



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

施用生物质炭5年后夏玉米土壤呼吸研究

马雯琪, 蒋靖佰伦, 李典鹏, 唐光木, 徐万里, 贾宏涛

引用本文:

马雯琪, 蒋靖佰伦, 李典鹏, 等. 施用生物质炭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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 544–551 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0143>

生物质炭对华北平原4种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响

张水清, 张博, 岳克, 孙贇, 张秀玲, 林杉, 黄绍敏

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 127–134 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0005>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>

生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响

沈晨, 颜鹏, 魏吉鹏, 张兰, 张丽平, 李鑫, 韩文炎

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 292–300 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0320>

外加镉处理下秸秆生物质炭对土壤酶活性的影响

尚艺婕, 王海波, 史静

农业资源与环境学报. 2015(1): 22–27 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0266>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马雯琪, 蒋靖佰伦, 李典鹏, 等. 施用生物质炭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 Wen-qi, JIANG Jing-bai-lun, LI Dian-peng, 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.



开放科学 OSID

施用生物质炭5年后夏玉米土壤呼吸研究

马雯琪¹, 蒋靖佰伦¹, 李典鹏¹, 唐光木², 徐万里^{2*}, 贾宏涛^{1,3*}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830092; 3. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探明施用生物质炭对风沙土土壤呼吸及其组分的影响, 在新疆石河子121团, 以单施化肥(T0)为对照, 探究了一次施加15.75(T1)、31.50(T2)、63.00 t·hm⁻²(T3)和126.00 t·hm⁻²(T4)生物质炭5年后农田风沙土土壤呼吸组分特征及其影响因素。结果表明: 风沙土土壤呼吸与异养呼吸日动态均呈单峰曲线, 峰值出现在13:00左右; T4处理日平均呼吸速率为2.74 μmol·m⁻²·s⁻¹, 显著高于其他处理($P<0.05$); 生物质炭显著改变了土壤异养呼吸, 对自养呼吸无显著影响。土壤呼吸速率随生物质炭施用量的增加显著增加, 随玉米生育期的推进而降低。土壤呼吸速率与土层5、10、15 cm温度显著相关, 与土壤含水率无显著相关性; 土壤呼吸温度敏感性随生物质炭施用量的增加而增强。综上, 生物质炭通过改变绿洲农田风沙土土壤异养呼吸进而改变总呼吸, 增强了土壤呼吸的温度敏感性, 促进了土壤CO₂排放。

关键词: 生物质炭; 风沙土; 土壤呼吸; 影响因子; 温度敏感性

中图分类号: S154.1; S513 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2021)01-0111-08 doi: 10.13254/j.jare.2020.0044

Effect of biochar application on soil respiration in a summer maize crop after five years

MA Wen-qi¹, JIANG Jing-bai-lun¹, LI Dian-peng¹, TANG Guang-mu², XU Wan-li^{2*}, JIA Hong-tao^{1,3*}

(1. College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830092, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China)

Abstract: A field experiment was conducted to explore the effects of biochar application on changes in soil respiration component characteristics and influencing factors in the Shihezi 121st group, Xinjiang, five years after the treatment. Five treatments were applied, namely a single application of chemical fertilizer(T0) and applications of 15.75(T1), 31.50(T2), 63.00 t·hm⁻²(T3), and 126.00 t·hm⁻²(T4) of biochar. The diurnal dynamics of soil respiration and heterotrophic respiration in sandy soil showed a single peak curve, with the peak value appearing at approximately 13:00. The daily average respiration rate of the T4 treated soil was 2.74 μmol·m⁻²·s⁻¹, which was significantly higher than that of the other treatments ($P<0.05$). Biochar application significantly changed soil heterotrophic respiration, while there was no significant effect on autotrophic respiration. The soil respiration rate significantly increased with the increase in the quantity of biochar and decreased with the growth period of maize. There was a significant correlation between the soil respiration rate and soil temperature at 5, 10, and 15 cm soil depths, but no significant correlation between soil respiration and soil water content. The temperature sensitivity of soil respiration increased with the increase of biochar application. Thus, biochar can change the total respiration of sandy soil in oasis farmlands by improving soil heterotrophic respiration. Biochar application also increased the temperature sensitivity of soil respiration and enhanced soil CO₂ emissions.

Keywords: biochar; sandy soil; soil respiration; influencing factors; temperature sensitivity

收稿日期: 2020-02-12 录用日期: 2020-05-08

作者简介: 马雯琪(1995—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 从事农田土壤碳循环方面的研究。E-mail: mwqhappy@yeah.net

*通信作者: 徐万里 E-mail: wlxu2005@163.com; 贾宏涛 E-mail: hongtaojia@126.com

基金项目: 天山雪松计划(2017XS08); 国家自然科学基金项目(31560171); 新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2019-019)

Project supported: Project for Tian Shan Cedar(2017XS08); The National Natural Science Foundation of China(31560171); Xinjiang Agricultural University Graduate Research Innovation Project(XJAUGRI2019-019)

土壤呼吸是土壤碳库向大气输出碳的主要途径,也是大气CO₂重要的源,在陆地生态系统碳循环过程中具有重要地位^[1]。土壤呼吸主要包括微生物的异养呼吸和植物根系的自养呼吸,两者约占土壤呼吸的95%^[2]。因此,明确土壤呼吸组分对土壤呼吸的贡献率,对准确评估土壤碳过程具有重要意义^[3]。近年来,国内外学者对森林和草地生态系统土壤呼吸组分进行了大量研究^[4-5],而针对旱作农田风沙土土壤呼吸组分的研究相对较少。风沙土主要分布在中国干旱、半干旱地区,是新疆分布面积最大的土类,其有机碳含量相对较低,是陆地生态系统潜在的碳汇^[6-8]。提高农田风沙土有机碳含量和碳汇功能,对农业可持续发展和缓解气候变化具有重要意义。

生物质炭是指生物质在缺氧或厌氧条件下经高温裂解后生成的一种高度芳香化难溶性固态富碳物质^[9],其高度生物化学稳定性在土壤固碳减排方面发挥重要作用,对全球碳循环具有重要的影响^[10]。生物质炭在土壤改良中得到了较多的应用,施用生物质炭显著提升了表层土壤有机碳、无机碳含量及碳储量^[11],降低了土壤有机碳矿化速率和累积矿化量^[12],表现出明显的固碳作用。生物质炭进入土壤后随着时间的推移发生氧化和表面结构破裂,官能团种类、数量、芳香性和极性等都会发生改变^[13],从而影响生物质炭的固碳减排能力^[14]。作为外源有机物,生物质炭施入土壤,在短期内会对土壤原有有机质产生激发效应^[15]。即使生物质炭施入土壤的时间相同,其对土壤呼吸的影响仍存在促进^[16-17]和无影响^[18]的差异。此外,生物质炭对土壤呼吸组分的影响也存在较大的不确定性。生物质炭添加可促进土壤自养呼吸,降低土壤异养呼吸^[19-20];但也有研究发现生物质炭会显著降低土壤自养呼吸^[21],这可能与土壤类型、生物质炭性质以及水热因子等有关^[22-24]。目前,生物质炭在农田生态系统中得到较为广泛的应用,而有关生物质炭对风沙土土壤呼吸及组分影响的研究较少。

本试验利用前期已建立的定位试验平台,拟探明单次施用不同量生物质炭5年后土壤呼吸及组分日变化特征、玉米不同生育时期土壤呼吸以及影响土壤呼吸的水热因子和土壤呼吸温度敏感系数变化特征,以期于干旱区绿洲农田风沙土培肥提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于新疆石河子垦区兵团农八师121团炮台

土壤改良试验站进行,试验站位于新疆准噶尔盆地绿洲边缘(84°58′~86°24′E,43°26′~45°20′N)。研究区属内陆干旱半荒漠气候,冬季长而严寒,夏季短而炎热,年平均气温7.5℃,日照2 525 h,无霜期169 d,年降雨量225 mm,年蒸发量1 250 mm。供试土壤类型为风沙土,土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为53.2%、27.2%和19.6%。试验前土壤0~20 cm土层基本理化性质:有机质1.38 g·kg⁻¹,全氮0.76 g·kg⁻¹,碱解氮7.4 mg·kg⁻¹,有效磷4.6 mg·kg⁻¹,速效钾97 mg·kg⁻¹,pH 8.51。试验所用生物质炭是由河南三利新能源有限公司提供的小麦秸秆炭,在450℃限氧条件下炭化4~8 h,粉碎后过2 mm筛制成,基本理化性质:有机碳670 g·kg⁻¹,有效磷82.2 mg·kg⁻¹,速效钾1 590 mg·kg⁻¹,pH 9.90。

1.2 试验设计

试验始于2014年,采用随机区组设计,根据秸秆炭化量(2.625 t·hm⁻²·a⁻¹)共设5个处理:单施化肥(T0),分别施加15.75(T1)、31.50(T2)、63.00 t·hm⁻²(T3)和126.00 t·hm⁻²(T4)生物质炭。每个处理设3次重复,共计18个小区,小区面积为4.6 m×7.0 m,地膜宽2.1 m,每个小区2行地膜,每行地膜3行滴灌带,6行玉米,小区间隔1 m,四周均有保护行。供试生物质炭于2014年播种前一次性撒施,并与表层0~20 cm土壤均匀混合。试验所用化肥施用量一致:尿素660 kg·hm⁻²,过磷酸钙225 kg·hm⁻²,磷酸二氢钾165 kg·hm⁻²,硫酸钾15 kg·hm⁻²,其中过磷酸钙和硫酸钾作为基肥一次性施入,其余氮肥和磷酸二氢钾随滴灌分次施入。在此期间,各处理农艺措施均保持一致。2019年5月16日播种,供试玉米品种为新玉53号,灌溉方式为滴灌,覆膜处理滴灌管置于膜下,种植体系为一年一茬,田间管理措施与当地保持一致。

1.3 土壤呼吸、土壤温度和含水率以及土壤容重的测定

土壤呼吸速率采用LI-8100土壤碳通量测量系统(LI-COR, Lincoln, 美国)进行测定。每个小区内沿对角线设2个内径为20 cm、高10 cm的PVC管底座,将底座嵌入土壤,顶端距离地面3 cm,其中一个设置在玉米株间,株距为25 cm;另一个设置在垄间裸地,垄间宽度为50 cm。底座具体埋设位置如图1所示。采用根系排除法测定土壤呼吸组分^[25],玉米株间测定的土壤呼吸为土壤总呼吸(R_t),垄间裸地测定的土壤呼吸为土壤异养呼吸,用土壤总呼吸减去相应的土壤异养呼吸,即为玉米根系的自养呼吸。试验期间及时

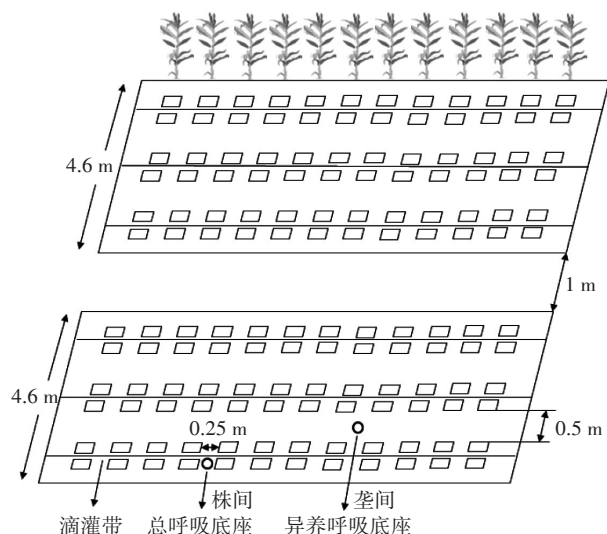


图1 底座埋设位置示意图

Figure 1 Schematic diagram of the location of the chamber base

清理裸地及底座内所有地上植物,为减少嵌入底座短期内对土壤呼吸的扰动,在初次测量土壤呼吸速率前24 h固定好PVC管底座,固定好的底座留在试验小区内直至玉米生育期结束。于2019年6月22—24日(拔节期)、7月28—30日(抽穗期)、8月20—22日(灌浆期)和10月5—7日(成熟期)对各小区土壤呼吸速率进行监测。测定时段为07:00—22:00,每3 h监测一次,每个PVC管测量时间为120 s。

土壤温度采用地温计测定,监测前24 h在底座附近设置地温计,分别对5、10、15 cm处土壤地温进行监测。以底座为圆心,在半径50 cm的范围内,采集0~20 cm土壤用于含水率的测定(烘干法)。采用环刀法对土壤0~20 cm容重进行测定。

1.4 数据处理与统计分析

将土壤呼吸速率数值经对数转换后,采用线性方程模拟土壤呼吸与土壤温度之间的关系,见公式(1):

$$\lg R_t = a + bT \quad (1)$$

式中: R_t 为土壤总呼吸速率, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; T 为土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; a 、 b 为拟合参数。

采用Jian等^[26]方法计算不同土层温度变化敏感性对土壤呼吸速率的响应, Q_{10} 表示土壤温度升高10 $^{\circ}\text{C}$ 时,土壤呼吸速率变化的倍数,见公式(2):

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{10/(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为对应温度 T_1 和 T_2 ($^{\circ}\text{C}$)时的土壤呼吸速率, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

采用Microsoft Excel 2016、SPSS 24.0和Origin

2018分别进行数据处理、统计分析和绘图。采用LSD最小显著差数法检验不同处理间差异显著性($\alpha=0.05$);用Pearson相关系数表示土壤呼吸与水热因子之间的相关性;采用主成分分析法对土壤呼吸速率影响因素进行提取,并计算各因子的影响权重。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸日动态变化

玉米拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期,不同生物质炭处理的土壤呼吸速率日动态变化趋势基本一致,均呈先增后降的单峰曲线(图2a)。T4、T3、T0、T2、T1的曲线峰值分别为3.24、2.28、2.22、2.12、2.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,且均出现在13:00左右;各处理土壤总呼吸速率平均值分别为2.74、2.09、2.04、1.89、1.88 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,T4处理显著高于其他处理($P<0.05$)。T1处理的土壤呼吸速率在19:00时降至1.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,随后又增加;其余处理的土壤呼吸速率最低值均出现在22:00。不同生物质炭处理土壤异养呼吸总体呈先增后降的趋势(图2b),在13:00达到峰值。各处理土壤自养呼吸总体变化趋势不明显(图2c),除T4外,其他各处理波动幅度较小。

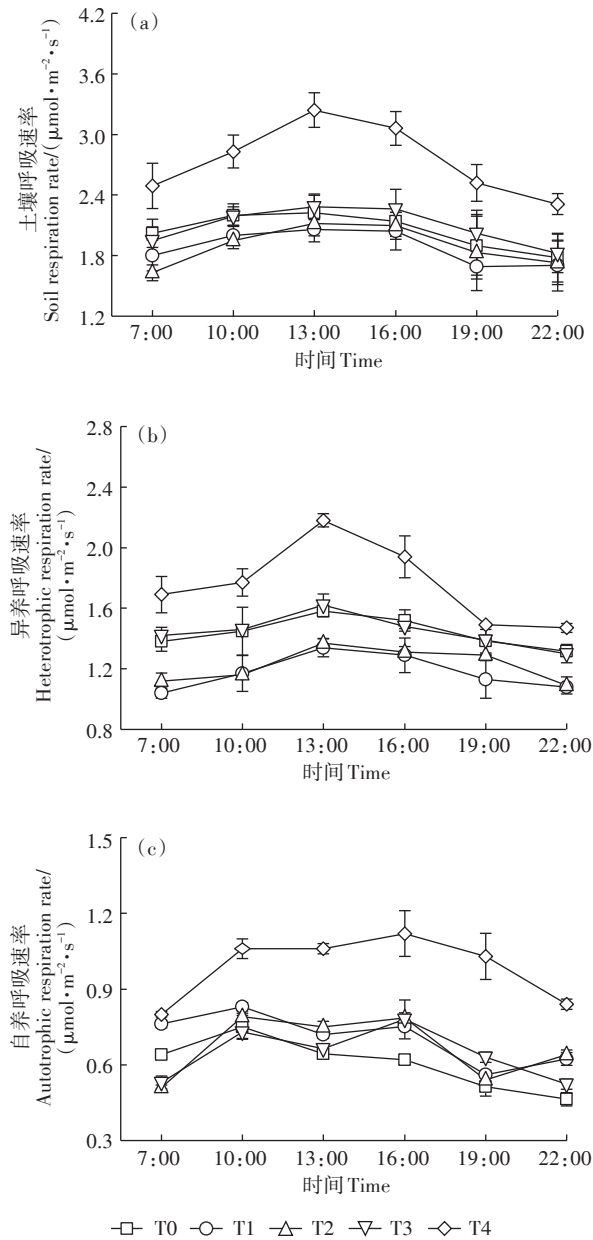
2.2 不同生育时期土壤总呼吸变化

施用生物质炭的处理,土壤呼吸速率随着施炭量的增加而增加(图3)。在玉米拔节期、抽穗期、灌浆期,T4处理土壤呼吸速率较T0显著增加了24.13%、26.22%和34.69%($P<0.05$),较T1处理显著增加了50.32%、32.95%和74.57%。拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期T1处理土壤呼吸速率均低于T0处理,说明单次施用生物质炭处理5年后可降低风沙土土壤呼吸速率。

玉米生育期内,不同处理间土壤呼吸速率表现为T4>T3>T0>T2>T1(图4)。T1处理土壤总呼吸速率较T0处理降低了7.10%($P<0.05$),T4处理的土壤总呼吸速率较T1处理则显著增加了27.04%($P<0.05$)。不同处理间的土壤异养呼吸具有显著差异($P<0.05$),表现为T4>T0>T3>T2>T1,T0处理的异养呼吸占土壤总呼吸的比例为76.78%,显著高于其他处理($P<0.05$);T1处理异养呼吸占土壤总呼吸的比例为59.89%,显著低于其他处理($P<0.05$)。各处理土壤异养呼吸对土壤总呼吸的贡献率为59.89%~76.78%,土壤自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率为23.22%~40.11%。

2.3 土壤呼吸与水热因子的相关性及其温度敏感系数

不同处理土壤呼吸速率与不同土层土壤温度显



T0、T1、T2、T3 和 T4 分别代表生物质炭不同施用量,依次为 0、15.75、31.50、63.00 $t \cdot hm^{-2}$ 和 126.00 $t \cdot hm^{-2}$ 。下同
T0, T1, T2, T3 and T4 represent 0, 15.75, 31.50, 63.00 $t \cdot hm^{-2}$ and 126.00 $t \cdot hm^{-2}$ biochar application, respectively. The same below

图2 施用生物质炭5年后土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸日动态变化

Figure 2 Diurnal dynamics of soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration after 5 years of application of biochar

著相关(图5)。除T4处理外,土壤呼吸速率与15 cm 土层温度的相关性高于5 cm 土层和10 cm 土层。温度敏感系数 Q_{10} 随生物质炭施用量的增加呈增加趋势,T3、T4处理的 Q_{10} 值显著高于T0、T1处理(图6)。相关性分析表明,不同处理土壤呼吸与土壤含水率无

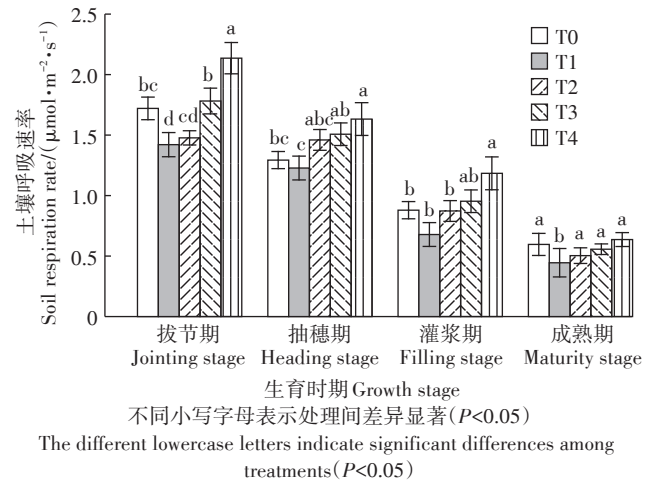


图3 施用生物质炭5年后玉米不同生育时期的土壤呼吸
Figure 3 The soil respiration in different growth stage after 5 years of biochar application

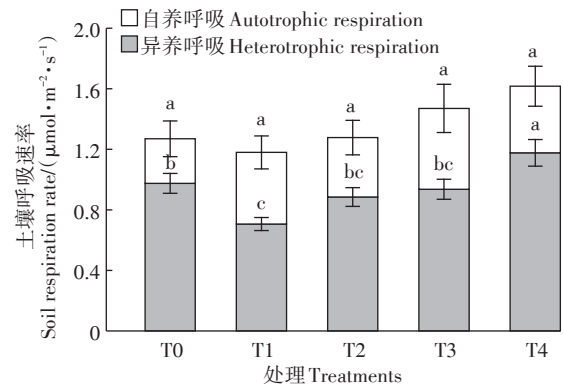


图4 施用生物质炭5年后各处理土壤呼吸组分
Figure 4 Soil respiration components in different treatments after 5 years of biochar application

显著相关性($P>0.05$)。

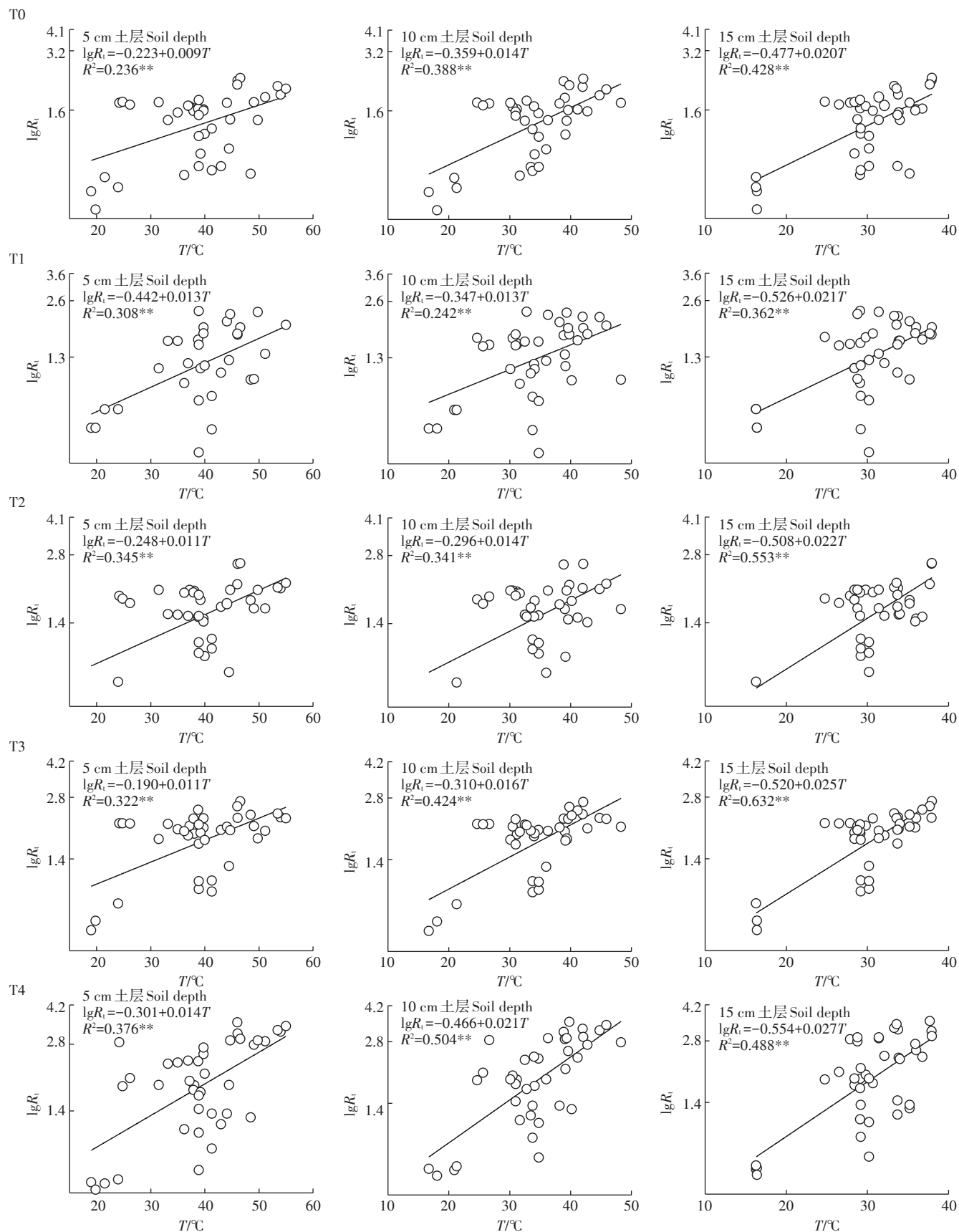
2.4 土壤因子对土壤呼吸速率的贡献率分析

采用主成分分析法对5、10、15 cm 土层温度及含水率和容重进行主成分提取,明确其对土壤呼吸速率影响的贡献率。由表1可知,所选取的水热因子的贡献率达到了79.98%,主成分1和主成分2分别为55.83%和24.15%(表1)。通过计算可知5、10、15 cm 土层温度对土壤呼吸速率影响的权重最大。

3 讨论

3.1 施用生物质炭5年后风沙土土壤呼吸特征

施用生物质炭5年后风沙土土壤呼吸速率存在明显的日变化规律,呈先增后降的单峰曲线,由于新疆夏季昼夜温差较大,在7:00、19:00和22:00时根系呼吸较弱导致土壤呼吸速率较低。在13:00时土壤

图5 土壤呼吸速率($\lg R_i$)与不同土层温度(T)的相关性Figure 5 The relationship between soil respiration rate ($\lg R_i$) and soil temperature (T) in different layers

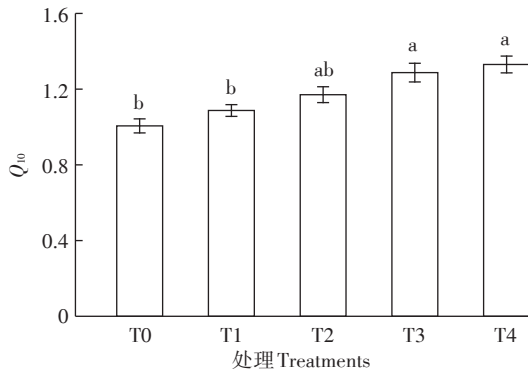


图6 土壤呼吸的温度敏感系数(Q_{10})

Figure 6 Temperature sensitivity index(Q_{10}) of soil respiration

表1 主成分载荷矩阵及权重系数

Table 1 Principal component loading matrix and weight coefficient

指标 Index	主成分 Principal component		权重系数 Weight coefficient
	PC1	PC2	
5 cm 土层温度	0.901	0.226	0.362
10 cm 土层温度	0.947	0.266	0.387
15 cm 土层温度	0.891	0.103	0.307
土壤含水率	-0.423	0.679	0.008
土壤容重	0.331	-0.784	-0.064
特征值	2.792	1.207	
贡献率/%	55.83	24.15	

呼吸速率达到峰值,此时土壤酶活性较高,促进了植物根系的代谢速率^[27-28]。由此可知,生物质炭在施入土壤后,不同时刻作用效果存在显著差异,峰值过后土壤呼吸随着时间的推移缓慢降低,这与Smith等^[29]的研究结果相似。在玉米生育期测得不同处理土壤呼吸速率为T4>T3>T2>T1,随着生育期的推进则呈逐渐降低趋势,生物质炭施用量在一定阈值内可抑制土壤呼吸,达到减排的效果;但超过一定阈值,随着施用量的增加反而会促进土壤呼吸。成熟期的土壤呼吸显著低于其他3个时期,可能是由于玉米生长后期死根数量增加以及受氮肥供应水平的限制,减缓了作物的生长,从而降低土壤呼吸^[30]。

土壤呼吸分为自养呼吸和异养呼吸,区分两者在土壤呼吸中所占比例对明确土壤呼吸机理具有重要意义^[31]。对于不同生态系统,根系呼吸对土壤总呼吸的贡献率在10%~90%之间波动^[32],根系呼吸变异较大。本研究结果表明,不同处理的土壤自养呼吸差异不显著,对土壤总呼吸的贡献率为23.22%~40.11%。李亚森等^[33]的研究发现,根系的自养呼吸对总呼吸的

贡献率为34.55%~41.56%,这一变化略高于本研究结果,主要原因可能是本研究中生物质炭在土壤中发生了老化现象^[34],其内部的结构和性质发生了改变,影响了土壤养分转化,从而影响玉米根系呼吸。同时本研究发现土壤异养呼吸随着生物质炭施用量的增加而增加,这一结果与Li等^[20]得出的结论相反。本研究中生物质炭在土壤中风化时间长达5年,一方面新鲜生物质炭含有的易氧化有机碳已经被微生物矿化分解,降低了微生物分解过程中不稳定碳的利用率;另一方面生物质炭对本底有机碳的吸附防止了微生物及其胞外酶的进入^[15],从而降低生物质炭对本底有机碳的分解。Zhou等^[35]研究发现,施用生物质炭对亚热带森林土壤的自养呼吸和异养呼吸没有显著影响,且生物质炭的不同施用量对土壤自养呼吸和异养呼吸也没有显著差异,这与本研究结果不一致。可能是由于本研究绿洲农田风沙土经历了长期的耕作模式,地表微环境以及土壤有机质的变化都能够改变土壤异养呼吸,同时土地管理措施以及水热因子的变化间接影响土壤自养呼吸^[36]。由此可见,生物质炭对土壤呼吸组分的影响,可能与土壤类型、作物种类、生物质炭的类型^[37]、施用量以及试验时间有一定关系。

3.2 施用生物质炭5年后土壤呼吸及水热因子的关系

土壤温度和含水率是影响土壤呼吸的关键因子。土壤温度的变化在很大程度上可以解释土壤呼吸日变化^[38]。本研究采用线性方程对土壤呼吸和土层5、10、15 cm温度进行拟合,发现土壤呼吸与土壤温度显著相关,这与张阳阳等^[39]研究结果相似。温度会影响土壤酶与微生物活性以及植物根系生长^[40],因此与土壤微生物呼吸和植物根系呼吸密切相关。本试验测得的不同处理土壤 Q_{10} 介于1.16~1.23之间,这与Zheng等^[41]测定的农田生态系统 Q_{10} 范围(1.28~4.75)不同,可能是由于生物质炭进入土壤5年后,对碳排放的激发效应随着土壤中易氧化有机碳的矿化逐渐消失^[20]。同时,也有研究发现,不同环境下的 Q_{10} 值是变化的,在温度较低的冬春季 Q_{10} 值较高,而在夏季 Q_{10} 值较低^[42]。

水分对土壤呼吸的影响具有复杂性与不确定性^[43],土壤含水率主要受降雨和农田灌溉的影响。本研究发现,不同处理土壤呼吸与土壤含水率之间无显著相关性,这可能是由于一方面干旱区降雨量小,风沙土保水性能差;另一方面覆膜滴灌的灌溉方式导致土壤含水率变化范围较小,不足以影响微生物活性以及群落结构^[44],故未能体现出土壤含水量对土壤呼吸

速率的作用,而土壤温度则是影响土壤呼吸的主要环境因子。

4 结论

(1)风沙土土壤呼吸与异养呼吸日动态均呈单峰曲线,峰值出现在13:00左右;施用 $126.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭处理日平均呼吸速率为 $2.74\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于其他处理($P<0.05$);生物炭显著改变了土壤异养呼吸,对自养呼吸无显著影响。

(2)土壤呼吸速率随生物炭施用量的增加显著增加,而随玉米生育时期的推进逐渐降低。

(3)不同生物炭处理土壤呼吸速率与土层5、10、15 cm温度显著相关,土壤呼吸温度敏感系数随生物炭施用量的增加而提升,而土壤呼吸与土壤含水率无显著相关性。

参考文献:

- [1] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2420-2430. ZHANG Qian-bing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12): 2420-2430.
- [2] Fang J, Zhao K, Liu S. Factors affecting soil respiration in reference with temperature's role in the global scale[J]. *Chinese Geographical Science*, 1998, 8: 246-255.
- [3] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4273-4280. CAI Yan, DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4273-4280.
- [4] 李会杰, 饶良懿, 宋丹丹, 等. 华北土石山区不同龄组侧柏人工林土壤呼吸及其与环境因子的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2014(5): 84-90. LI Hui-jie, RAO Liang-yi, SONG Dan-dan, et al. Soil respiration rates of plantation *Platycladus orientalis* forest in different age-groups and their relationship with environmental factors in rocky mountain area of north China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014(5): 84-90.
- [5] 熊平生. 陆地生态系统土壤呼吸的影响因素研究综述[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 1-7. XIONG Ping-sheng. Research review of the impact factors on soil respiration in terrestrial ecosystem[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4): 1-7.
- [6] Zhao H L, Zhou R L, Zhang T H, et al. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy cropland of Inner Mongolia, north China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(2): 175-185.
- [7] 肖洪浪, 李福兴, 龚家栋, 等. 中国沙漠和沙地的资源优势与农业发展[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 1-6. XIAO Hong-liang, LI Fu-xing, GONG Jia-dong, et al. Resources superiority of deserts and sandy lands and agricultural development in China[J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(3): 1-6.
- [8] 董治宝, 陈渭南. 风沙土开垦中的风蚀研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 74-80. DONG Zhi-bao, CHEN Wei-nan. Study on wind erosion of aeolian sand soil under reclamation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(1): 74-80.
- [9] 陈温福, 张伟明, 孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 821-828. CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 821-828.
- [10] Johannes L, Stephen J. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation[M]. London: Earthscan, 2009: 448.
- [11] 史思伟. 长期施用生物炭对土壤碳库的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 43-45. SHI Si-wei. Effects of long-term application of biochar on soil carbon pool[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 43-45.
- [12] 匡崇婷. 生物炭对红壤水稻土有机碳分解和重金属形态的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 22-29. KUANG Chong-ting. Influence of biochar amendments on decomposition of organic carbon and morphology of heavy metal in red paddy soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011: 22-29.
- [13] 文方园, 陈建, 田路萍, 等. 过氧化氢氧化对生物炭表面性质的改变及其对双酚A吸附的影响[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 628-635. WEN Fang-yuan, CHEN Jian, TIAN Lu-ping, et al. Chemical oxidation of biochar and the impact on bisphenol A sorption[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(2): 628-635.
- [14] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 96-102.
- [15] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1169-1179.
- [16] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 1366-1379.
- [17] Jones D L, Murphy D V, Khalid M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1723-1731.
- [18] 王战磊, 李永夫, 姜培坤, 等. 施用竹叶生物炭对板栗林土壤CO₂通量和活性有机碳库的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3152-3160. WANG Zhan-lei, LI Yong-fu, JIANG Pei-kun, et al. Effect of bamboo leaf biochar addition on soil CO₂ efflux and labile organic carbon pool in a Chinese chestnut plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3152-3160.
- [19] 杨萌. 不同用量生物炭输入对毛竹林土壤呼吸组分的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 29-30. YANG Meng. Effects of different application rates of biochar on the soil respiration components in moso bamboo forests[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2017: 29-30.
- [20] Li C Y, Li Y F, Chang S X, et al. Biochar reduces soil heterotrophic

- respiration in a subtropical plantation through increasing soil organic carbon recalcitrancy and decreasing carbon-degrading microbial activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 122:173-185.
- [21] Ventura M, Zhang C, Baldi E, et al. Effect of biochar addition on soil respiration partitioning and root dynamics in an apple orchard[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65:186-195.
- [22] Sagrilo E, Jeffery S, Hoffland E, et al. Emission of CO₂ from biochar amended soils and implications for soil organic carbon[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2014, 7:1294-1304.
- [23] Al-Wabel M I, Al-Omran A, Ei-Naggar A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131:374-379.
- [24] Hinko-Najera N, Fest B, Livesley S J, et al. Reduced throughfall decreases autotrophic respiration, but not heterotrophic respiration in a dry temperate broadleaved evergreen forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200:66-77.
- [25] 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 Dong, GAO Ming, HUANG Rong, 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.
- [26] Jian J, Steele M K, Thomas Q, et al. Constraining estimates of global soil respiration by quantifying sources of variability[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24:4143-4159.
- [27] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48:71-90.
- [28] Bontti E E, Decant J P, Munson S M, et al. Litter decomposition in grasslands of central North America[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15:1356-1363.
- [29] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42:2345-2347.
- [30] 周鹏翀, 沈莹, 许姣姣, 等. 长期定位耕作方式下冬小麦田根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6):766-773. ZHOU Peng-chong, SHEN Ying, XU Jiao-jiao, et al. Contribution of root respiration to soil respiration in a winter wheat field under long-term localized tillage[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6):766-773.
- [31] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10:1756-1766.
- [32] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48:115-146.
- [33] 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 Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, 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.
- [34] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1110-1118. XU Yun-xiang, HE Li-li, LIU Yu-xue, et al. Effects of biochar on enzyme activity and soil fertility in paddy soil after 6 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1110-1118.
- [35] Zhou G, Zhou X, Zhang T, et al. Biochar increased soil respiration in temperate forests but had no effects in subtropical forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 405:339-349.
- [36] Fuentes M, Hidalgo C, Etchevers J, et al. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1/2):183-197.
- [37] 闫翠侠, 杨国亮, 李典鹏, 等. 生物炭对干旱区绿洲农田土壤呼吸的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(9):575-584. YAN Cui-xia, YANG Guo-liang, LI Dian-peng, et al. Effect of biochar addition on soil respiration of oasis farmland in arid areas[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(9):575-584.
- [38] Liu X, Wan S, Su B, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240:213-223.
- [39] 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 Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, et al. Effects of biochar on surface albedo and soil respiration in suburban agricultural soil[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4):1622-1632.
- [40] 杨旭, 兰宇, 孟军, 等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤CO₂排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3):805-809. YANG Xu, LAN Yu, MENG Jun, et al. Effects of different straw returning methods on CO₂ emission and soil carbon pool management index of dryland brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3):805-809.
- [41] 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 & Biochemistry*, 2009, 41:1531-1540.
- [42] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9:911-918.
- [43] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. 环境科学, 2011, 32(8):3184-3192. CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, ZHANG Yong, et al. Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8):3184-3192.
- [44] 李典鹏, 孙涛, 姚美思, 等. 干旱区盐湖沿岸不同植物群落土壤CO₂排放特征[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5):1879-1889. LI Dian-peng, SUN Tao, YAO Mei-si, et al. Characteristic of soil CO₂ emission under different plant communities in the shores of saline lake in arid region[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(5):1879-1889.