

杨 苏, 李传哲, 王 静, 等. 有机物料投入对作物产量及潮土固碳的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2020, 36( 3 ): 569-576.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.006

## 有机物料投入对作物产量及潮土固碳的影响

杨 苏<sup>1,2</sup>, 李传哲<sup>1</sup>, 王 静<sup>2</sup>, 汪吉东<sup>1</sup>, 张永春<sup>1</sup>, 李辉信<sup>2</sup>, 艾玉春<sup>1</sup>

(1. 农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站/江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 通过连续 2 年施入不同用量有机肥、秸秆菌渣和树枝菌渣, 探究有机物料投入下环境因子及土壤理化性质对作物产量及土壤碳矿化、积累的影响, 为作物稳产高产及土壤培肥的最佳碳投入方案提供理论依据。采用 Li-8100 田间原位法监测不同生育期土壤呼吸速率, 设置 7 个施肥处理: 6 000 kg/hm<sup>2</sup> 有机肥 (M1)、12 000 kg/hm<sup>2</sup> 有机肥 (M2)、6 000 kg/hm<sup>2</sup> 树枝菌渣 (B1)、12 000 kg/hm<sup>2</sup> 树枝菌渣 (B2)、6 000 kg/hm<sup>2</sup> 秸秆菌渣 (S1)、12 000 kg/hm<sup>2</sup> 秸秆菌渣 (S2) 和不施有机物的对照 (CK)。结果显示, 3 种有机物料投入均提高了土壤总有机碳及活性碳氮含量, 增加了玉米和小麦的产量, 玉米产量增幅 17.5% ~ 45.9%, 小麦产量增幅 30.8% ~ 68.6%, 其中 B2 处理增产效果最佳。外源碳投入显著增加土壤总有机碳含量, 与此同时也引发土壤碳的矿化, 增强土壤呼吸, 表现为: 总有机碳含量树枝菌渣处理 > 秸秆菌渣处理 ≥ 有机肥处理, 呼吸总量秸秆菌渣处理 > 有机肥处理 > 树枝菌渣处理。相关性分析结果表明, 土壤碳固存量与碳投入量和作物产量呈极显著正相关关系, 与易氧化有机碳、全氮和碱解氮含量呈显著正相关关系, 而与 pH 的相关性不显著。总之, 有机物料投入可提高土壤养分含量, 促进作物增产, 其中 12 000 kg/hm<sup>2</sup> 树枝菌渣施肥处理的培肥和增产效果最佳。

**关键词:** 有机物料; 固碳潜力; 有机碳; 土壤呼吸

**中图分类号:** S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)03-0569-08

## Effects of organic material input on crop yield and carbon sequestration in tidal soil

YANG Su<sup>1,2</sup>, LI Chuan-zhe<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>, WANG Ji-dong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-chun<sup>1</sup>, LI Hui-xin<sup>2</sup>, AI Yu-chun<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Observation and Experiment Station of Arable Land Conservation Science, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** To provide theoretical basis for the optimal carbon input scheme, the effects of environmental factors and soil physical and chemical properties on crop yield and soil carbon mineralization and accumulation were investigated by applying different amounts of organic fertilizer, straw mushroom residue and lignin mushroom residue for two consecutive

收稿日期: 2019-10-17

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800301); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(17)-1001]; 江苏省重点研发计划项目 (BE2019378)

**作者简介:** 杨 苏 (1994-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向为土壤肥力提升与废弃物资源化利用。(E-mail) 2017103075@njau.edu.cn

**通讯作者:** 张永春, (E-mail) yczhang66@sina.com

years. The soil respiration rate in different growth stages was monitored by Li-8100 field in situ method. Seven treatments were set up: 6 000 kg/hm<sup>2</sup> organic fertilizer (M1), 12 000 kg/hm<sup>2</sup> organic fertilizer (M2), 6 000 kg/hm<sup>2</sup> lignin mushroom residue (B1), 12 000 kg/hm<sup>2</sup> lignin mushroom residue (B2), 6 000 kg/hm<sup>2</sup> straw mushroom residue (S1), 12 000 kg/hm<sup>2</sup> straw mushroom residue (S2) and no organic matter (CK). The results

showed that the application of three organic materials increased the total organic carbon and activated carbon and nitrogen contents, and increased the yield of corn and wheat. The yield of corn and wheat increased by 17.5%–45.9% and 30.8%–68.6% respectively, and B2 treatment had the best effect on increasing yield. Exogenous carbon input significantly increased the total organic carbon content of the soil, and it also led to soil carbon mineralization and enhanced soil respiration. The total organic carbon content followed the order of  $B>S\geq M$ , total respiration followed the order of  $S>M>B$ . The results of correlation analysis showed that soil carbon sequestration was significantly positively correlated with carbon input and crop yield, and positively correlated with the contents of easily oxidized organic carbon, total nitrogen and alkalytic nitrogen, but there was no significant correlation with pH. In conclusion, the input of organic materials can increase soil nutrient content and improve crop yield. The treatment of 12 000 kg/hm<sup>2</sup> lignin mushroom residue has the best effect.

**Key words:** organic material; carbon sequestration potential; organic carbon; soil respiration

中国对耕地质量十分重视。有机质含量低是限制土壤地力提升的重要障碍因素,提升有机质含量,培肥地力,改善土壤养分结构,逐步提高耕地质量,是今后很长时期农业综合生产力建设的基础性重大工程<sup>[1]</sup>。单一施用化肥会造成土壤板结、漏水漏肥,作物抗逆性降低,作物减产。对于本身有机质含量低、物理结构差的潮土,在施用化肥的基础上,通过外源碳投入来提升土壤肥力成为大家关注的重点。

有机物料施用是通过外源碳投入增加土壤有机质的最直接有效的方式。土壤有机碳是土壤肥力的基础,碳矿化与积累的动态变化决定了土壤碳的平衡,对于评价土壤质量及改良土壤具有指导作用。在当前“减肥减污”的大背景下,有机肥和有机物料等化肥替代产品成为农业关注的重点,探究其施用对土壤碳的矿化及积累的影响,对于改土增产和指导农民科学施肥具有现实的意义。

土壤碳矿化主要来源于土壤呼吸,是仅次于光合作用的第2大碳通量,占生态系统总呼吸量的60%~90%<sup>[2-3]</sup>。目前关于土壤呼吸的研究多集中在森林、草原等生态系统<sup>[4-5]</sup>,就地域而言则多集中在中纬度的温带草地和森林,而对占全球陆地表面12%的农田生态系统的研究较少。目前,农田生态系统由于人为扰动频繁、固碳潜力大等特点,成为研究的焦点。长期以来,在众多影响土壤呼吸的自然因素中,温度和水分被认为是影响土壤呼吸的主要环境因素,也一直是研究者关注的热点<sup>[6-7]</sup>。土壤温度通过改变微生物的活性来调节其代谢和氧化分解等活动<sup>[8]</sup>,间接影响土壤呼吸。而土壤湿度是通过改变植物根和微生物的生理过程、影响底物和氧气的扩散来调节土壤呼吸。多数研究结果表明外源碳投入会增加土壤有机碳和微生物量碳,有机碳可增加土壤呼吸的底

物,提高土壤呼吸速率。臧逸飞等<sup>[9]</sup>的研究结果表明,施用有机肥26年后土壤呼吸的增长幅度为15.91%~75.73%。吴会军等<sup>[10]</sup>认为增施有机肥会改善土壤结构,增加小麦根系呼吸速率,显著影响土壤呼吸速率。近年来,有研究者认为土壤理化性状也是影响土壤呼吸的重要因素,退化生态系统的治理恢复措施与恢复年限可有效提高土壤固碳能力,促进土壤呼吸<sup>[11-13]</sup>。

本试验通过添加不同种类和用量有机物料,探究黄河故道潮土土壤呼吸的变化和碳投入量对土壤呼吸的影响及土壤呼吸与土壤环境因子的关系,为明确外源碳投入量对旱作农田生态系统碳排放量的影响提供数据支撑,为农田土壤合理添加有机物料和保证作物高产稳产,以及制定科学有效的土壤碳调控管理措施提供最佳方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于江苏省盐城市滨海县界牌镇三坝村黄河湾绿色科技有限公司试验基地(北纬33°43′,东经119°37′),试验区地处北温带,气候温和,降雨充沛,常年平均气温14.1℃,最高温39℃,最低温-10℃。降雨量536~1372mm,年平均降雨量为942.6mm。其中江苏省盐城市滨海县2017年降雨量为1131mm,2018年降雨量为1279mm,2019年截至10月降雨量为818mm,试验区地势平坦,土壤类型为脱盐潮土。样地土壤有机质含量4.42g/kg,全氮含量0.18g/kg,有效磷含量2.63mg/kg,速效钾含量63.30mg/kg,pH值8.58。

### 1.2 试验设计

试验于2017年7月在江苏省盐城市滨海县界牌镇黄河湾绿色科技有限公司试验基地内进行,属

于小麦-玉米轮作制度。共设置 7 个处理,分别为有机肥 6 000 kg/hm<sup>2</sup> (M1)、有机肥 12 000 kg/hm<sup>2</sup> (M2)、树枝菌渣 6 000 kg/hm<sup>2</sup> (B1)、树枝菌渣 12 000 kg/hm<sup>2</sup> (B2)、秸秆菌渣 6 000 kg/hm<sup>2</sup> (S1)、秸秆菌渣 12 000 kg/hm<sup>2</sup> (S2) 和对照(CK),每个处理 3 个重复,采用完全随机排列,每个小区面积为 96 m<sup>2</sup>(长 12 m,宽 8 m)。添加的有机肥(M)由阿古利斯有限公司提供,主要原材料为中药渣;秸秆菌渣(S)系草菇生产后的秸秆类菌渣;树枝菌渣(B)系香菇生产后树枝类菌渣。有机物料养分含量见表 1 (小麦秸秆和玉米秸秆养分含量为当季测定值,有机肥、秸秆菌渣和树枝菌渣养分含量为 2017~2018 年 2 年平均值)。于 2017 年玉米季开始施用。玉米品种为蠡玉 31 号,于 2018 年 6 月 30 日播种,10 月 13 日收获。小麦品种为华麦七号,于 2018 年 10 月 25 日播种,2019 年 6 月 12 日收获。玉米季采用小麦根茬全量还田,小麦季采用玉米根茬全量还田,还田量依据作物产量而定,玉米草谷比为 1.73,小麦草谷比为 1.28。还田方式均为留茬 15 cm 直接翻耕到土壤中,翻耕深度为 20 cm,采用人工播种的方式。玉米株间距为 25 cm,行间距为 70 cm,小麦行间距为 15 cm。玉米季和小麦季匀施复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 比例为 18:12:10) 600 kg/hm<sup>2</sup>,复合肥作基肥一次性施入。玉米季在拔节期和大喇叭口期追施尿素,小麦季在返青期和拔节期追施尿素,追肥均占总氮用量的 30%。于玉米和小麦的不同生长期(表 2)监测土壤呼吸速率和 0~10 cm 土层土壤温度、湿度。在收获期每个小区 S 形取 0~10 cm 土层土壤样品 5 个,组成混合样品,带回试验室进行风干、研磨、过筛,测定土壤理化指标。

### 1.3 试验方法

土壤呼吸监测采用开路式土壤碳通量自动监测系统,仪器型号为 Li-8100 (Li-COR, Lincoln, NE, USA),开始监测前在每个小区相同的位置(作物株间)固定一个长期监测呼吸的 PVC 底座(高 20 cm,直径 20 cm)。为减少放置 PVC 底座对土壤的扰动,初次测定在 PVC 底座插入土壤 24 h 后进行。为防止有机物料添加不均对试验结果造成的影响,先计算出 PVC 管内土壤的体积,再按比例添加有机物料。在每次测定前 1 d,检查 PVC 底座是否完好,并用剪刀贴地剪除底座内的可见植物,减少植物呼吸和土壤扰动对土壤呼吸的影响。同步监测 PVC

底座附近 0~10 cm 土壤温度和湿度,土壤温度采用 Li-8100 自带的温度探头测定,土壤湿度采用野外采样-室内烘干法测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法测定,土壤易氧化有机碳含量采用 333 mol 高锰酸钾氧化法测定,土壤全氮含量采用凯氏蒸馏法测定,土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定,pH 采用液土比为 2.5:1.0(质量比)的电位法测定。

表 1 有机物料的基本性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of organic materials

物料	全氮 (TN) (g/kg)	全磷 (TP) (g/kg)	全钾 (TK) (g/kg)	有机碳 (SOC) (g/kg)	碳氮比 (C/N)
有机肥	13.50	10.35	7.30	224	16.6
秸秆菌渣	6.58	3.20	7.95	258	39.2
树枝菌渣	16.60	5.81	5.61	328	19.8
小麦秸秆	3.95	0.96	16.51	270	68.4
玉米秸秆	9.20	1.50	14.79	329	35.8

表 2 玉米和小麦取样日期

Table 2 Growth period of corn and wheat and sampling time

夏玉米生育期	取样日期	冬小麦生育期	取样日期
苗期	2018-07-07	苗期	2019-11-09
		三叶期	2019-11-16
拔节期	2018-08-04	分蘖期	2019-12-27
		返青期	2019-02-16
抽雄-授粉期	2018-08-28	起身期	2019-03-07
		拔节期	2019-03-11
乳熟期	2018-09-22	抽穗期	2019-04-22
		开花期	2019-05-07
成熟期	2018-10-12	灌浆期	2019-05-21
		成熟期	2019-06-10

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 25.0、Origin 2018、R Studio 进行数据处理和分析。采用双变量相关分析中的 Pearson 分析,分析土壤呼吸速率与土壤温度、土壤湿度的相关性。以不同生长期土壤呼吸速率(以 8:00-10:00 测定值为全天呼吸平均值<sup>[10]</sup>),乘以生长期的天数,累计相加计算出玉米和小麦全生育期土壤呼吸总量。

## 2 结果与分析

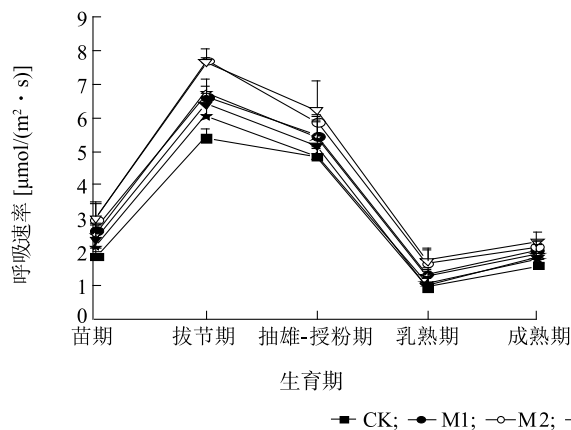
### 2.1 有机物料对玉米和小麦产量的影响

从图1中可以看出,外源有机物料添加会显著增加玉米和小麦的产量,且随有机物料用量的增加,作物产量呈增加的趋势。添加量为6 000 kg/hm<sup>2</sup>时玉米和小麦的增幅分别为17.5%~30.7%、30.8%~46.7%,添加量为12 000 kg/hm<sup>2</sup>时增幅分别为24.8%~45.9%、55.8%~68.6%。不同有机物料对玉米和小麦的增产效果不同,玉米表现为B>M>S,小麦为B>S>M,其中B2处理对玉米和小麦的产量影响最显著,产量最高值分别达4 536 kg/hm<sup>2</sup>和7 522 kg/hm<sup>2</sup>。

### 2.2 有机物料施用下土壤呼吸的动态变化

玉米季土壤呼吸速率呈先上升后下降的趋势,在拔节期达到最大值[7.65 μmol/(m<sup>2</sup>·s)],抽雄-授粉期保持稳定,在乳熟期由于低温胁迫,呼吸速率降至生育期最低,其值为0.98 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。从图2中可以看出,外源有机物料施用会显著增加土壤呼吸速率,且随有机物料用量的增加呈现增加的趋势,但不同有机物料对呼吸速率的影响不同,表现为S>M>B。

小麦季土壤呼吸速率与玉米季不同,呈现先下



各处理见图1注。

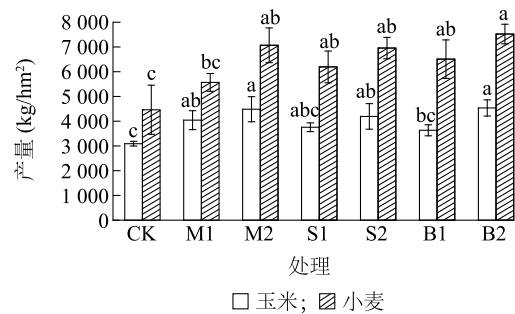
图2 不同有机物料处理下玉米和小麦生长期的土壤呼吸

Fig.2 Soil respiration during maize and wheat growing period under different treatments of organic materials

### 2.3 呼吸速率与土壤温度、湿度的相关性

土壤温度和湿度是影响土壤呼吸季节性变化的重要因素,这是由于微生物的生命活动必不可少受到温度、湿度等环境因素的影响。将土壤呼吸速率

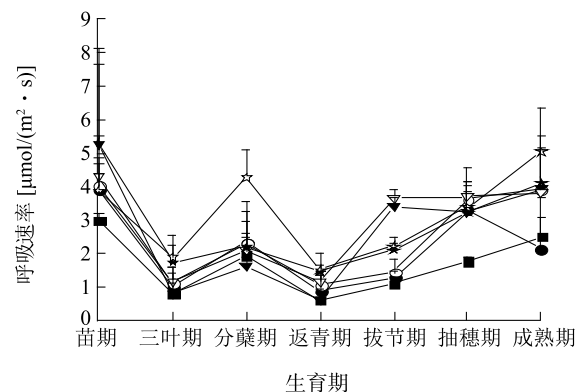
降后上升的趋势,在返青期降至最低值,其值为0.64~1.51 μmol/(m<sup>2</sup>·s),在拔节期快速上升,在成熟期达到另一个峰值,但仍低于苗期呼吸速率。从图2可以看出,小麦季呼吸速率在返青期和拔节期差异较大,在抽穗期和成熟期差异减小,总体表现为S>M>B。树枝菌渣由于自身碳氮比高,在土壤中不易被微生物利用,分解较慢,导致土壤呼吸低,而秸秆菌渣和树枝菌渣碳氮比相近,因此二者呼吸速率无显著差异,但均显著高于对照。



M:有机肥;S:秸秆菌渣;B:树枝菌渣。M1:有机肥6 000 kg/hm<sup>2</sup>+NPK肥;M2:有机肥12 000 kg/hm<sup>2</sup>+NPK肥;B1:树枝菌渣6 000 kg/hm<sup>2</sup>+NPK肥;B2:树枝菌渣12 000 kg/hm<sup>2</sup>+NPK肥;S1:秸秆菌渣6 000 kg/hm<sup>2</sup>+NPK肥;S2:秸秆菌渣12 000 kg/hm<sup>2</sup>+NPK肥;CK:NPK肥(对照)。不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图1 有机物料施用下玉米和小麦的产量

Fig.1 Yield of corn and wheat under the treatments of organic materials

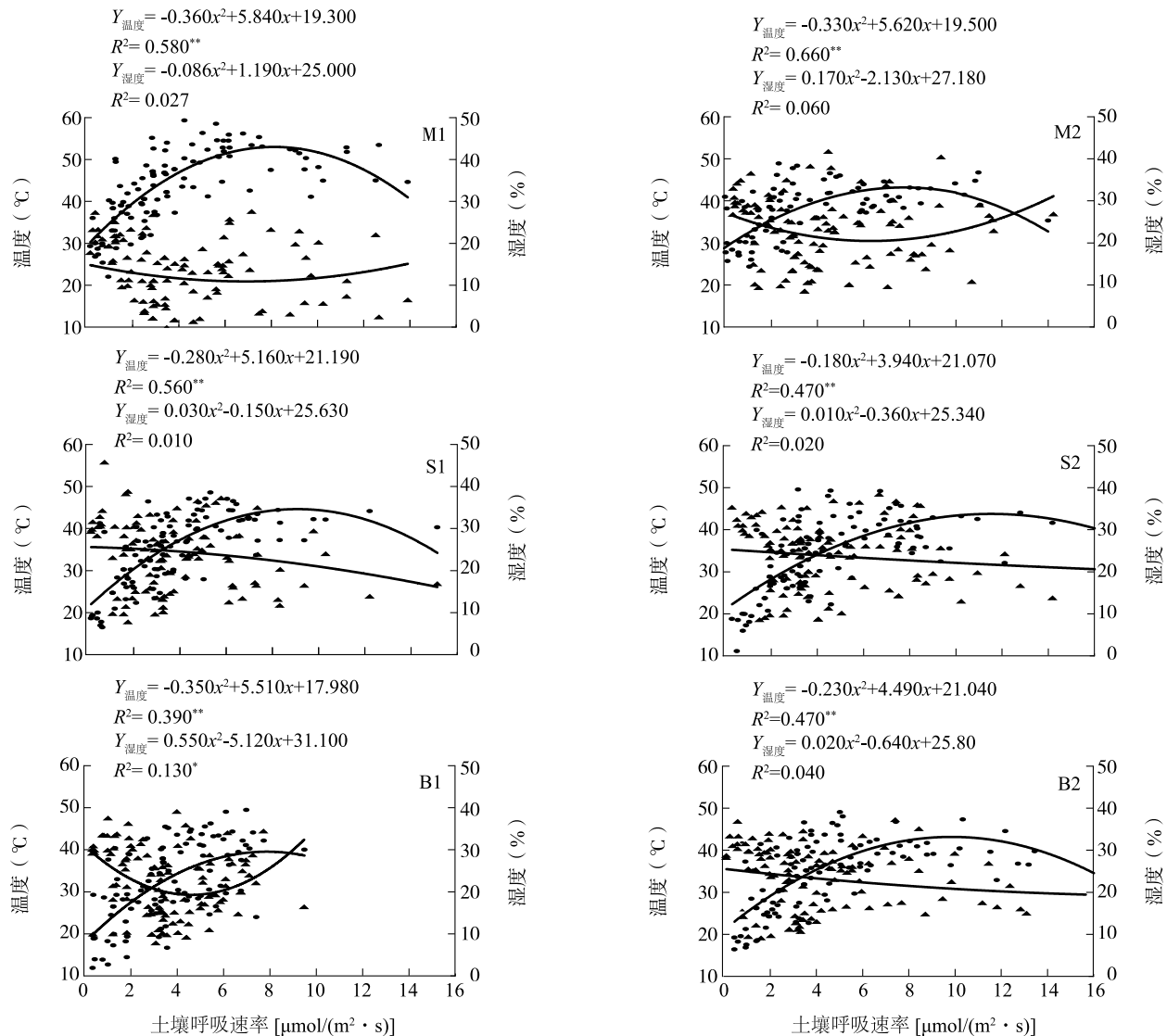


与温度和湿度拟合为二次曲线后发现,呼吸速率与温度的拟合度较高, $R^2$ 在0.39至0.66之间,达到极显著水平( $P<0.01$ ),而与湿度的拟合效果较差(图3)。随有机物料施用量的增加,呼吸速率与温度和



湿度的相关性略有增加,施用有机肥处理土壤呼吸速率与温度的相关性优于树枝菌渣和秸秆菌渣处

理,而呼吸速率与湿度的相关性则表现为树枝菌渣处理优于有机肥和秸秆菌渣处理。



各处理见图 1 注。

图 3 呼吸速率与土壤温度、土壤湿度的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of respiration rate with soil temperature and soil humidity

## 2.4 土壤呼吸与土壤理化性质及作物产量的相关性

Pearson 双因素相关分析结果(表 3)表明,土壤呼吸总量与土壤有机质、碳投入量、产量及 pH 呈显著正相关关系,与有机质相关系数最大(0.52)。碳投入量极显著增加了有机质、易氧化有机碳和碱解氮含量。易氧化有机碳和碱解氮属于土壤中的活性组分,易被作物吸收利用,因此与作物产量呈正相关关系。而土壤 pH 增高显著增加碳的矿化,减少了碳的积累,因此与作物产量呈负相关关系。

## 2.5 玉米季和小麦季碳的投入与矿化

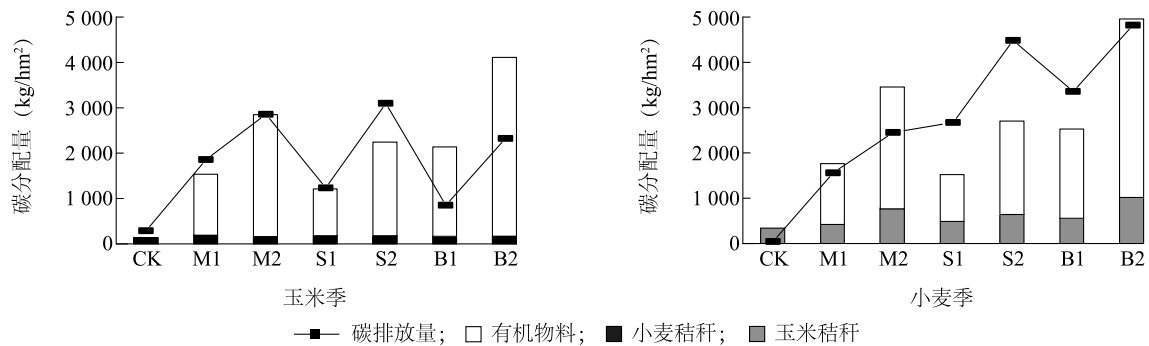
土壤中碳的投入分为 2 部分:秸秆还田中的碳和外源有机物料投入的碳。不同有机物料的碳含量不同,导致土壤碳投入量不同,总体表现为 $B>S>M$ 。B2 处理碳投入量最大,其值为 $4\ 111\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,比其他处理高 $1\ 261\sim 2\ 897\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。由图 4 可知,玉米季土壤呼吸总量为 $3\ 718\sim 4\ 650\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,小麦季为 $3\ 901\sim 5\ 532\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,且土壤呼吸整体随碳投入量的增加而增加,表现为 $S>M>B$ 。

表3 土壤呼吸速率与土壤理化性质及作物产量的相关性

Table 3 Correlation of soil respiration rate with soil physical and chemical properties and yield

	SR	SOM	ROC	TN	AN	pH	Y	CI
SR	1.00							
SOM	0.52 *	1.00						
ROC	0.23	0.46 *	1.00					
TN	0.40	0.45 *	-0.20	1.00				
AN	0.28	0.55 *	0.41	0.21	1.00			
pH	0.51 *	0.10	0.07	0.01	0.17	1.00		
Y	0.48 *	0.66 **	0.41	0.18	0.52 *	-0.11	1.00	
CI	0.49 *	0.72 **	0.88 **	0.10	0.50 *	0.08	0.53 *	1.00

SR、SOM、ROC、TN、AN、Y、CI 分别表示土壤呼吸速率、土壤有机质含量、氧化有机碳含量、总氮含量、碱解氮含量、作物产量、碳投入量。



各处理见图1注。

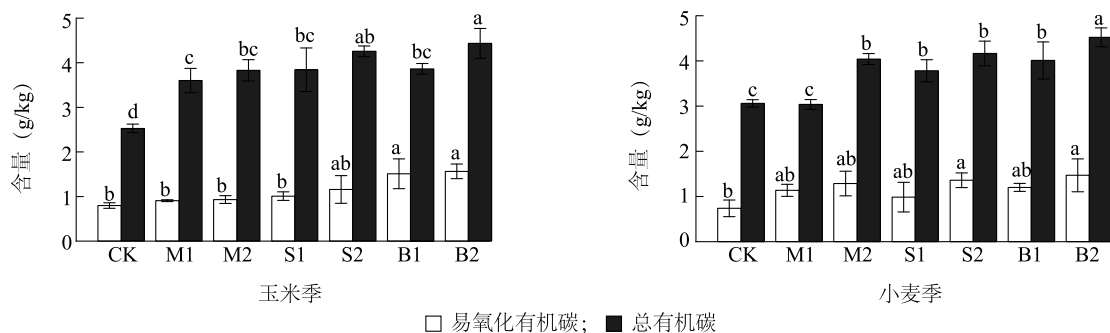
图4 玉米季和小麦季碳的投入量与矿化量

Fig.4 Carbon input and mineralization in corn and wheat seasons

## 2.6 有机物料施用下土壤易氧化有机碳与总有机碳含量变化

外源碳投入会增加土壤有机碳含量(图5)。连续施用2年有机物料后,土壤有机碳含量为3.03~4.52 g/kg,与CK相比增幅为25.9%~73.1%。不论玉米季还是小麦季B2处理总有机碳含量最高,显

著高于其他处理。易氧化有机碳含量随有机物料施用量的增加呈增加的趋势。玉米季易氧化有机碳占总有机碳的24.3%~39.1%,小麦季为24.5%~37.45%。由于夏玉米生育期短,有机物料腐解少,残留在土壤中的活性有机碳含量高,而冬小麦生育期长,易氧化有机碳占总有机碳比例低。



各处理见图1注。不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图5 不同有机物料施用下土壤易氧化有机碳与总有机碳含量

Fig.5 Contents of soil easily oxidizable organic carbon and total organic carbon under different treatments of organic materials

## 2.7 碳投入与碳投入引起的土壤有机碳增加量的拟合曲线

碳投入会引起土壤有机碳含量的增加。由图 6 拟合曲线可知,碳投入量与土壤有机碳增加量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),且二者拟合为一次函数效果最好, $R^2$ 为 0.371。

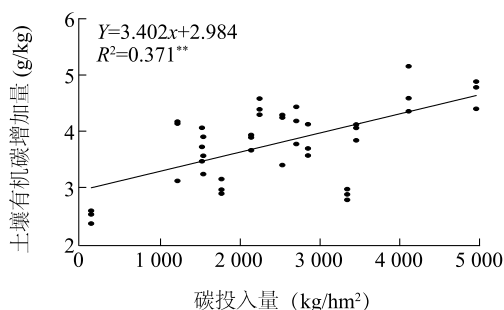


图 6 碳投入与土壤有机碳增加量的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of carbon input and soil organic carbon increment

## 3 讨论

不论玉米季还是小麦季,土壤呼吸速率均呈现明显的季节性变化,即 8 月份达到最大值,12 月出现最低值。这是由于土壤呼吸受生物和非生物因素的共同控制,而这些生物因素和非生物因素会随着季节的变化而发生变化<sup>[14]</sup>。目前被广泛认可的环境因子温度和湿度可以解释土壤呼吸变化的 55%~86%<sup>[15]</sup>。但通过拟合曲线发现,土壤湿度与土壤呼吸拟合为三次函数效果较好。这一方面可能是由于湿度采用室外取样-室内烘干法测定,结果有一定的误差;另一方面是试验区降雨量较为集中,潮土结构差,易漏水漏肥。除外界环境因素外,有机物料的种类对土壤呼吸也有影响。总体来说,土壤呼吸总量大小顺序为秸秆菌渣(S)处理>有机肥(M)处理≥树枝菌渣(B)处理,这主要与添加物料的碳氮比(C/N)和物质组成有关。李昌明<sup>[16]</sup>等认为 C/N 和物质组成是影响腐解的主要因素,可溶性成分和半纤维素含量越高、C/N 越低的物质在土壤中的分解越快,而木质素含量高、C/N 高的物质在土壤中分解较慢。秸秆菌渣的 C/N 和木质素含量比有机肥和树枝菌渣的低,可为微生物提供较高的碳、氮源和营养物质,促进微生物的生长和繁殖,更能显著地增加土壤呼吸。张东秋等<sup>[17]</sup>、王新源等<sup>[18]</sup>认为 pH 也

可以通过调控土壤中化学反应和微生物体内酶的多样性来影响土壤呼吸速率。刘岳燕通过实验证明,土壤 pH 过高(>8.5)或过低(<5.5)都会抑制土壤微生物的活动,减缓有机碳的周转,使得土壤有机碳的分解速率下降<sup>[19]</sup>。本研究的供试土壤为潮土,偏碱性,pH 为 8.58,通过 2 年的有机物料施用后,土壤 pH 向中性过度,有利于微生物生存和作物产量增加,导致土壤微生物和根系的呼吸增强。臧逸飞等<sup>[9]</sup>、范利超等<sup>[20]</sup>认为外源碳投入会增加土壤呼吸,但总体表现为土壤的“碳汇”,而本研究中碳投入量与土壤有机碳增加量的拟合曲线显示,二者呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),也证明了此观点。土壤呼吸的影响因素较多,包括环境因子、土壤性质、植被类型和区域尺度,但通常这些因子都是相互作用的,共同影响土壤呼吸<sup>[21-23]</sup>。目前关于土壤呼吸的研究普遍存在时间尺度连续性差、测定间隔长、空间区域范围小等问题。因此今后研究的重点应同时兼顾土壤呼吸测定的同时性和连续性,从而建立多因素影响下的土壤呼吸模型,为以后估计土壤呼吸量奠定基础。

本试验投入土壤中的碳来源有 2 个部分:一部分来源于秸秆,一部分来源于有机物料。但有机物料投入的碳占主导,秸秆中的碳占少部分,不能满足微生物及作物生长的需求,因此外源有机物料投入对土壤有机碳含量提升及作物产量增加发挥至关重要的作用。相关性分析结果显示,土壤呼吸速率与有机质含量、碳投入量及作物产量呈显著正相关关系,外源碳投入会增加土壤养分含量,协调水肥气热等因子的相互关系,进而增加作物产量。这主要是因为有机物的施入会显著提高表土有机碳含量,增加土壤活性养分,例如易氧化有机碳和碱解氮,为微生物活动提供了大量的营养和能源,促进了微生物呼吸<sup>[24]</sup>,同时也增加了微生物对碳、氮的固定,而碳、氮是作物生长的主要养分,二者呈极显著正相关关系,具有良好的耦合效应,可以共同促进作物产量的增加。在所有处理中,树枝菌渣添加量为 12 000 kg/hm<sup>2</sup>的增产效果最明显,这主要是由于树枝菌渣碳投入量大。多投入的碳一部分来源于树枝菌渣较高的碳含量,施用量相同时进入土壤的碳多;另一部分是由于作物产量高,相应的秸秆还田量大,导致土壤碳投入量大。树枝菌渣碳氮比高,木质素含量高,在土壤中不易分解,因此矿化消耗的碳少,固存的量

多,对改良黄河故道潮土,增强土壤固碳潜力,增加作物产量具有明显的作用。

### 参考文献:

- [1] 四川省农业厅科教处. 中低产田土改造及土壤有机质提升技术[J]. 四川农业与农机, 2012(5):45.
- [2] 裴 蓓,高国荣. 凋落物分解对森林土壤碳库影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2018,34(26):58-64.
- [3] 韩广轩,周广胜,许振柱,等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应[J]. 植物生态学报, 2007,31(3):363-371.
- [4] 唐雪娟,徐丽君,逢焕成,等. 施氮及豆-禾混播对草地群落及土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2018,37(3):831-839.
- [5] 刘绍辉,方精云,清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 1998,22(2):24-31.
- [6] WANG D, HE N, WANG Q, et al. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the Changbai Mountains, Northeast China[J]. Pedosphere, 2016,26(3):399-407.
- [7] 刘 爽,严昌荣,何文清,等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010,30(11):2919-2924.
- [8] PENG S, PIAO S, WANG T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009,41(5):1008-1014.
- [9] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015,35(5):1445-1451.
- [10] 吴会军,蔡典雄,武雪萍,等. 不同施肥条件下小麦田土壤呼吸特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6):70-74.
- [11] 马 涛,于 洋,张 峰,等. 陇东黄土高原不同林龄刺槐林土壤碳通量及其组分特征[J]. 水土保持学报, 2017,31(5):196-202.
- [12] 崔 海,张亚红. 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子[J]. 环境科学, 2016,37(4):1507-1515.
- [13] 肖孔操,刘杏梅,吴建军,等. 植物残体与土壤 pH 对农田土壤呼吸的影响研究[C]//中国土壤学会. 中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 成都:中国土壤学会, 2012.
- [14] 王国兵,唐燕飞,阮宏华,等. 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异及其主要影响因子[J]. 生态学报, 2009,29(2):966-975.
- [15] 董云社,齐玉春,刘纪远,等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征[J]. 科学通报, 2005,50(5):473-480.
- [16] 李昌明,王晓玥,孙 波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017,54(5):1206-1217.
- [17] 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.
- [18] 王新源,李玉霖,赵学勇,等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012,32(15):4890-4901.
- [19] 刘岳燕. 水分条件与水稻土壤微生物生物量、活性及多样性的关系研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [20] 范利超,杨明臻,韩文炎. 温湿度和外源有机质对茶园土壤基础呼吸作用的影响[J]. 土壤通报, 2014,45(6):1383-1389.
- [21] 赵金安,来雪慧. 集约化农业区不同土地利用方式的土壤呼吸温度敏感性差异研究[J]. 江苏农业科学, 2018,46(9):281-285.
- [22] 张金波,宋长春,杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2005,25(11):1537-1542.
- [23] 于玲玲,郭 强,徐 阳,等. 保护性耕作对华北地区玉米田土壤呼吸的影响[J]. 江苏农业科学, 2018,46(2):253-255.
- [24] 邹原东,范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013,29(3):12-16.

(责任编辑:张震林)