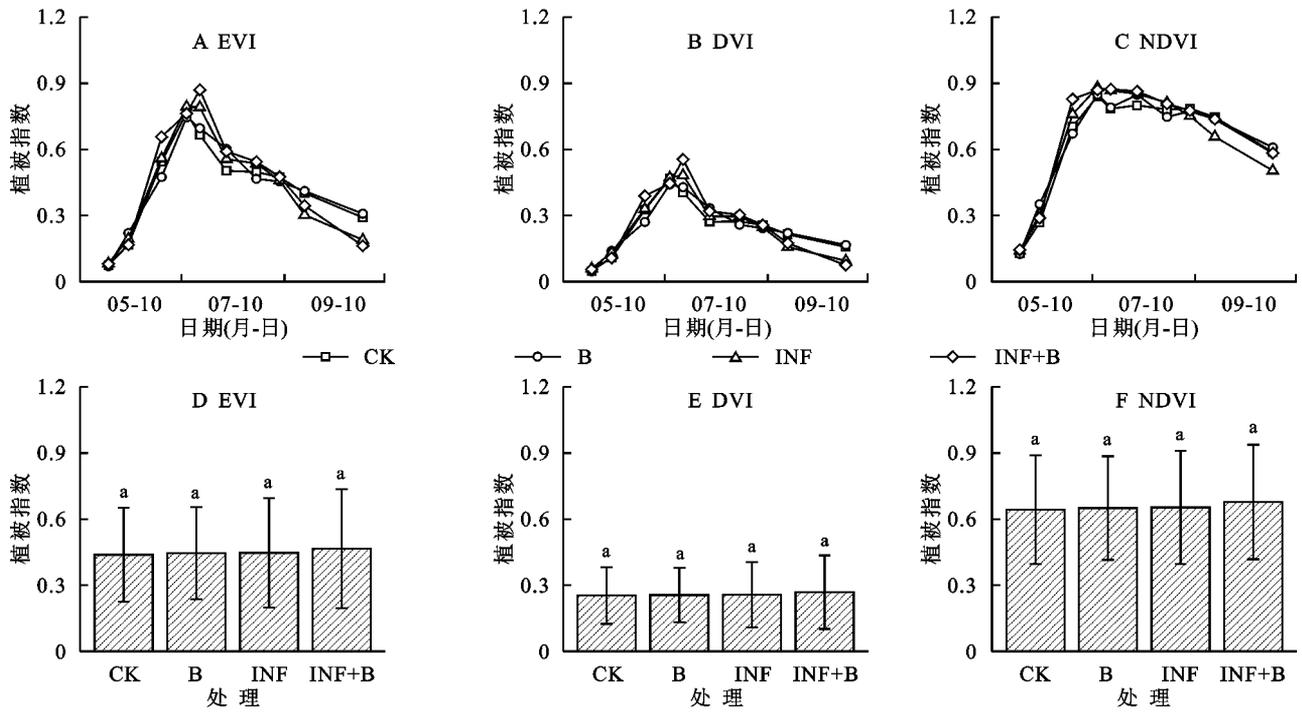
注:同列数据不同小写字母表示同一生育期 4 种处理差异显著($p<0.05$),同行数据不同大写字母表示同一处理不同生育期差异显著($p<0.05$)。

2.3 土壤呼吸对水热因子和植被指数变化的响应

2.3.1 土壤呼吸对土壤温度、水分的响应及与二者的复合关系 指数方程可以较好的拟合 R_s 与 T_{10} 的关系(表 5)。4 种处理下的 R_s 与 T_{10} 均呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)指数相关。 T_{10} 解释 R_s 季节变化的 24.4%~41.4%。CK 处理 T_{10} 对 R_s 的解释度与 Q_{10} 最低,INF+B 处理的解释度与 Q_{10} 最高,说明 B,INF 和 INF+B 处理能提高 T_{10} 对 R_s 的解释度和 Q_{10} ,以 INF+B 处理解释度最高。 R_s 与水分的复合关系符合幂函数模型(表 5),各处理中 W_s 对 R_s 的解释度为 14.6%~26.4%,其中 CK 和 B 处理 R_s 与 W_s 的回归关系未达显著水平($p>0.05$),INF 和 INF+B 处理 R_s 与 W_s 的回归关系分别达到显著水平($p<0.05$)和极显著水平($p<0.01$),表明 INF+B 处理下的土壤水分对 R_s 的解释度最高。各处理土壤呼吸与水热因子的复合拟合方程对土壤呼吸的解释度为 24.8%~45.9%,与单

因子拟合结果相比,各处理水热因子双变量模型的拟合优度 R^2 均有所提高,但与温度单因子模型的 R^2 相差不大。与 CK 处理相比,B,INF 和 INF+B 处理下的双变量模型拟合优度 R^2 提高,说明土壤水热因子一起调控土壤呼吸的变化,B,INF 和 INF+B 处理能够提高土壤水热因子的调控能力。

2.3.2 土壤呼吸对植被指数的响应 R_s 的季节变化与 EVI 和 DVI 的季节变化关系均为极显著($p<0.01$) (表 5)。INF 处理 NDVI 与 R_s 的回归关系达到极显著水平($p<0.01$),其余处理达显著水平($p<0.05$),EVI,DVI 和 NDVI 分别能解释 R_s 变化的 62.1%~88.3%,61.0%~90.7% 和 42.1%~68.0%。CK 和 B 处理下的 EVI,DVI 和 NDVI 对 R_s 的解释度较低,INF 和 INF+B 处理能够提高 3 种植被指数对 R_s 的解释度。与 CK 处理相比,B 处理降低了 EVI 和 DVI 对 R_s 的解释度,与 B 处理提高了 NDVI 对 R_s 的解释度不同。



注:相同字母表示处理间差异不显著($p > 0.05$)。

图3 4种处理植被指数动态变化及 One-Way 方差分析结果

Fig. 3 Dynamic changes and ANOVA results of vegetation indices among the 4 treatments

表5 4种处理土壤呼吸与生物因子和非生物因子的关系模型拟合结果

Table 5 Model fitting results for the relationship between soil respiration and biotic and abiotic factors in 4 treatments

因子	处理	拟合方程	R^2	Q_{10}	p	n
T_{10}	CK	$\ln R_s = 0.057T_{10} - 0.327$	0.244	1.78	< 0.05	24
	B	$\ln R_s = 0.068T_{10} - 0.425$	0.383	1.97	< 0.001	24
	INF	$\ln R_s = 0.062T_{10} - 0.338$	0.304	1.86	< 0.01	24
	INF+B	$\ln R_s = 0.076T_{10} - 0.698$	0.414	2.14	< 0.001	24
W_s	CK	$\ln R_s = -0.961 \ln W_s + 3.560$	0.146	—	> 0.05	24
	B	$\ln R_s = -0.893 \ln W_s + 3.492$	0.163	—	> 0.05	24
	INF	$\ln R_s = -0.820 \ln W_s + 3.163$	0.173	—	< 0.05	24
	INF+B	$\ln R_s = -1.033 \ln W_s + 3.697$	0.264	—	< 0.01	24
T_{10}, W_s	CK	$\ln R_s = 0.050T_{10} - 0.224 \ln W_s + 0.438$	0.248	—	< 0.05	24
	B	$\ln R_s = 0.065T_{10} - 0.104 \ln W_s - 0.074$	0.384	—	< 0.01	24
	INF	$\ln R_s = 0.052T_{10} - 0.301 \ln W_s + 0.670$	0.320	—	< 0.05	24
	INF+B	$\ln R_s = 0.061T_{10} - 0.498 \ln W_s + 0.958$	0.459	—	< 0.01	24
EVI	CK	$\ln R_s = 2.527EVI - 0.061$	0.668	—	< 0.01	10
	B	$\ln R_s = 2.656EVI - 0.028$	0.621	—	< 0.01	10
	INF	$\ln R_s = 2.591EVI - 0.153$	0.863	—	< 0.001	10
	INF+B	$\ln R_s = 2.366EVI - 0.086$	0.883	—	< 0.001	10
DVI	CK	$\ln R_s = 4.240DVI - 0.026$	0.685	—	< 0.01	10
	B	$\ln R_s = 4.446DVI + 0.020$	0.610	—	< 0.01	10
	INF	$\ln R_s = 4.371DVI - 0.119$	0.870	—	< 0.001	10
	INF+B	$\ln R_s = 3.883DVI - 0.026$	0.907	—	< 0.001	10
NDVI	CK	$\ln R_s = 1.735NDVI - 0.068$	0.421	—	< 0.05	10
	B	$\ln R_s = 2.055NDVI - 0.183$	0.473	—	< 0.05	10
	INF	$\ln R_s = 2.226NDVI - 0.450$	0.680	—	< 0.01	10
	INF+B	$\ln R_s = 1.884NDVI - 0.260$	0.520	—	< 0.05	10

2.3.3 基于生物因子和非生物因子的土壤呼吸模型
3种植被指数中,DVI能更好解释 R_s 的季节变化,选取2017年4个处理的 T_{10} , W_s 和DVI数据建立土壤呼吸复合模型(表6)。

结果表明,基于DVI建立的单因子土壤呼吸模型的拟合效果优于基于 T_{10} , W_s 建立的单因子和双因子土壤

呼吸模型(R^2 更高、AIC更低),说明本研究中生物因子对土壤呼吸的影响大于水热因子。基于DVI建立的三因子土壤呼吸模型与其单因子模型相比,拟合优度 R^2 提高、AIC降低,说明三因子土壤呼吸模型的预测精度有所增加。从AIC值来看,与DVI相关的三因子模型中拟合效果最好的是幂函数模型。

表 6 土壤呼吸与生物因子和非生物因子的关系模型拟合结果

Table 6 Model fitting results of the relationship between soil respiration and biotic and abiotic factors

模型	自变量	模型	R^2	p	AIC	n
单因子	T_{10}	$\ln R_s = 0.074 T_{10} - 0.592$	0.308	0.000	70.496	40
	W_s	$\ln R_s = -0.825 \ln W_s + 3.148$	0.201	0.004	76.219	40
	DVI	$\ln R_s = 4.176 \text{DVI} - 0.024$	0.755	0.000	29.014	40
双因子	T_{10}, W_s	$\ln R_s = 0.066 T_{10} - 0.144 \ln W_s - 0.054$	0.310	0.001	72.339	40
	T_{10}, W_s, DVI	$\ln R_s = 0.034 T_{10} + 0.456 \ln W_s + 4.183 \text{DVI} - 1.945$	0.787	0.000	27.348	40
三因子	T_{10}, W_s, DVI	$\ln R_s = 0.047 T_{10} + 0.216 \ln W_s + 0.763 \ln \text{DVI} + 0.647$	0.817	0.000	21.192	40
	T_{10}, W_s, DVI	$\ln R_s = 0.978 \ln T_{10} + 0.212 \ln W_s + 0.747 \ln \text{DVI} - 1.334$	0.836	0.000	16.760	40

2.4 环境因子对土壤呼吸的影响

对不同处理样地 R_s 年均值与环境因子进行皮尔逊相关分析,结果见表7。可以看出, R_s 与 T_{10} ,DVI,

pH和过氧化氢酶呈极显著正相关,与有机质呈显著正相关,与 W_s 呈极显著负相关,与容重呈显著负相关,与其他因子的相关性都不显著。

表 7 土壤呼吸与环境因子的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between soil respiration and environmental factors

影响因子	相关系数	影响因子	相关系数	影响因子	相关系数
T_{10}	0.977**	有机质	0.637*	速效钾	0.059
W_s	-0.976**	容重	-0.581*	蔗糖酶	0.270
DVI	0.990**	全氮	-0.011	碱性磷酸酶	0.266
pH	0.717**	有效磷	0.284	过氧化氢酶	0.743**

注:**表示在0.01水平显著,*表示在0.05水平显著。

3 讨论

3.1 无机肥与生物炭施用对土壤呼吸的影响

B,INF和INF+B处理均提高了生育前期的 R_s ,而成熟期CK处理的 R_s 高于其他处理。其原因可能是:无机肥和生物炭及其配施增加了土壤养分含量,能为高粱生长提供更多营养;降低了土壤容重,增加土壤孔隙度,使土壤耕层变得疏松,这些都会促进高粱提前生长发育,因此高粱生长发育速度更快, R_s 最高,而成熟期CK处理的高粱生长力相对较强,因此 R_s 最高,与前人研究结果相一致^[21]。虽然各处理的 R_s 在生育期的不同阶段存在显著差异,但在整个生育期未表现出显著差异,原因可能是B,INF和INF+B处理使高粱提前生长发育,生育期前期 R_s 较高,而生育期后期高粱也提前衰老,伴随着 R_s 下降,抵消了前期 R_s 的差异,使各处理整个生育期的 R_s 不存在显著差异。

到目前为止,关于无机肥与生物炭对土壤呼吸的

作用有促进^[22]、抑制^[8]和无显著影响^[23-24]。本研究中,B,INF和INF+B处理增加了 R_s ,可能与它们能提高土壤质量、促进高粱生长有关系。土壤酶由微生物产生,在一定程度上可以反映微生物数量,酶活性不仅在土壤有机碳和养分周转中起重要作用,也是土壤质量的敏感指标^[9]。B,INF和INF+B处理增加了土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性(图1),这在一定程度上反映出土壤质量的提升,与前人研究结果相一致^[9],也反映出微生物数量的增加,微生物数量增加对土壤有机质矿化起促进作用^[25]。同时,B,INF和INF+B处理提高了植被指数,说明它们能够提高高粱的植被覆盖度和光合能力,光合作用通过向根系和与根系相关的土壤微生物转运光合产物来刺激土壤呼吸^[26],此外还说明二者促进了地下生物量的增加,因为植被指数与地上生物量和地下生物量呈显著相关,且与地下生物量的相关性更强^[27]。地下生物的自养呼吸构成了土壤呼吸的一部分,是B,INF和INF+B处理促进土壤呼吸的重要原因。

施肥与生物炭未显著改变土壤温度,可能与二者施用量有关,此外作物覆盖会缩小处理间地表反射率差异,降低生物炭吸热能力^[28]。本研究中,土壤温度能解释土壤呼吸变化的 24.4%~41.4%,B,INF 和 INF+B 处理提高了土壤温度对土壤呼吸的解释度和 Q_{10} 值,与前人研究结果相一致^[4],原因可能是:一方面无机肥与生物炭及其配施通过改善土壤透气性、提高土壤有机质含量(图 1)和减少养分淋失,形成相对较好的土壤环境,从而减少限制性因素对土壤呼吸的影响,提高温度对于土壤呼吸的解释度^[29];另一方面植物根系具有较高的温度敏感性,根系呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,通过促进植物根系生长和根系分泌物增加来提高土壤呼吸的温度敏感性;此外,Ge 等^[12]的研究表明低量生物炭施加提高了 Q_{10} 值,可能是由于生物炭本身增加了有效营养成分和生物炭特定孔结构中底物和胞外酶接触位点的增加。 W_s 最高值出现时间滞后于 T_{10} 和植被指数最高值出现时间,分析原因可能是此时雨季刚过土壤含水量高,温度开始下降、水分蒸发减弱^[7],而且高粱进入成熟期对水分需求减少,故 W_s 较高。单施生物炭增加了土壤水分含量($p > 0.05$),可能与生物炭和土壤颗粒形成微小团粒结构、吸附水分子有关^[30]。高粱属于喜温喜光的耐旱植被,根系发达,即使在土壤水分缺乏情况下也能顺利吸收水分^[31],当水分含量过高时生长发育会受抑制。本研究中土壤呼吸速率随着土壤湿度的增加而降低,原因可能是土壤湿度过高使植物根系和微生物处于缺氧环境中,抑制生物呼吸^[5]。INF+B 处理土壤呼吸与水分间的负相关关系达到极显著水平,表明施肥与生物炭配施处理下的土壤水分对土壤呼吸的解释度增加,原因可能是土壤性质的改善使土壤水分对呼吸速率的限制性相对增大。

3.2 土壤呼吸速率变化成因

一系列的生物因子(地上植被结构和光合作用)和非生物因子(温度和水分)控制着土壤呼吸各组分(纯根呼吸、根际微生物异养呼吸和与根无关的土壤有机质的呼吸)的动态变化^[3]。前人的研究结果表明,天然林地的 R_s 主要受土壤温度和湿度的共同影响^[32]。而本研究中,生物因子对于 R_s 的作用大于水热因子,植被指数与 R_s 的拟合度最高,DVI 能解释土壤呼吸变化的 75.5%(表 6)。植被指数常用于评估植被冠层光合作用潜力,植被通过光合作用生成的碳水化合物由叶片传输到根部,一部分用于根的生长和呼吸,另一部分由根系分泌到土壤中,被根际微生物

所分解和利用^[33]。因此,植被地上的光合作用通过对根系光合产物的供应以及对根际分泌物数量和质量的控制,与根际呼吸紧密联系,进而对地表总的土壤呼吸产生影响^[34]。 R_s 在高粱生育期表现出先升高再下降的变化趋势,主要与高粱的生长活动有关:抽穗期高粱生长最旺盛,通过光合作用向根部输送的光合产物多,植物根系生长旺盛,根系分泌物和根际微生物数量随之增加,促进了土壤自养呼吸作用^[5,32];而苗期植株较小,根系生长缓慢,且此阶段温度较低,根系活力弱,因此土壤呼吸速率较低;成熟期土壤温度有所回落,随着根系衰老和根系活力下降,土壤呼吸速率降低^[21,32]。此外,NDVI 对 R_s 的解释能力低于 EVI 和 DVI 的原因可能是:当作物的生长进入生殖生长时期以后,NDVI 由于受到高植被覆盖度的影响,信号达到饱和,不再指示 R_s 的变化,而 EVI 和 DVI 这两个植被指数改善了背景反射,对浓密植被覆盖情况下的变化具有更大的敏感性,在整个生育期都比较好的捕捉到了 R_s 的变化^[18]。

在生态系统中,温度对土壤呼吸的影响是一直存在的,但是存在限制因子(例如土壤水分)可能影响土壤呼吸,而在频繁灌溉(不缺水)的条件下土壤含水量与土壤呼吸的相关关系并不显著^[26]。土壤温度一方面会影响植物光合作用和根系生长,另一方面会改变微生物活性、土壤酶和生物化学反应速率,从而调控 R_s ^[35]。土壤湿度通过影响根系和微生物的生理过程以及土壤通气状况进而调控土壤呼吸速率,且只有在过低或过高时才会对土壤呼吸产生影响,表现出阈值效应^[32]。土壤温度的单因素模型和水热因子的双因素指数—幂函数模型对 R_s 的解释度分别为 30.8%和 31.0%,原因可能是土壤水分充足, R_s 未受土壤水分胁迫的影响,使得加入水分因子后模型的拟合精度并无明显提升。基于 DVI 建立的单因素与三因素土壤呼吸模型和土壤水热单、双因素模型相比,拟合精度很大程度上提高,这表明土壤呼吸与植被地上部分的光合作用之间存在很紧密的联系,模拟土壤呼吸的季节变化需要考虑与光合作用有关的因子。郭艳萍等^[36]在天龙山灌丛生态系统和姚雪雯等^[6]在华东地区农田生态系统的研究表明:基于植被指数和水热因子的多因素土壤呼吸模型预测效果强于单因素预测效果,与本研究结果相一致,增加植被指数后模型的解释度提高可能与高粱生育期植被盖度和叶面积指数较高有关^[3]。

4 结论

4个处理的 R_s 均具有明显的季节变化趋势,拔节期和抽穗期较高,苗期和成熟期较低;苗期、拔节期和抽穗期 B, INF 和 INF+B 处理的 R_s 高于 CK 处理,成熟期低于 CK 处理,全生育期 4 个处理间 R_s 均无显著差异。

4个处理的 R_s 与 T_{10} , EVI, DVI 和 NDVI 的关系均达到显著水平;除 CK 和 B 处理外,其余两处理 R_s 与 W_s 的关系均达显著水平; T_{10} , W_s 和 DVI 分别能解释 R_s 季节变化的 30.8%, 20.1% 和 75.5% (2017 年所有数据结果)。无机肥与生物炭及其配施能够提高土壤水热单因素和双因素对 R_s 的解释能力。从 R^2 和 AIC 值来看,基于土壤水热因子和 DVI 建立的 3 因素模型能够更好地预测 R_s 的季节变化,其中幂函数土壤呼吸模型预测效果最好。

参考文献 (References):

- [1] Lal R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8):3285-3301.
- [2] Zhao P, Pumpanen J, Kang S Z. Spatio-temporal variability and controls of soil respiration in a furrow-irrigated vineyard [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196:104424.
- [3] Wu C Y, Gaumont-Guay D, Andrew Black T, et al. Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 94:80-90.
- [4] 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 *Phyllostachys edulis* forest [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(11):1177-1189.
- [5] Zhang Y, Zhu G F, Yin L, et al. Optimal soil water content and temperature sensitivity differ among heterotrophic and autotrophic respiration from oasis agroecosystems [J]. *Geoderma*, 2022, 425:116071.
- [6] 姚雪雯, 陈书涛, 王君, 等. 不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5):1140-1149.
Yao X W, Chen S T, Wang J, et al. Relationships between soil respiration and hyperspectrum in different croplands [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5):1140-1149.
- [7] 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]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(7):778-785.
- [8] Fang B, Lee X, Zhang J, et al. Impacts of straw biochar additions on agricultural soil quality and greenhouse gas fluxes in karst area, Southwest China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(5/6):526-533.
- [9] Wang Q Y, Yuan J, Yang X, et al. Responses of soil respiration and C sequestration efficiency to biochar amendment in maize field of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 223:105442.
- [10] Liu X Y, Zheng J F, Zhang D X, et al. Biochar has no effect on soil respiration across Chinese agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 554:259-265.
- [11] Zhang Y Y, Dang Y T, Wang J X, et al. A synthesis of soil organic carbon mineralization in response to biochar amendment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 175:108851.
- [12] 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, 730:139003.
- [13] Xun W B, Zhao J, Xue C, et al. Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(6):1907-1917.
- [14] Lai R, Arca P, Lagomarsino A, et al. Manure fertilization increases soil respiration and creates a negative carbon budget in a Mediterranean maize (*Zea mays* L.): based cropping system [J]. *Catena*, 2017, 151:202-212.
- [15] Phares C A, Akaba S. Co-application of compost or inorganic NPK fertilizer with biochar influences soil quality, grain yield and net income of rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(12):3600-3610.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 严昶升. 土壤肥力研究方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1988:234-235.
Yan C S. *Research methods of soil fertility* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1988:234-235.
- [18] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the

- radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2):195-213.
- [19] 武江星. 生物炭和覆膜对高粱高光谱特征及其土壤呼吸的影响[D]. 太原: 山西大学, 2016.
Wu J X. The effect of bichor and film mulching on high spectral characteristics of sorghum and its soil respiration[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.
- [20] Gamon J A, Field C B, Goulden M L, et al. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(1):28-41.
- [21] 王颖, 娄运生, 石一凡, 等. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算[J]. *生态学报*, 2018, 38(14):5099-5108.
Wang Y, Lou Y S, Shi Y F, et al. Methane emission in response to nighttime warming and its hyperspectral estimation in a paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14):5099-5108.
- [22] Iqbal J, Hu R G, Lin S, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil(Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3/4):292-302.
- [23] Abagandura G O, Chintala R, Sandhu S S, et al. Effects of biochar and manure applications on soil carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes from two different soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(6):1664-1674.
- [24] Sun Q Q, Wang R, Wang Y, et al. Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: Does soil initial fertility matter[J]. *Geoderma*, 2018, 325:172-182.
- [25] Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166:59-66.
- [26] Huang N, He J S, Niu Z. Estimating the spatial pattern of soil respiration in Tibetan alpine grasslands using Landsat TM images and MODIS data [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 26:117-125.
- [27] Chen J, Gu S, Shen M, et al. Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(24):6497-6517.
- [28] 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.
- [29] 朱娟, 班远冲. 陆地生态系统呼吸温度敏感性及其影响因素研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, 42(1):158-161.
Zhu J, Ban Y C. Temperature sensitivity and influencing factors of terrestrial ecosystem respiration [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(1):158-161.
- [30] 杨东, 李新举, 孔欣欣. 不同秸秆还田方式对滨海盐渍土水盐运动的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6):74-78.
Yang D, Li X J, Kong X X. Effects of different straw returning modes on the water and salt movement in the coastal saline soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(6):74-78.
- [31] Ndlovu E, van Staden J, Maphosa M. Morpho-physiological effects of moisture, heat and combined stresses on *Sorghum bicolor* Moench (L.) and its acclimation mechanisms[J]. *Plant Stress*, 2021, 2:100018.
- [32] 沈健, 何宗明, 董强, 等. 环境因子对沿海防护林土壤呼吸季节动态的影响[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(6):640-647.
Shen J, He Z M, Dong Q, et al. Effects of environmental factors on seasonal dynamics of soil respiration in coastal protection forests[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(6):640-647.
- [33] Kuzyakov Y, Gavrichkova O. Review: Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: A review of mechanisms and controls[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(12):3386-3406.
- [34] Kuzyakov Y, Larionova A A. Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4):503-520.
- [35] 韩乐, 苏永红, 王尚涛, 等. 敦煌葡萄园地土壤呼吸特征及其与水热因子的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(7):185-193.
Han L, Su Y H, Wang S T, et al. Respiration characteristics and the relation with the hydrothermal factors in Dunhuang vineyard [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(7):185-193.
- [36] 郭艳萍, 李洪建. 天龙山灌丛生态系统土壤呼吸对水热和植被因子的响应[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(4):131-139.
Guo Y P, Li H J. Response of soil respiration to soil moisture, temperature and vegetation factors in two shrub communities of Tianlong Mountain area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(4):131-139.