

深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响

刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 王迎春

引用本文:

刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1150–1160.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1387>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 杨俊诚, 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 张建峰, 姜慧敏

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2785–2792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0165>

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942–1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>

小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈晨, 陈曦, 常江, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2155–2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.017>

我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展

张国, 王效科

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 872–881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0102>

秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响

郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 王海侯, 孙小祥, 沈明星, 陆长婴

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 727–733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1364>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1150–1160.

LIU Ping-qi, ZHANG Meng-xuan, WANG Li-gang, et al. Effects of subsoiling and straw return on soil respiration and soil organic carbon balance in black soil of northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1150–1160.



开放科学 OSID

深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响

刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 王迎春*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:针对我国东北黑土深松结合秸秆还田措施对土壤呼吸变化特征影响不清晰、土壤有机碳平衡不确定的问题,以东北典型黑土区——绥化市青冈县为例,开展了田间原位监测试验,研究了不同深松深度(深松 25 cm、深松 35 cm)结合不同秸秆还田(秸秆还田、秸秆不还田)处理对土壤呼吸(包括根呼吸)和土壤有机碳平衡的影响。结果表明:不同田间管理条件下,土壤呼吸速率呈现“先升高,后降低”,在7月中旬至8月初呼吸速率达到峰值的变化特征;各个生育期土壤累积呼吸量对总呼吸的贡献有所差别,其中以春玉米拔节期和吐丝期土壤呼吸对总呼吸贡献最大,分别占 35.3%~41.2% 和 25.9%~31.9%。与农民习惯处理(不深松、秸秆不还田,FP)相比,深松结合秸秆还田处理提高了土壤呼吸速率并显著提高土壤呼吸累积量 53.2%~108.0% ($P<0.05$);FP 处理土壤有机碳表现为入不敷出,土壤有机碳平衡值为 $-647 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。单独深松处理(T1)土壤有机碳平衡表示为碳亏损,碳支出比 FP 高 102.3%,有机碳损失最严重。单独秸秆还田处理(T2)、深松 25 cm+秸秆还田处理(T3)和深松 35 cm+秸秆还田处理(T4)较 FP 分别增加了土壤有机碳收入 448.5%、477.7% 和 448.9%,土壤有机碳平衡均为正值,均能有效固存有机碳;与 FP 相比,深松和秸秆还田及两者结合的处理均能显著增加玉米产量 13.8%~22.4% ($P<0.05$),达到 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 高产水平。深松结合秸秆还田措施能有效增加土壤活性,提高作物产量,是东北黑土地力提升和有机碳固存的推荐田间管理技术。

关键词:黑土;深松;秸秆还田;土壤呼吸;土壤有机碳平衡

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-1150-11 doi:10.11654/jaes.2019-1387

Effects of subsoiling and straw return on soil respiration and soil organic carbon balance in black soil of northeast China

LIU Ping-qi, ZHANG Meng-xuan, WANG Li-gang, WANG Ying-chun*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Measures of subsoiling combined with straw return to the field in black soil of Northeast China that have no clear influence on the characteristics of soil respiration and the uncertainty of organic soil carbon balance. Qinggang County, Suihua City, a typical black soil area in the northeast was studied. In-situ monitoring experiments in large areas of the field were conducted, researching the effects of different subsoiling depths (subsoiling 25 cm, subsoiling 35 cm) combined with different straw returning (stalk returned to the field, straw not returned to the field) on soil respiration (including root respiration) and soil organic carbon balance. Results demonstrated that soil respiration was characterized by "Rising first, then decreasing", and the respiration rate peaked from mid-July to early August. The contribution of soil cumulative respiration to total respiration varied during each growth period. Among them, spring maize soil respiration contributed

收稿日期:2019-12-17 录用日期:2020-04-08

作者简介:刘平奇(1994—),男,云南建水人,硕士研究生,从事土壤学研究。E-mail:18811588707@163.com

*通信作者:王迎春 E-mail:wangyingchun@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31770486);国家重点研发计划项目(2017YFD0201801,2017YFF0211700)

Project supported: The National Science Foundation of China (31770486); The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0201801,2017YFF0211700)

the most to total respiration during jointing and silking, accounting for 35.3%~41.2% and 25.9%~31.9%, respectively. Compared with farmers' customary measure (without subsoil and straw return; FP), subsoiling combined with straw return to the field improved soil respiration rate and significantly increased soil respiration accumulation by 53.2%~108.0% ($P<0.05$). Organic carbon in the soil was insufficient for the needs of farmers using customary measure (without subsoil and straw return; FP) when the soil organic carbon balance was $-647 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$. The soil organic carbon balance of the separate subsoiling measure (T1) was expressed as carbon expenditure, which is 102.3% higher than FP, and organic carbon losses were the largest. Separate straw returning measure (T2), subsoiling 25 cm+straw return measure (T3) and subsoiling 35 cm+straw return measure (T4) all effectively sequestered organic carbon, and the soil organic carbon balance was all positive, which increased by 448.5%, 477.7%, and 448.9% of the soil organic carbon income respectively compared with FP; subsoil and straw return to the field and two methods combined could increase corn yield by 13.8%~22.4% significantly ($P<0.05$), reaching a high yield level of $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Subsoiling combined with straw return can effectively increase soil activity and increase crop yield. It is a recommended field management technology for the improvement of black soil power and organic carbon storage in Northeast China.

Keywords: black soil; subsoiling; straw returning; soil respiration; soil organic carbon balance

陆地土壤有机碳(SOC)碳库储量是大气碳库2倍多^[1],其微小的变化都会显著影响大气 CO_2 变化并影响全球碳循环和碳平衡过程^[2-4]。土壤呼吸作为土壤向大气释放 CO_2 的重要途径,其强弱变化不仅受SOC平衡影响^[5],也是指示土壤整体活性变化的重要指标^[6]。东北黑土区作为世界四大黑土区之一^[7],是我国重要的商品粮基地,承担着粮食生产“稳压器”和生态屏障的作用^[8-9]。长期以来,当地农民依靠化肥投入,使用小型旋耕机进行田间作业,导致土壤耕层变浅、犁底层变厚、SOC含量下降,土壤活性变差,制约作物生长,影响作物产量^[10-12],同时,对于大量作物秸秆,农民一般采用就地堆积焚烧的方式处理,不仅造成资源浪费,而且严重污染和破坏大气环境^[13]。深松结合秸秆还田被认为是一种能打破犁底层、构建合理耕层及固存SOC的有效措施^[14-17]。张俊丽等^[18]和禄兴丽等^[19]研究认为深松提高了作物生育期土壤呼吸速率,伏星舟等^[20]研究发现深松降低了土壤呼吸速率。普遍研究认为,在东北黑土区秸秆粉碎翻耕还田能提高土壤呼吸速率^[21-23]。目前,针对单独深松、秸秆还田措施对土壤呼吸变化特征的研究已有很多,但针对两种措施结合条件下研究较少,土壤呼吸特征变化尚不明确。土壤有机碳平衡以土壤为界面,表示土壤有机碳收入和支出的抵消情况,正平衡表示土壤有机碳收入大于支出,反之则支出大于收入^[24]。邱建军等^[25]认为东北黑土区土壤有机碳损失约占全国1/4,近年来,提高东北黑土区土壤有机碳含量,维持土壤有机碳平衡是黑土地保护的重要目标,张博文等^[26]研究认为深松措施会降低土壤有机碳含量,土壤碳平衡呈现为负增长,王立刚等^[27]认为秸秆还田会在长时间尺度遏制黑土土壤有机碳下降的态势,保持一定的正平

衡,但对于两种措施相结合对东北黑土区有机碳平衡的研究较少,对土壤碳平衡影响变化也不明确。针对以上问题,本研究采取田间原位监测的方法,探究深松结合秸秆还田措施对东北黑土区春玉米农田土壤呼吸和土壤有机碳平衡的影响,以期东北黑土土壤地力提升及土壤有机碳平衡提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验地点设立于黑龙江省绥化市青冈县民政镇进化村($126^{\circ}11'3.14''\text{E}$, $46^{\circ}42'42.11''\text{N}$),该地区位于典型黑土区,属温带大陆性季风气候,平均海拔457 m,年平均气温 $2.4\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ 。最冷月平均气温 -20.9°C ,最热月平均气温 22.1°C 。年降水量为477 mm。全年无霜期130 d左右。供试土壤为黏壤质黑土,土壤0~100 cm土层物化性状如表1所示。

本试验开始于2017年,为使研究结果更加准确和更具代表性,本文采用2019年的数据进行分析。试验供试作物春玉米品种为“天泽(泽玉)704”,于2019年4月28日播种,10月3日收获,行距65 cm,种植密度为每公顷5.92万株。

本试验采用大区处理,共设置6个处理,具体田间管理措施如表2。

每个处理区域长50 m、宽24 m,面积 1200 m^2 。每年秋季玉米收获后,按照试验设置将需要秸秆还田地块的秸秆原位粉碎(长度 $\leq 10 \text{ cm}$),然后使用德国LEMKEN公司进口的Karat 9深松机进行深松,深松深度可通过仪器数字电控,精度高,每2 a深松一次。按不同深度要求深松后将田间秸秆全量旋耕20 cm还田(2019年秸秆还田量 T2: $10\ 375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; T3:

表1 基础土壤理化性状
Table 1 Basic soil physical and chemical properties

土壤深度 Soil depth/cm	土壤容重 Soil bulk density/g·cm ⁻³	土壤含水率 Soil moisture content/%	土壤有机碳 SOC/mg·kg ⁻¹	全氮 TN/mg·kg ⁻¹	碱解氮 AN/mg·kg ⁻¹	pH
0~20	1.34	17.4	25.6	3.4	282.8	6.5
20~40	1.25	18.4	17.1	1.3	112.8	7.0
40~60	1.37	15.7	10.4	0.8	67.9	7.3
60~80	1.41	15.5	8.3	0.5	37.0	7.5
80~100	1.41	15.5	7.7	0.5	23.6	7.5

表2 不同处理田间管理措施
Table 2 Field management measures in different treatments

处理 Treatments	具体田间管理措施 Concrete measures in field
CK	不施肥处理(不深松,秸秆不还田)
FP	农民习惯处理(不深松,秸秆不还田),施肥
T1	单独深松25 cm处理(秸秆不还田),施肥
T2	单独秸秆全量还田处理(不深松),施肥
T3	深松25 cm+秸秆全量还田处理,施肥
T4	深松35 cm+秸秆全量还田处理,施肥

11 098 kg·hm⁻²;T4:11 091 kg·hm⁻²),起垄后待下一年5月份继续播种。播种时使用肥料如下:尿素(N 46.0%)、磷酸二胺(N-P₂P₅-K₂O为18-46-0)和钾肥(K₂O 50%),农民习惯处理(FP)按240 kg N·hm⁻²、135 kg P₂O₅·hm⁻²、100 kg K₂O·hm⁻²的施肥量混合,其他处理(T1、T2、T3、T4)按192 kg N·hm⁻²、135 kg P₂O₅·hm⁻²、100 kg K₂O·hm⁻²的施肥量混合,一次性施入化肥,均匀沟施。播种后各小区在作物拔节前中耕除草和打农药一次,无追肥处理。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率采用美国LI-COR公司研制动态密闭式Li-8100红外土壤呼吸仪测定。每个处理按要求各放置3个土壤呼吸的PVC基座(直径20 cm,高度15 cm)作为重复埋入土壤中,每个基座上方露出土面5 cm。为避免安装基座对土壤呼吸造成扰动,安装完基座后2 d才开始进行第一次测量。2019年土壤呼吸的监测日期为2019年5月1日至2019年10月1日,覆盖整个玉米生育期,测定频率平均为10 d一次(具体根据管理措施、降雨等条件的变化会有微小的调整),测定时间均为上午9:00—11:00,该时间段土壤温度相对稳定,且能代表这一日的土壤呼吸平均值^[28]。在测定土壤呼吸速率同时用土壤温度计(JM-624)测定0~10 cm土层土壤温度,用土壤水分速测仪

(TRIME-PICO 64)测定0~10 cm土层土壤含水率。

1.2.2 土壤呼吸累积量和Q₁₀值

根据已测定和计算的土壤呼吸速率估算土壤呼吸累积量(以CO₂-C值计),未测定日期用拉格朗日插值法求出其日排放通量,然后累加计算求玉米整个生育期的土壤呼吸累积量。公式^[29]为:

$$X=Rs \times 3600 \times 24 \times 12 \times 10^{-5}$$
$$CO_2-C \left(\frac{kg}{hm^2} \right) = \sum_{i=first}^{n=lan} X_i + X_{i+1} \times N + X_{i+2} \times N + X_{i+n} \times N$$

式中:X为土壤每天CO₂排放量,kg·hm⁻²;Rs为测定的土壤呼吸速率,μmol·m⁻²·s⁻¹;12为CO₂-C的摩尔质量,g·mol⁻¹;3600和24为换算系数。i为第i次测定土壤呼吸速率,n为监测次数。N是相邻两次监测之间相隔的天数,相邻两次土壤呼吸的线性内插作为间隔土壤呼吸速率值。

土壤呼吸速率对温度的敏感性通常用Q₁₀来描述。Q₁₀是指温度每升高10℃所造成的土壤呼吸速率的变化值。在不受其他因子限制的情况下,温度和土壤呼吸速率(Rs)之间的关系通常可以用指数方程描述^[17]:

$$Rs=ae^{bT}$$
$$Q_{10}=e^{10b}$$

式中:a和b为拟合参数,分别代表0℃时某层土壤CO₂产生速率(μmol·m⁻²·s⁻¹)和温度响应系数;T为土壤温度,℃。

1.2.3 植物样品的采集与分析

植物样品于2019年10月3日作物成熟后采集。各小区采集完整的玉米植株3株,将植株的根、茎、叶、果实、苞叶、穗分开,用鼓风干燥箱在105℃恒温条件下杀青30 min,然后在65℃恒温条件下烘干至恒质量,测定植株各部分的生物量。随后将植物的各部分采用球磨机研磨粉碎,不过筛(植物体纤维、非纤维等部分碳氮比不同),最后测定植物样品各部

分碳含量。

1.2.4 产量测定

产量测定方法按照以下5个步骤进行^[30],测产区和植株取样区分开,植株取样不对测产形成干扰:

(1)量取并计算出试验地块的平均行距、株距,计算单位面积株数。

单位面积株数/株·hm⁻²=10 000÷(平均行距/m×平均株距/m)

(2)测定平均单株穗数。连续数20株,数取总果穗数,然后除以20,计算得到平均单株果穗数。

(3)测定平均穗粒数。随机摘取10个果穗,测定每个果穗的行数和列数,然后相乘并计算平均值,得到平均穗粒数。

(4)测定百粒质量。用摘取的测产果穗在干燥阴凉处风干至恒质量(约1个月)并称取百粒质量,计算10个重复下的平均百粒质量。

(5)计算产量。将以上测得的数据套入以下公式,计算产量。

产量(kg·hm⁻²)=单位面积株数(株·hm⁻²)×平均单株穗数×平均穗粒数×百粒质量(g)÷100 000

1.2.5 土壤有机碳平衡

土壤呼吸包括:(1)土壤有机质的分解和微生物的呼吸;(2)土壤动物的呼吸;(3)土壤矿物质的化学氧化过程;(4)植物根的呼吸。根据东北黑土区不同季节变化根系呼吸占比^[31],计算不包括根系呼吸在内的土壤呼吸累积量:

$$C_{cs}=C_c-C_{cr}$$

式中: C_c 为总土壤呼吸,kg CO₂-C·hm⁻²; C_{cr} 为根系呼吸,kg CO₂-C·hm⁻²; C_{cs} 为不包括根呼吸的其他3个部分总和,kg CO₂-C·hm⁻²。

土壤有机碳平衡表示土壤有机碳收入和支出的差值^[25]:

$$\text{土壤有机碳平衡}=C_{pr}+C_{ps}+C_{pl}+C_{pb}+C_{pt}-C_{cs}$$

式中: C_{pr} 为玉米根茬归还土壤碳量,kg C·hm⁻²; C_{ps} 为玉米茎归还土壤碳量,kg C·hm⁻²; C_{pl} 为玉米叶归还土壤碳量,kg C·hm⁻²; C_{pb} 为玉米苞叶归还土壤碳量,kg C·hm⁻²; C_{pt} 为玉米雄穗归还土壤碳量,kg C·hm⁻²; C_{cs} 为土壤呼吸累积量,kg CO₂-C·hm⁻²。

1.3 数据处理

数据处理均采用Microsoft Excel 2019,方差分析使用SPSS 19,采用Duncan法进行均值多重比较,不同字母代表0.05水平差异显著($P<0.05$),采用Origin 2017进行作图。

2 结果与分析

2.1 试验地降雨及土壤温、湿度变化

土壤表层(0~10 cm)的土壤温度随着季节变化而改变,土壤温度先升高后降低,在7月中旬达到峰值(图1),生育期平均土壤温度表现为:单独深松处理(T1)>不施肥处理(CK)>农民习惯处理(FP)>秸秆还田处理(T3>T4>T2),但处理间差异不显著。表明深松打破犁底层后,土壤通气性变强,土壤温度受空气温度影响大,温度容易提升且高于FP。而秸秆还田因秸秆持水能力强,且疏松孔隙为土壤内部孔隙,气热交换速度慢,温度相对较低。土壤表层(0~10 cm)的土壤含水量伴随着自然降雨的波动而波动,大致在15%~45%,各处理土壤含水量在不同降雨时期表现出不一致的波动,整体表现为伴随降雨的增加,土壤含水率迅速提高,直到作物成熟期,土壤含水率逐渐开始下降,各处理间无显著差异($P>0.05$)。

2.2 土壤呼吸特征

整个春玉米生育时期土壤呼吸速率表现出“先升高,后降低”的特征,呼吸速率在7月中旬至8月初达

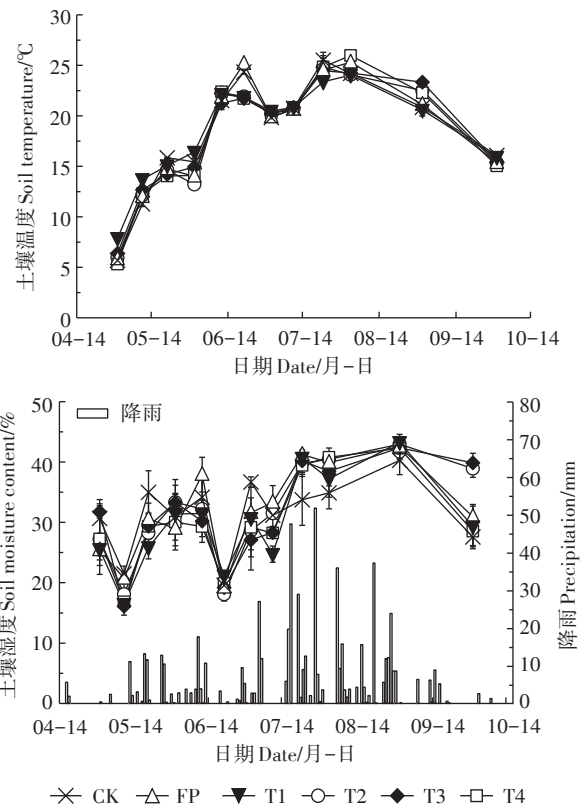


图1 试验地降雨及不同处理土壤温、湿度变化
Figure 1 Precipitation in field and change in soil temperature and humidity of different measures

到峰值,在苗期、灌浆期和成熟期各处理土壤呼吸速率波动较小,而拔节期、吐丝期各处理间土壤呼吸速率差异大(图 2)。除 T4 土壤呼吸速率在 7 月 23 日达到峰值外,其他处理在 7 月 11 日达到峰值,其中,T1 比 FP 高 72.7%;T2 比 FP 高 54.4%;T3 比 FP 高 61.7%;T4 土壤呼吸速率峰值最高,为 $4.55\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比 FP 高 105.9%;CK 比 FP 高 67.7%,其中 T4 土壤呼吸速率峰值不仅比其他处理高,而且峰值维持的时间也相对较长。

整个生育期 T1 平均土壤呼吸速率比 FP 高 49.8%

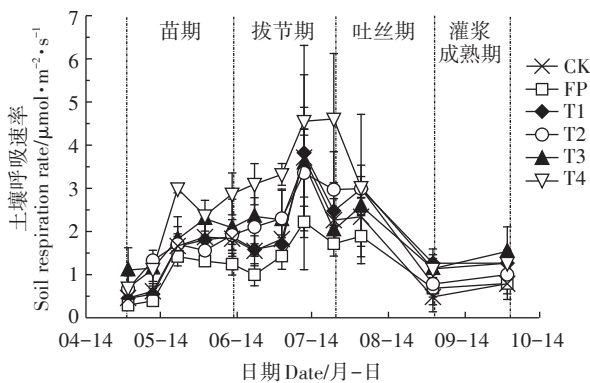


图 2 不同处理土壤呼吸速率变化

Figure 2 Changes of soil respiration rate under different measures

($P>0.05$); T2 比 FP 高 59.3% ($P>0.05$); T3 比 FP 高 67.8% ($P>0.05$); T4 比 FP 显著高 118.6% ($P<0.05$); CK 与 FP 无显著差异 ($P>0.05$)。深松、秸秆还田和两者结合与 FP 相比提高了整个生育期土壤呼吸速率,其中 T4 提高显著 ($P<0.05$)。从不同生育期看,在吐丝期,6 个处理平均土壤呼吸速率差异不显著 ($P>0.05$),而在苗期、拔节、灌浆和成熟期,不同处理间差异显著 ($P<0.05$)(表 3)。

2.3 土壤呼吸速率与水热条件的关系

土壤呼吸速率随土壤温度升高呈现指数增加的趋势(表 4),除 T3 处理外,土壤呼吸速率与土壤温度均达到显著相关水平 ($P<0.05$),土壤温度可以解释土壤呼吸速率变化的 32.9%~71.1%。温度敏感系数 Q_{10} 值大小表现为单独深松处理(T1)>不施肥处理(CK)>农民习惯处理(FP)>秸秆还田处理(T4>T2>T3)。单独深松处理打破犁底层,增强通气性和渗水能力^[32],土壤水分变化对土壤呼吸波动能力减弱,土壤呼吸对土壤温度的敏感性加强。而秸秆还田不仅固持水分,使得土壤水分对土壤呼吸变化贡献增强,而且底物的加入使得土壤呼吸影响因素更加复杂^[33-34],土壤呼吸对温度变化敏感性下降。

土壤呼吸与土壤含水率一般呈二次函数相关关

表 3 不同生育期土壤呼吸速率均值($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 3 Mean value of soil respiration rate at different growth stages($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

生育时期 Growth stages	土壤呼吸速率 Soil respiration rate					
	CK	FP	T1	T2	T3	T4
苗期 Seedling stage	1.32ab	0.93b	1.31ab	1.53ab	1.79ab	2.18a
拔节期 Jointing stage	2.59b	1.77b	2.66b	2.87ab	2.62b	4.16a
吐丝期 Silking stage	1.68a	1.41a	2.23a	2.24a	1.91a	2.91a
灌浆、成熟期 Filling and mature stage	0.62c	0.72c	1.25ab	0.87bc	1.32a	1.18ab
土壤呼吸速率峰值 Peak of soil respiration rate	3.71a	2.21a	3.82a	3.35a	3.57a	4.55a
整个生育期 Whole growth period	1.60b	1.18b	1.77ab	1.88ab	1.98ab	2.58a

注:不同小写字母代表处理间差异显著。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments.

表 4 土壤呼吸速率与土壤温、湿度关系及 Q_{10} 值
Table 4 Relationship between soil respiration rate and soil temperature and humidity and Q_{10} value

处理 Treatments	土壤呼吸与土壤温度的指数方程 Relationships between soil respiration and soil temperature				土壤呼吸与土壤含水率的二次方程 Relationships between soil respiration and soil humidity		
	指数方程 Functions	R^2	P	Q_{10}	二次函数 Functions	R^2	P
CK	$y=0.325\ 1e^{0.076\ 1x}$	0.413	0.019	2.14	$y=-0.009x^2+0.551\ 3x-6.547\ 9$	0.017	0.443
FP	$y=0.250\ 1e^{0.076\ 1x}$	0.511	0.009	2.14	$y=-0.003x^2+0.226\ 2x-2.779\ 8$	0.307	0.197
T1	$y=0.203\ 4e^{0.108\ 4x}$	0.671	0.001	2.96	$y=-0.003\ 8x^2+0.266\ 2x-2.580\ 7$	0.571	0.026
T2	$y=0.555\ 3e^{0.060\ 5x}$	0.430	0.018	1.83	$y=-0.002\ 1x^2+0.136\ 5x-0.243\ 7$	0.034	0.858
T3	$y=0.967\ 1e^{0.035\ 9x}$	0.289	0.079	1.43	$y=-0.004\ 8x^2+0.280\ 3x-1.739\ 4$	0.219	0.295
T4	$y=0.602\ 3e^{0.071\ 3x}$	0.486	0.014	2.04	$y=-0.004\ 5x^2+0.305\ 9x-2.355\ 4$	0.094	0.625

系^[35],本试验中,由于东北黑土区降雨较多,土壤为黏壤土,土壤呼吸速率与土壤含水率表现为负相关关系,但除T1处理外,二者关系均不显著(表4)。土壤呼吸与含水率的关系较为复杂,有研究表明土壤含水率只有在低于田间持水量的40%或高于80%时才会成为土壤呼吸的限制因子^[36],目前土壤水分含量不构成胁迫,所以其和土壤呼吸的相关性并不显著,但土壤水分会影响土壤整体的水、气、热条件,其对土壤呼吸的影响是不可忽视的^[21]。

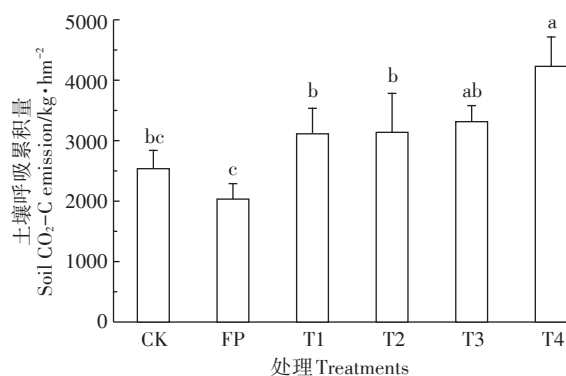
2.4 土壤呼吸累积量

土壤呼吸累积量大小整体表现为T4>T3>T2>T1>CK>FP(图3),CK与FP无显著差异($P>0.05$),T1土壤呼吸累积量比FP高53.2%($P<0.05$),T2比FP高54.3%($P<0.05$),深松+秸秆还田处理(T3、T4)土壤呼吸累积量较高,比FP分别高63.0%和108.0%($P<0.05$)。表明单独深松、单独秸秆还田和二者相结合均能有效提高土壤呼吸累积量。

按不同生育时期划分,整体表现为拔节期和吐丝期两个生育期土壤呼吸累积量占比最大(图4),分别占总生育期35.3%~41.2%和25.9%~31.9%,苗期次之,占19.8%~25.2%,灌浆成熟期土壤呼吸累积量占比最低,占7.9%~13.0%,表明在拔节和吐丝期,作物快速生长时,温、湿度适合,微生物数量从拔节期到吐丝期急剧上升并达到峰值,微生物活动加强^[37],再加上作物的快速生长,其根系的活性也较大^[38],整体表现为土壤呼吸的增强。在各生育期CK与FP土壤呼吸累积量均无显著差异($P>0.05$),T1、T2、T3和T4苗期土壤呼吸累积量比FP分别显著高23.2%、51.3%、77.6%和114.5%($P<0.05$),表明在苗期,由于土壤温度相对较低,对土壤呼吸的影响不大,而深松、秸秆还田和两种措施相结合对作物的生长促进明显,尤其是促进了根系的生长(本试验苗期T1、T2、T3、T4根系生物量比FP高22.2%~155.6%),使得土壤呼吸累积量显著加强,而在其他生育时期比FP分别高17.2%~187.0%、21.2%~67.7%和39.9%~83.7%,但差异不显著($P>0.05$),这可能是在作物成长以后,不同处理间作物根系差异降低,而土壤呼吸对环境因子的响应各有不同所导致的^[19]。

2.5 土壤有机碳平衡

在所有的处理中,农民习惯处理(FP)土壤有机碳平衡值为 $-647 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤有机碳入不敷出。单独深松处理(T1)土壤有机碳平衡值为负值,较FP增加102.3%的碳支出,土壤有机碳平衡表现为碳支



不同小写字母代表处理间差异显著。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments. The same below

图3 不同处理土壤呼吸累积量

Figure 3 Soil $\text{CO}_2\text{-C}$ emission under different conditions

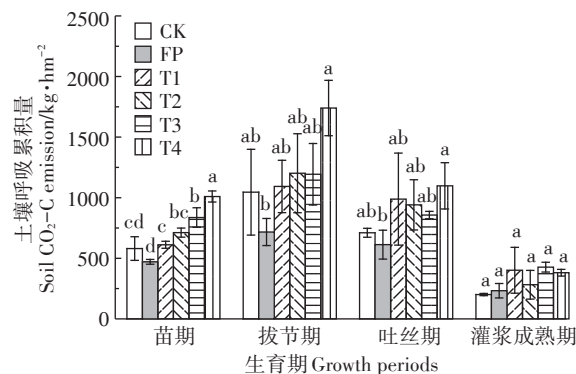
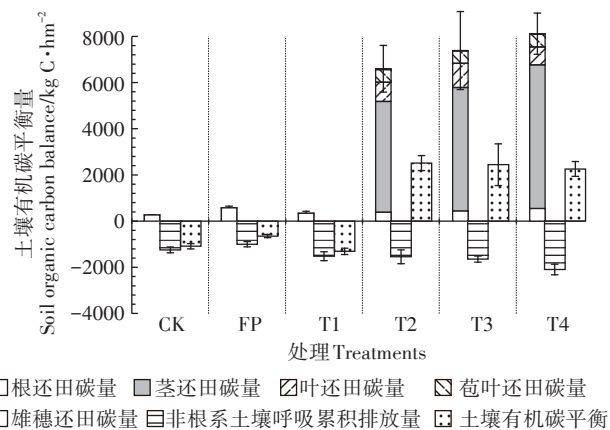


图4 不同生育期土壤呼吸累积量

Figure 4 Soil $\text{CO}_2\text{-C}$ emission under different growth stages of corn



□根还田碳量 □茎还田碳量 □叶还田碳量 □苞叶还田碳量
□雄穗还田碳量 □非根系土壤呼吸累积排放量 □土壤有机碳平衡

土壤有机碳平衡为负值表示土壤碳支出,土壤有机碳平衡为正值表示土壤碳收入
A negative soil organic carbon balance indicates soil carbon expenditure, and a positive soil organic carbon balance indicates soil carbon income

图5 土壤有机碳平衡

Figure 5 Soil organic carbon balance

出。单独秸秆还田处理(T2)、深松 25 cm+秸秆还田处理(T3)、深松 35 cm+秸秆还田处理(T4)土壤有机碳平衡均为正值,由于秸秆归还的大量碳素,土壤有机碳平衡表现为碳收入,收入大小表现为 $T2>T3>T4$,较FP分别增加了488.5%、477.7%和448.9%。

单独秸秆还田处理(T2)和深松+秸秆还田处理(T3、T4)有机碳输入中,主要是茎向土壤输入了大量的碳,占总有机碳输入的70%左右(69.3%~73.2%),其次是叶和苞叶,占18.8%~23.9%,根茬占总有机碳输入的5.8%~7.7%,其值范围为162~209 kg C·hm⁻²。

2.6 玉米产量

2019年FP玉米产量为12 306 kg·hm⁻²,比CK显著高79.4%($P<0.05$),T1、T2、T3和T4较FP分别显著提高玉米产量15.2%、22.4%、13.8%和17.4%($P<0.05$),其中T2产量最高,但T1、T2、T3和T4处理之间无显著差异($P>0.05$)(图6)。

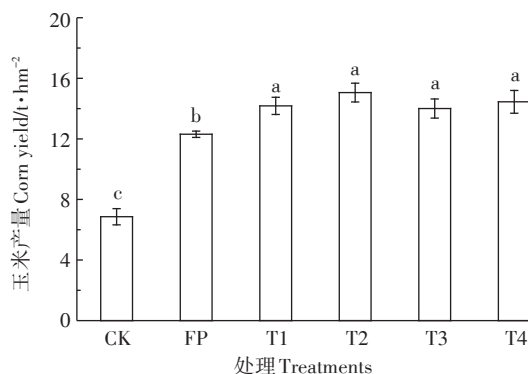


图6 玉米产量

Figure 6 Corn yield

3 讨论

3.1 深松结合秸秆还田对土壤呼吸的影响

本研究中不同处理土壤呼吸速率均表现出“先升高,后降低”的特征。土壤呼吸速率受土壤温度的影响显著($P<0.05$),5—7月份随着土壤温度的升高土壤呼吸速率逐渐升高,7月中旬至8月初温度达到最高,再加上降雨的增加,土壤含水率也有所提高,使得微生物活动增强^[39],土壤呼吸速率达到峰值,然后伴随着土壤温度的下降土壤呼吸也逐渐降低,这与前人的研究结果一致^[40]。

从不同处理来看,深松作为一种有效打破犁底层的措施,降低了表层土壤的容重和紧实度,增加了土壤孔隙度和通气性^[32],促进了土壤有机物质矿化,利于土壤中CO₂的排放,使得单独深松处理(T1)各生育期土壤呼吸均高于FP,尤其在玉米灌浆、成熟期降雨

减少,土壤含水率下降,土壤中被水分填充的部分孔隙得以释放,通气性加强,此时土壤呼吸显著高于农民习惯处理($P<0.05$),最终使得土壤呼吸累积量显著提高($P<0.05$)。单独秸秆还田(T2)土壤呼吸速率峰值大幅高于农民习惯处理54.4%,这与高寒^[21]和秦子钊等^[22]的研究相似,在玉米拔节和吐丝期,土壤温度较高,降雨的增加使得土壤含水率开始上升,秸秆加速腐解,土壤微生物快速繁殖且活动剧烈^[41],土壤活性加强,土壤呼吸速率迅速提升并达到峰值,因此整体土壤呼吸累积量显著高于农民习惯处理($P<0.05$)。

深松+秸秆还田处理(T3、T4)土壤呼吸累积量不仅显著高于农民习惯处理(不深松、秸秆不还田,FP)($P<0.05$),而且均高于单独深松(T1)和单独秸秆还田(T2),两种措施结合可以促进土壤呼吸作用。主要原因可能是秸秆分解生成的腐殖质提供了碳源和底物,并有效固持水分^[32],为微生物活动提供了适宜的外部环境,而深松进一步加大了土壤孔隙度,增强了土壤通透性^[42],促进了秸秆的分解,因此两种措施相结合能显著提高土壤呼吸。其中,深松 35 cm+秸秆还田(T4)土壤呼吸累积量显著高于深松 25 cm+秸秆还田(T3)和其他处理($P<0.05$),这与贺美等^[17]研究结果一致,原因可能是秸秆还田条件一致情况下,深松 35 cm+秸秆还田(T4)打破犁底层的程度较强、深松深度深,土壤通气性更加良好^[32],土壤呼吸速率长期高于其他处理,土壤呼吸累积量显著高于其他处理。但深松和秸秆还田两种措施结合时,哪种措施是土壤呼吸的主要贡献措施?贡献程度多大?目前尚不能科学地量化,还有待于更深入的研究。

3.2 深松结合秸秆还田对土壤有机碳平衡的影响

本研究中,农民习惯处理(不深松、秸秆不还田,FP)土壤有机碳平衡为负值,表现为入不敷出,长此以往,东北黑土土壤有机碳含量下降,土壤肥力降低,影响土壤持续生产能力。梁爱珍等^[43]研究发现东北耕作黑土0~10 cm土层SOC损失量为26.8%~46.6%,SOC损失严重。贺美等^[39]利用DNDC模型模拟当地农民习惯处理40 a的土壤有机碳变化,黑土土壤有机碳含量下降了7.8%。按照农民习惯处理,东北黑土有机碳必定逐年降低,直至达到新的平衡,因此,东北黑土要实现农业可持续发展,亟需土壤固碳措施的实施。

单独深松处理(T1)提高了玉米产量,主要原因是深松打破了犁底层,降低了表层土壤容重,促进玉米根系生长及发育^[44-45],加速了雨水下渗^[46],改善了土

壤环境,实现了作物有效增产^[16]。但在仅进行深松措施而没有秸秆归还情况下,土壤呼吸累积量显著提高,增强了土壤有机碳矿化,土壤有机碳支出高于农民习惯处理(FP),若长期采取单独深松措施,会加剧土壤有机碳的损失,而且有研究发现深松措施主要降低的是土壤中活性碳的含量^[47],活性有机碳与作物生长关系密切,与产量呈显著相关关系^[48],若长期或频繁进行单独深松,不仅不利于土壤有机碳的保护,而且其增产效果也会逐渐减弱。

单独秸秆还田(T2)土壤有机碳平衡为正值,能提高土壤有机碳含量,增加土壤肥力,这在东北黑土区已经形成了共识^[49-50],而且秸秆还田措施能有效提高玉米产量。主要原因是秸秆腐熟提供有机质和固持水分^[32],使得根际微生物活跃,土壤酶活性显著增强^[51],促进作物生长,最终增加作物产量。但玉米秸秆还田并非越多越好,钱凤魁等^[52]在黑土区研究发现秸秆还田量在0~12 000 kg·hm⁻²玉米产量逐渐上升,超过18 000 kg·hm⁻²则产量降低,目前,本试验原位秸秆还田量为10 375~11 098 kg·hm⁻²,处于合理秸秆还田量区间,秸秆还田具有增产和固碳能力^[17]。

深松25 cm+秸秆还田(T3)和深松35 cm+秸秆还田(T4)处理土壤有机碳平衡均为正值,增加了土壤有机碳收入,这与邱建军等^[25]研究结果一致。其碳收入的量略低于单独秸秆还田处理(T2),主要原因是在秸秆还田的同时还进行了深松,深松措施提高了土壤呼吸累积,提高了碳支出,但在进行秸秆还田措施的情况下,由于秸秆碳的输入,此时土壤呼吸的增强不能单纯地看作耕地土壤矿化加剧、SOC损失、对大气CO₂的排放增加的过程^[53],此时的土壤呼吸更多表现为土壤微生物活性、土壤动物呼吸活动大小和土壤本身活性强弱的重要指标^[54]。深松结合秸秆还田措施打破了犁底层,提高了通透性,促进作物根系生长,又增强土壤活性,改善了作物生长环境,不仅显著提高了产量,而且有效地增加了碳收入,使得土壤有机碳可以持续输入和固定,这与耕地土壤可持续且高效利用的目标是相符合的。

本研究中主要测定的是作物生长季内的土壤呼吸,不能完整代表全年的土壤呼吸量,为了更全面地度量年季土壤有机碳平衡,我们通过取得的气象数据(数据由青冈气象局提供),利用土壤和空气温度相关性关系^[55-56]计算得到土壤温度变化,发现作物播种前有21 d土壤温度高于0℃,收获后有19 d高于0℃,根据不同处理下土壤呼吸和土壤温度的指数相关关系

(表4),估算得出玉米非生长季的土壤呼吸累积量,得出东北黑土区非生长季土壤呼吸累积量占全年土壤呼吸累积量的5.7%~15.5%,低于黄淮海地区约40%的比例^[57]。通过累加非生长季土壤呼吸累积碳排放得到各处理全年土壤有机碳平衡值,较作物生长季土壤有机碳平衡均有了一定的降低,但各处理土壤有机碳正负收支没有改变。还田秸秆量为多少能保持土壤有机碳平衡为正值?长时间尺度上,深松+秸秆还田措施土壤有机碳平衡是否会达到新的正平衡?这需要进一步的试验研究。

4 结论

(1)整个玉米生育时期土壤呼吸速率表现出“先升高,后降低”的特征,呼吸速率在7月中旬至8月初达到峰值,与土壤温度呈显著正相关关系。拔节期和吐丝期为土壤呼吸累积量主要贡献时期,分别占35.3%~41.2%和25.9%~31.9%。深松结合秸秆还田处理较FP显著提高土壤呼吸累积量53.2%~108.0%,其中深松35 cm+秸秆还田(T4)土壤呼吸提升最大。

(2)农民习惯处理(不深松、秸秆不还田,FP)土壤有机碳入不敷出,土壤有机碳平衡值为-647 kg C·hm⁻²。单独深松处理(T1)土壤有机碳平衡为负值,且碳支出比FP高102.3%,碳损失最严重。单独秸秆还田处理(T2)和深松+秸秆还田处理(T3、T4)较FP增加了土壤有机碳收入488.5%、477.7%和448.9%,土壤有机碳平衡均为正值,均能有效固存土壤有机碳。

(3)单独深松和单独秸秆还田及两者结合的处理均能显著增加玉米产量13.8%~22.4%,达到12 t·hm⁻²高产水平。

参考文献:

- [1] Post W M, King A W, Wullschlegel S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon[C]//Evaluation of soil organic matter models, Berlin:Springer, 1996:201-222.
- [2] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29(4):437-450.
- [3] Van Oost K, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. *Science*, 2007, 318(5850):626-629.
- [4] Powlson D S, Smith P, Smith J U, et al. Evaluation of soil organic matter models[M]. Berlin:Springer, 1996.
- [5] Sikora L J, McCoy J L. Attempts to determine available carbon in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9(1):19-24.
- [6] 杨玲,张前兵,王进,等.管理措施对绿洲农田土壤总有机碳及易氧化有机碳季节变化的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),

- 2013(5):549-555.
- YANG Ling, ZHANG Qian-bing, WANG Jing, et al. Effect of main technical measures on soil total organic carbon and easily oxidation seasonal dynamics of oasis farmland[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2013(5):549-555.
- [7] 张之一. 关于世界黑土分布的探讨[J]. 黑龙江农业科学, 2010(4): 59-60.
- ZHANG Zhi-yi. Discuss on distribution of phaeozem in the world[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010(4):59-60.
- [8] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1):154-161.
- QIU Jian-jun, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):154-161.
- [9] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1):17-19.
- LIU Xing-tu, YAN Bai-xing. Soil and water loss and food security in the black soil region of Northeast China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009(1):17-19.
- [10] Nawaz M F, Guilhem B, Trolard F. Soil compaction impact and modeling: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2):291-309.
- [11] 李然嫣. 我国东北黑土区耕地利用与保护对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- LI Ran-yan. Research on policy options in utilizing and protecting farmland in black soil region for Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [12] 孟令钦, 李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):7-11.
- MENG Ling-qin, LI Yong. The mechanism of gully development on sloping farmland in black soil area, Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1):7-11.
- [13] 姚宗路, 赵立欣, 田宜水, 等. 黑龙江省农作物秸秆资源利用现状及中长期展望[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):288-292.
- YAO Zong-lu, ZHAO Li-xin, TIAN Yi-shui, et al. Utilization status and medium and long-term forecast of crop straw resource in Heilongjiang Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11):288-292.
- [14] 邓智惠, 刘新梁, 李春阳, 等. 深松及秸秆还田对表层土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 作物杂志, 2015(6):117-120.
- DENG Zhi-hui, LIU Xin-liang, LI Chun-yang, et al. Effects of subsoiling and straw returning on surface soil physical properties and maize yield[J]. *Crops*, 2015(6):117-120.
- [15] 郝强, 张晓敏, 管敬华. 秸秆还田地深松深耕轮作的必要性[J]. 农机科技推广, 2016, 31(7):28.
- HAO Qiang, ZHANG Xiao-min, GUAN Jing-hua. The necessity of rotating crops in the field[J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2016, 31(7):28.
- [16] 闫洪奎, 王欣然. 长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(5):250-255.
- YAN Hong-kui, WANG Xin-ran. The effects of straw returned form a complete set of deep scarifications to soil properties and maize yield under a long-term trial[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(5):250-255.
- [17] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 不同耕作措施对黑土碳排放和活性碳库的影响[J]. 土壤通报, 2016(5):1195-1202.
- HE Mei, WANG Ying-chun, WANG Li-gang, et al. Effect of different tillage managements on carbon dioxide emission and content of activated carbon in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(5):1195-1202.
- [18] 张俊丽, Sikander K T, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):192-199.
- ZHANG Jun-li, Sikander K T, WEN Xiao-xia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(18):192-199.
- [19] 禄兴丽, 廖允成. 不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J]. 环境科学, 2015(6):2266-2273.
- LU Xing-li, LIAO Yun-cheng. Effects of tillage on soil respiration and root respiration under rain-fed summer corn field[J]. *Environmental Science*, 2015(6):2266-2273.
- [20] 伏星舟, 王立, 杨彩红, 等. 不同耕作方式对绿洲区夏玉米农田土壤呼吸及酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5):109-114.
- FU Xing-zhou, WANG Li, YANG Cai-hong, et al. Effects of different cultivation on soil respiration and enzyme activity of summer maize in oasis region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5):109-114.
- [21] 高寒. 玉米秸秆还田对黑土土壤呼吸及碳库的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- GAO Han. Effects of straw returning methods on chernozem soil of soil respiration and carbon pool management index[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [22] 秦子钊, 刘子琪, 曾庆亚, 等. 玉米秸秆还田对东北黑土土壤碳排放的影响研究[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(3):37-38.
- QIN Zi-bo, LIU Zi-qi, ZENG Qing-ya, et al. Effect of putting the corn stalks on black land on carbon emissions in Northeast China[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2011, 36(3):37-38.
- [23] 宋秋来. 松嫩平原旱作农田土壤CO₂排放规律及土壤碳平衡研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- SONG Qiu-lai. Studies on CO₂ emission and carbon balance of farmland in Song-Nen Plain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [24] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 玉米秸秆还田对土壤呼吸速率的影响[J]. 玉米科学, 2011(2):110-113, 118.
- LIU Wu-ren, ZHENG Jing-yu, LUO Yang, et al. Effects of maize straw with returning into field on rate of soil respiration[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(2):110-113, 118.
- [25] 邱建军, 唐华俊, 陈庆沐, 等. 中国农业耕地土壤碳平衡与碳排放研究[C]//中国青年农业科学学术年报. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- QIU Jian-jun, TANG Hua-jun, CHEN Qing-mu, et al. Study on soil carbon balance and carbon emission of agricultural cultivated land in

- China[C]/China Youth Agricultural Science Academic Annual Report. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [26] 张博文, 杨彦明, 张兴隆, 等. 连续深松对黑土结构特性和有机碳及碳库指数影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 280(2): 12-19.
- ZHANG Bo-wen, YANG Yan-ming, ZHANG Xing-long, et al. Effects of continuous deep loosening on soil physical characteristics, organic carbon content and carbon pool index in black soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, 280(2): 12-19.
- [27] 王立刚, 李 虎, 邱建军, 等. 田间管理措施对土壤有机碳含量影响的模拟研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 29-37.
- WANG Li-gang, LI Hu, QIU Jian-jun, Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 29-37.
- [28] 李 虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 14-20.
- LI Hu, QIU Jian-jun, WANG Li-gang. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 14-20.
- [29] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 31(18): 5217-5224.
- GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [30] 陈新红. 作物栽培学实验[M]. 南京: 南京大学出版社, 2014.
- CHEN Xin-hong. Crop cultivation experiment[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2014.
- [31] 刘国栋, 杨 柯, 崔玉军, 等. 松嫩平原典型黑土分布区土壤呼吸研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 101-106.
- LIU Guo-dong, YANG Ke, CUI Yu-jun, et al. A study of soil respiration of typical black soil in Songnen Plain, northeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 101-106.
- [32] 张 丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 102-106.
- ZHANG Li, ZHANG Zhong-dong, GUO Zheng-yu, et al. Effects of subsoiling tillage and straw returning to field on soil physical properties[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 102-106.
- [33] Curiel J, Yuste, et al. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 161-169.
- [34] Gu L H, Post W M, King A W, et al. Fast labile carbon turnover obscures sensitivity of heterotrophic respiration from soil to temperature: A model analysis global biogeochemical cycles[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, doi: 10. 1029/2003GB002119.
- [35] Lai L, Zhao X, Jiang, et al. Soil respiration in different agricultural and natural ecosystems in an arid region[J]. *Plos One*, 2012, 7(10): e48011.
- [36] Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. London: Academic Press, 2006.
- [37] 吴海燕, 范作伟, 孙甜田, 等. 长期定位施肥玉米生育期内微生物量碳、氮和微生物数量的动态变化[J]. 玉米科学 2016, 24(2): 147-154, 159.
- WU Hai-yan, FAN Zuo-wei, SUN Tian-tian, et al. Dynamic changes of microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quantity in maize growth period under long-term fertilization[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(2): 147-154, 159.
- [38] 蔡 福, 明惠青, 谢艳兵, 等. 东北地区春玉米关键生育期干旱对根系生长的影响[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(2): 75-81.
- CAI Fu, MING Hui-qing, XIE Yan-bing, et al. Effect of drought stress on root growth during the key growth periods of spring maize in northeast China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(2): 75-81.
- [39] 贺 美, 王立刚, 朱 平, 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化[J]. 生态学报, 2017(19): 94-104.
- HE Mei, WANG Li-gang, ZHU Ping, et al. Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization conditions of black soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017(19): 94-104.
- [40] 宋秋来, 王峭然, 王 麒, 等. 玉米秸秆还田对黑土碳排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 219-222.
- SONG Qiu-lai, WANG Xiao-ran, WANG Lin, et al. Effect of corn stalk returning on carbon emission of black soil[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2017, 45(13): 219-222.
- [41] 王晓飞, 李志洪, 郭梦桥, 等. 不同方式秸秆还田对土壤呼吸的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13): 80-82.
- WANG Xiao-fei, LI Zhi-hong, GUO Meng-qiao, et al. Effects of different methods of returning straw on soil respiration[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2015, 43(13): 80-82.
- [42] 王万宁, 强小嫚, 刘 浩, 等. 麦前深松对夏玉米土壤物理性状和生长特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017(6): 232-239.
- WANG Wan-ning, QIANG Xiao-man, LIU Hao, et al. Effects of subsoiling before sowing of winter wheat on soil physical properties and growth characteristics of summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017(6): 232-239.
- [43] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 东北黑土有机碳的分布及其损失量研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 533-538.
- LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, YANG Xue-ming, et al. Distribution of soil organic carbon and its loss in black soils in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 533-538.
- [44] 李 华, 逢焕成, 任天志, 等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013(3): 213-222.
- LI Hua, PANG Huan-cheng, REN Tian-zhi, et al. Effects of deep rotary-subsoiling tillage method on brown physical properties and maize growth in Northeast of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013(3): 213-222.
- [45] 谷思玉, 朱玉伟, 郭兴军, 等. 不同耕作方式下黑土物理性状及其对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(4): 230-235.
- GU Si-yu, ZHU Yu-wei, GUO Xing-jun, et al. Effects of different tillage ways on seedling growth of maize and soil physical properties in mollisol region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(4): 230-235.
- [46] 王贵作. 黑龙江省西部半干旱区坡耕地水分入渗、径流和土壤侵

- 蚀量试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2006.
- WANG Gui-zuo. A study on slope farmland infiltration runoff and soil erosion in the west region of Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006.
- [47] 刘旭, 李双异, 彭畅, 等. 深松和秸秆深还对黑土有机碳及其活性组分的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 602-608.
- LIU Xu, LI Shuang-yi, PENG Chang, et al. Effects of deep loosening and deep straw returning on soil organic carbon and its active fractions in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3): 602-608.
- [48] 刘淑霞, 刘景双, 赵明东, 等. 土壤活性有机碳与养分有效性及作物产量的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(5): 539-543.
- LIU Shu-xia, LIU Jing-shuang, ZHAO Ming-dong, et al. Relationship between active organic carbon, nutrient bioavailability and crop yield[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(5): 539-543.
- [49] 李艳, 李玉梅, 刘峥宇, 等. 秸秆还田对连作玉米黑土团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(2): 129-138.
- LI Yan, LI Yu-mei, LIU Zheng-yu, et al. Effects of straw incorporation on aggregate stability and organic carbon content of black soil in continuous cropping maize[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(2): 129-138.
- [50] 徐莹莹, 王俊河, 刘玉涛, 等. 耕作与秸秆还田方式对连作玉米田根际微生物及酶活性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018(7): 1-4.
- XU Ying-ying, WANG Jun-he, LIU Yu-tao, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism and enzyme activity in continuous cropping corn field[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018(7): 1-4.
- [51] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 263-269.
- HAO Xiang-xiang, YANG Chun-bao, YUAN Ya-ru, et al. Effects of continuous straw returning on organic carbon content in aggregates and fertility of black soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 263-269.
- [52] 钱凤魁, 黄毅, 董婷婷, 等. 不同秸秆还田量对旱地土壤水肥和玉米生长与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 61-65.
- QIAN Feng-kui, HUANG Yi, DONG Ting-ting, et al. Effect of crop residue incorporation on soil moisture and nutrient and maize growth and yield of arid farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 61-65.
- [53] Li H B, Han X Z, Qiao Y F, et al. Carbon dioxide emission from black soil as influenced by land-use change and long-term fertilization[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(7/8): 1350-1368.
- [54] 禹朴家, 徐海量, 王炜, 等. 沙丘不同部位土壤呼吸对人工降水的响应[J]. 中国沙漠, 2012(2): 437-441.
- YU Pu-jia, XU Hai-liang, WANG Yi, et al. Response of soil respiration artificial rainfall in different parts of sand dunes[J]. *Journal of Desert Research*, 2012(2): 437-441.
- [55] 刘继龙, 刘璐, 付强, 等. 黑土区玉米地土壤温度的时空变异性研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 33-37.
- LIU Ji-long, LIU Lu, FU Qiang, et al. Spatiotemporal variation of soil temperature within a corn field in black soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(1): 33-37.
- [56] Kang S, Kim S, Oh S, et al. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 136(1/2/3): 173-184.
- [57] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692.
- MENG Lei, DING Wei-xin, CAI Zu-cong, et al. Storage of soil organic and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6): 687-692.