

不同轮作方式和秸秆还田对麦田土壤 CO₂ 排放与 水热碳氮状况和产量的影响

李昌珍^{1,2}, 张婷婷^{1,2}, 冯永忠^{1,2}, 任广鑫^{1,2}, 杨改河^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探讨免耕条件下不同轮作方式秸秆还田对土壤 CO₂ 排放的影响, 本研究通过长期定位试验, 采用 GXH-3010E1 型便携式红外线分析器测量土壤 CO₂ 排放速率, 对比研究冬小麦-夏闲、冬小麦-夏玉米和冬小麦-夏大豆在秸秆还田条件下土壤 CO₂ 排放的动态变化及其与土壤温度、水分之间的回归关系, 并分析比较土壤有机碳和碱解氮含量的变化。结果表明: 三种轮作方式秸秆还田条件下冬小麦土壤 CO₂ 排放具有明显的季节变化规律, 平均 CO₂ 排放通量表现为冬小麦-夏玉米全量还田 > 冬小麦-夏玉米不还田 > 冬小麦-夏大豆全量还田 > 冬小麦-夏大豆不还田 > 冬小麦-夏闲全量还田 > 冬小麦-夏闲不还田。所有处理土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率和土壤温度均呈显著正相关, 秸秆未还田处理地温与 CO₂ 排放通量的模拟模型要好于秸秆还田处理。各处理冬小麦收获后土壤有机碳和碱解氮含量均比播种前高, FA、FN 处理有机碳增加最大, SA、SN 碱解氮增加最大。

关键词: 轮作方式; 秸秆还田; CO₂ 排放; 土壤温度; 土壤湿度; 有机碳; 碱解氮

中图分类号: S181; S344.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0190-08

Effects of different rotation modes and straw returning on soil CO₂ emission fluxes and moisture, heat, carbon and nitrogen conditions in wheat field

LI Chang-zhen^{1,2}, ZHANG Ting-ting^{1,2}, FENG Yong-zhong^{1,2}, REN Guang-xin^{1,2}, YANG Gai-he^{1,2*}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100 China;

2. The Research Center for Recycling Agricultural Engineering Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi, 712100 China)

Abstract: In order to explore the effect of different rotation modes and straw returning on soil CO₂ emission under no-till condition, GXH-3010E1 portable infrared analyzer was used to measure the soil CO₂ emission rate in a long-term field experiment. The dynamic variation of CO₂ emission fluxes under different rotation modes (winter wheat-summer fallow, winter wheat-summer maize, winter wheat-summer soybean) and the relationship between soil CO₂ emission and soil temperature as well as soil moisture were compared, and the changes of soil organic carbon and alkali-hydrolyzable nitrogen were analyzed. The results showed that the CO₂ emission fluxes fluctuated clearly with different seasons. The order of CO₂ emission fluxes were: winter wheat-summer maize and whole straw returning(MA) > winter wheat-summer maize and no straw returning(MN) > winter wheat-summer soybean and whole straw returning(SA) > winter wheat-summer soybean and no straw returning(SN) > winter wheat-summer fallow and whole straw returning (FA) > winter wheat-summer fallow and whole straw returning(FN). There was highly significant positive relationship between soil CO₂ emission fluxes and soil temperature as well as soil moisture under all treatments, and the simulation models between soil temperature and CO₂ emission fluxes under no straw returning were better than those under straw returning. The contents of soil organic carbon and alkali-hydrolyzable nitrogen after harvesting of wheat increased, compared to those before seeding. The soil organic carbon was increased most under FA and FN, while the alkali-hydrolyzable nitrogen was increased most under SA and SN.

收稿日期: 2013-06-09

基金项目: 十二五国家科技支撑计划项目(2011BAD15B03); 公益性行业(农业)科研专项“西北地区水土资源高效利用农作制”(201103001)

作者简介: 李昌珍(1987—), 女, 硕士, 研究方向为生物质能与循环农业技术。E-mail: lichangzhen029@163.com。

* 通信作者: 杨改河(1957—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事资源与环境生态、循环农业等方面的研究。E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn。

Keywords: rotation modes; straw returning; CO₂ emission flux; soil temperature; soil moisture; soil organic carbon; alkali – hydrolyzable nitrogen

近百年来,由于人类活动和土地利用方式的改变导致了土壤碳向大气中的大量排放,使大气中 CO₂ 浓度大幅增加,大气的温室效应随之增强^[1-2]。免耕目前被认为是一项具有直接降低温室气体排放且提高土壤固碳潜力的有效农业措施之一^[3-4],免耕条件下土壤 CO₂ 排放显著低于翻耕和旋耕处理^[5-6]。一般认为影响土壤 CO₂ 排放的关键因子是土壤温度^[7]和土壤湿度^[8],其中农田土壤 CO₂ 排放与 5、10 cm 地温具有较高的相关性^[9-10],而土壤水分对农田 CO₂ 排放的影响较为复杂。除土壤温度、水分外,土壤微生物状况、秸秆覆盖、施肥、灌溉等因素也可通过影响植被的分布和各种环境因子的时空分布,从而间接影响农田土壤 CO₂ 排放^[11]。在以往的研究中虽然也涉及到免耕对土壤 CO₂ 排放的影响,但都主要是与翻耕、旋耕等其它耕作措施作对比,很少有学者从事免耕条件下农业管理措施对土壤 CO₂ 排放影响的研究。本研究通过对关中灌区农田土壤 CO₂ 排放及土壤水分和温度的测定,以及对土壤有机碳和碱解氮的变化进行分析,系统探讨免耕条件下不同轮作方式秸秆还田对土壤 CO₂ 排放的影响以及其与土壤温、湿度的关系,进而对农田 CO₂ 排放与土壤水热关系进行模拟,以期为关中灌区免耕条件下不同轮作方式农田温室气体排放提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

试验安排在西北农林科技大学北校区校内基地试验田,该地位于陕西关中平原西部,地理位置为 108°07′ E, 34° 12′ N, 海拔 520 m, 年降水量约为 660 mm,主要集中在 7—9 月,为大陆性暖温带季风区气候,一年两熟。年平均气温 12.9℃,最热月是 7—9 月,月平均温度 23.4℃,相对湿度为 72%。试验地土壤为瘠土,土壤基本理化性质见表 1。

试验开始于 2010 年,选取其中三种轮作方式与两种秸秆还田量交互处理为研究对象,试验处理为冬小麦 – 夏闲全量还田(FA)、冬小麦 – 夏闲不还田(FN)、冬小麦 – 夏玉米全量还田(MA)、冬小麦 – 夏玉米不还田(MN)、冬小麦 – 夏大豆全量还田(SA)、冬小麦 – 夏大豆不还田(SN)。所有处理都在免耕条件下进行。每个处理设 3 次重复。小区长 8.6 m,宽 8.0 m,小区间距 0.5 m,周边宽 1.5 m。试验冬

小麦品种为西农 889,千粒重 40 g,免耕条播小麦 375 kg·hm⁻²,2011 年 10 月 7 日播种,2012 年 6 月 10 日收获。冬小麦播种前施底肥尿素(N 素质量分数 46%)375 kg·hm⁻²,磷酸二胺(P₂O₅ 质量分数 46%) 375 kg·hm⁻²。冬小麦 – 夏玉米轮作方式中夏玉米采用追肥,追肥量为尿素(N 素质量分数 46%)375 kg·hm⁻²,追肥时间为拔节期;冬小麦 – 夏大豆轮作中夏大豆施底肥磷酸二胺(P₂O₅ 质量分数 46%)150 kg·hm⁻²;夏闲期不施肥。试验统一管理,整个生育期不灌水,其它田间管理措施同当地常规栽培。本研究采用 2012 年冬小麦生长季 3—6 月的数据。

表 1 试验地土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical characteristics of experimental soil

土层 Soil layer /cm	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)
0 ~ 10	9.33	13.51	24.12	194.21
10 ~ 20	7.80	11.97	19.33	164.83
20 ~ 30	4.37	9.31	10.66	133.07
30 ~ 40	4.43	9.75	10.63	126.07

1.2 测试的项目和方法

1.2.1 土壤 CO₂ 排放测定 土壤 CO₂ 排放测定采用 GXH – 3010E1 型便携式红外线分析器(华云分析仪器研究所有限公司,北京市)。小麦播种后,在每个小区中间埋置 1 个 PVC 腔室,埋置深度为 5 cm,外围填土、打平。测量时用橡胶软管连接 GXH – 3010E1 型便携式红外线分析器和腔室,按要求测定该样点初始 CO₂ 质量分数,然后拧紧小盖,开启小风扇,使腔室内的气体混合均匀,腔室呈一个密闭空间,持续混合一定时间后,记录该样点的即时 CO₂ 质量分数。

$$F = k(X_2 - X_1)H/\Delta t \cdot M$$

式中, F 为 CO₂ 排放通量($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); k 为换算系数, $k = 0.56(25^\circ\text{C}, 1 \text{ 个标准大气压})$; X_1 为测定时 CO₂ 初始质量分数, X_2 为 CO₂ 即时质量分数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); H 为容器高(m); Δt 为测定时间(s); M 为 CO₂ 的摩尔质量,为 44.01。为了减小温度日变化对不同处理间土壤 CO₂ 浓度的影响,每次测定在上午 9:00 ~ 11:00 进行,该时间段温度比较稳定。

1.2.2 土壤温、湿度测定 土壤温度采用直角地温

计测定,在小麦播种后,将直角地温计埋到 PVC 腔室附近,每个小区埋 1 套,埋置深度为 5、10、15、20、25 cm,在测定土壤 CO₂ 排放的同时记录土壤温度。

土壤湿度采用铝盒烘干称重法测定,每次测定土壤 CO₂ 排放的当天,用土钻采集 0~100 cm 土壤样品,每 10 cm 为 1 个分层,带回实验室称重测量。

1.2.3 土壤养分测定 在小麦播种前(10 月 6 日)和收获后(6 月 11 日)分别取 0~40 cm 土样,采用五点取土法,每 10 cm 为 1 个分层,带回实验室自然风干,磨碎过筛后,分别采用重铬酸钾容量法、碱解扩散法测定土壤有机碳、碱解氮。

1.2.4 小麦成熟性状测定 成熟期,测定小麦亩(666.7m²)穗数、有效穗粒数、千粒重,计算小麦产量。

1.3 数据分析

试验数据分析采用 Origin 75 和 SAS V8 统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同轮作方式秸秆还田冬小麦生长季土壤 CO₂ 排放通量的变化

三种轮作方式秸秆还田条件下土壤 CO₂ 排放规律基本一致(图 1),总体表现为冬小麦返青后(3 月 26 日)CO₂ 排放持续增加,拔节期(4 月 18 日)达到最高峰,抽穗期(5 月 8 日)略有降低,灌浆期(5 月 17 日)又迅速升高之后进一步降低直至收获。整个观测期,所有处理 MA、MN、SA、SN、FA、FN 平均 CO₂ 排放通量分别为 15.77、13.91、12.64、9.09、8.53、6.43 μmol·m⁻²·s⁻¹,且不同处理间土壤 CO₂ 排放通量差异达到极显著水平(P<0.0001)。MA 处理 CO₂ 排放通量一直处于最高,其波动范围在 14.06~18.29 μmol·m⁻²·s⁻¹之间。FN 处理 CO₂ 排放通量最低,其变化范围为 4.24~8.61 μmol·m⁻²·s⁻¹。不同处理 CO₂ 排放通量峰值出现的时间有明显差异,FA、MA、SA 均在拔节期和成熟期出现最高和最低峰值;FN、SN 均在成熟期出现最高值,在返青期出现最低值;MN 处理分别在灌浆期和返青期出现最高和最低值。

就整个观测期而言,冬小麦-夏玉米轮作方式 CO₂ 排放通量最大,其次是冬小麦-夏大豆,冬小麦-夏闲 CO₂ 排放量最小。这可能与前茬作物的施肥水平不同有关,施肥能增加土壤 CO₂ 排放量,且 CO₂ 排放随施肥量增多而增强^[12]。秸秆还田显著增加 CO₂ 排放量,平均 CO₂ 排放通量 FA 比 FN 高 2.10 μmol·m⁻²·s⁻¹,MA 比 MN 高 1.86 μmol·m⁻²·s⁻¹,SA 比 SN 高 3.56 μmol·m⁻²·s⁻¹。这是由于秸秆还田

后,腐烂分解的秸秆为微生物提供丰富的碳源,促进微生物生长活动和繁殖,同时加大了有机质的分解速率,增加土壤 CO₂ 排放量^[13]。

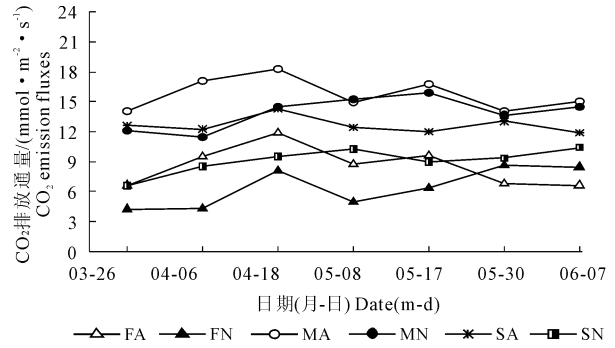


图 1 不同轮作方式冬小麦生长季土壤 CO₂ 排放通量的变化
Fig.1 Dynamic variation of soil CO₂ emission fluxes during growth period of winter wheat

2.2 不同轮作方式秸秆还田土壤温、湿度的变化

2.2.1 土壤温度的变化 各处理土层温度具有相似的变化趋势(图 2),即先上升后下降再上升。从返青期(3 月 26 日)开始,温度持续上升,在抽穗期(5 月 8 日)到达第一个高峰,之后温度迅速下降,直到灌浆期(5 月 17 日),随后温度一直上升直到收获。因为在 5 月中旬有部分降雨,造成灌浆期土壤温度有所降低。整个观测期土壤温度的最高峰是在收获期(6 月 7 日),温度最低值是返青期(3 月 26 日)。整个观测期平均温度最高值是 MA 处理(15.63℃),其次是 SA 处理(15.61℃),最低值是 MN 处理(14.42℃)。秸秆还田处理比不还田处理的温度较高,FA、MA、SA 分别比 FN、MN、SN 高 0.37℃、1.21℃、0.06℃。

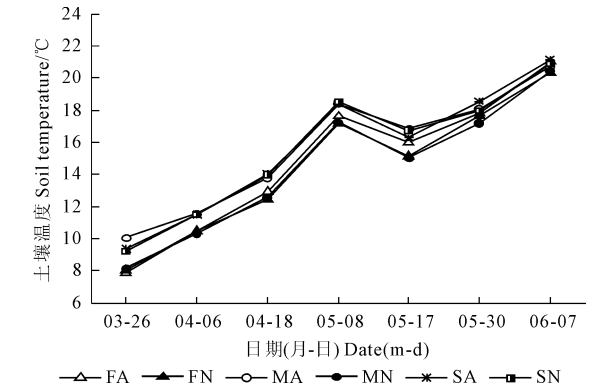


图 2 不同轮作处理对 0~25 cm 土壤平均温度变化的影响
Fig.2 Effects of different rotation modes on average soil temperature in 0~25 cm depth

不同处理土壤温度随土层变化的趋势基本一致(图 3),从 5 cm 到 25 cm 土壤温度逐渐降低。FA、

FN、MA、MN、SA、SN 处理表层 5 cm 平均温度分别是 14.77℃、15.13℃、17.17℃、15.59℃、16.54℃、16.14℃,随着土层加深,处理间土壤温度的差异逐渐变小。从图 3 可以看出,SA 和 SN 处理各土层温度基本一样;MA 和 MN 处理温度变化趋势一致,但 MA 较 MN 处理温度稍高;FA 和 FN 处理在 5 cm 和 10 cm 土层温度差异较小,15~25 cm 土壤温度差异较大,但变化趋势一致。

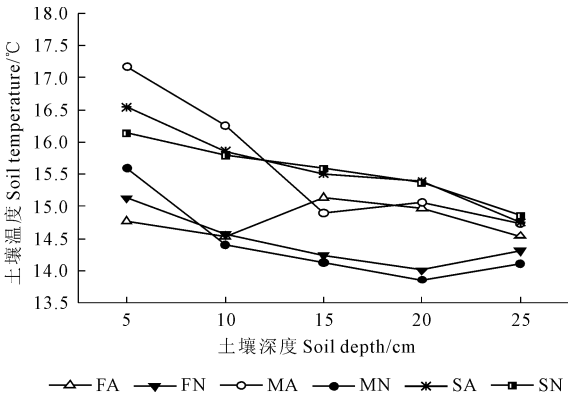


图 3 不同轮作处理土壤平均温度随土层深度的变化
Fig.3 Soil average temperature varied with soil depths under different rotation modes

2.2.2 土壤水分的变化 土壤各层次含水率的变化受降雨和气温的影响较大,尤其是表层土壤。由图 4 可知,6 种处理下农田 0~20 cm 土壤含水率具有相似的变化趋势,返青期(3 月 26 日)土壤含水率较高;随后持续下降,抽穗期(5 月 8 日)到达最低点,在乳熟期(5 月 30 日)出现最高峰值,之后含水率迅速下降。由于所有处理都是在免耕条件下进行,对土壤的物理结构影响较小,使得各处理间 0~20 cm 土壤含水率没有显著差异($P>0.05$),加上秸秆还田起到保水保墒作用^[14],所以秸秆还田处理下土壤含水率高于未还田处理。FA 平均含水率最高,为 13.21%;其次是 MA 13.01%。

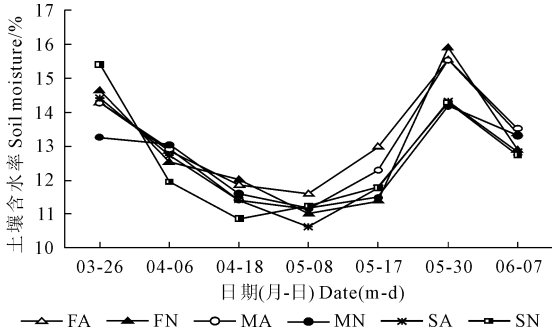


图 4 不同轮作处理对 0~20 cm 土壤平均含水率变化的影响
Fig.4 Effects of different rotation modes on average soil moisture in 0~20 cm depth

0~100 cm 土壤含水率有较大的波动,这主要是由降雨和气温造成的。6 种处理下 0~100 cm 土壤平均含水率变化趋势基本相同(图 5),从返青期(3 月 6 日)开始持续降低,抽穗期(5 月 8 日)到达最低值,之后略有升高。3 月下旬有较多降雨,且气温较低,水分蒸发散失较少,使得返青期(3 月 36 日)土壤含水率最高;5 月份虽然有 40~60 mm 的降雨量,但气温较高,土壤蒸发散失的水分较多,土壤含水率较低。整个观测期各处理间土壤含水率差异不显著($P>0.05$)。秸秆还田处理 0~100 cm 平均土壤含水率较未还田处理稍高,FA 比 FN 高 1.49%,MA 比 MN 高 2.47%,SA 比 SN 高 0.26%。三种轮作模式处理下,冬小麦-夏闲轮作土壤含水率最高,其次是冬小麦-夏玉米轮作,冬小麦-夏大豆轮作含水率最低,由于夏闲地没有种植作物,土壤耗水最少,蓄水保水效果最好。

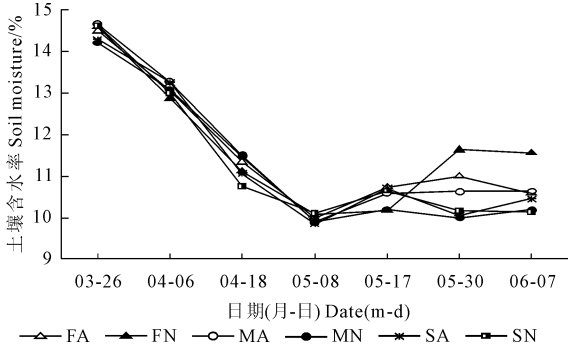


图 5 不同轮作处理对 0~100 cm 土壤平均含水率变化的影响
Fig.5 Effects of different rotation modes on average soil moisture in 0~100 cm depth

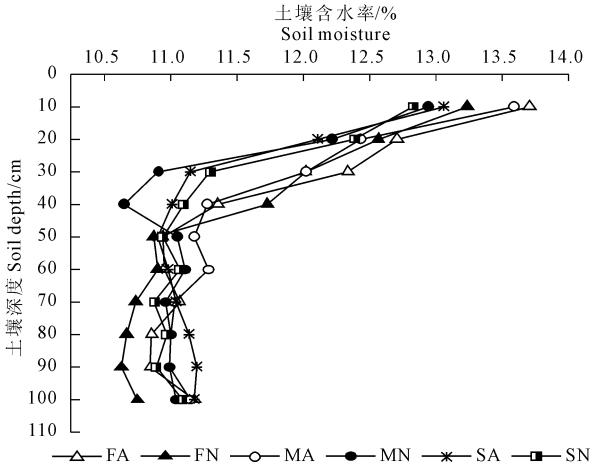


图 6 不同轮作处理土壤平均含水率随土层深度的变化
Fig.6 Soil average moisture varied with soil depths under different rotation modes

由图 6 可知,所有处理整个观测期 0~100 cm 平均土壤含水率随土层深度的变化趋势基本一致,

从 0 ~ 50 cm 平均土壤含水率呈下降趋势,50 ~ 100 cm 含水率比较稳定,波动较小。这主要是由于降雨增加表层土壤的含水率,对深层土壤影响较小。3 种轮作方式秸秆还田处理 0 ~ 10 cm 平均土壤含水率较不还田高,FA 含水率比 FN 高 3.55%,MA 比 MN 高 5.02%,SA 比 SN 高 1.79%,这可能是由于免耕条件下,还田秸秆覆盖在土壤表层,对表层土壤起到保水作用,使得土壤水分蒸发减少,达到蓄水保墒的效果。

2.3 土壤温、湿度与 CO₂ 排放的关系

2.3.1 土壤温度与 CO₂ 排放的关系 许多学者对气体排放和土壤温度之间的相关性进行了研究,认为土壤温度和气体排放之间可以用指数函数、线性函数、二次函数和幂函数等形式进行模拟。本研究采用幂函数进行土壤呼吸模拟。

从 5、10、15、20、25 cm 地温与 CO₂ 排放通量指数模型关系中可以看出(表 2),各土层地温与 CO₂ 排放通量均呈极显著正相关($P < 0.0001$)。冬小麦 - 夏玉米轮作土壤 CO₂ 排放通量在 5 cm 和 10 cm 地温模拟值要高于其它土层模拟值;冬小麦 - 夏大豆轮作土壤 CO₂ 排放通量在 5 cm 模拟值最大,25 cm 模拟值最小,SA 处理土壤 CO₂ 排放通量与土壤温度的相关性随着土层加深逐渐降低;冬小麦 - 夏闲轮作方式土壤 CO₂ 排放通量与土壤温度的相关性没有一定的规律性,FA 处理在 10 cm 土层 CO₂ 排放通量与土壤温度的模拟值最高,FN 处理在 25 cm 土层 CO₂ 排放通量与土壤温度的模拟值最高。在 3 种轮作方式中,秸秆未还田处理地温模拟要好于秸秆还田处理,FN 在未还田处理中的模拟值最小。在秸秆还田处理中,FA 模拟值始终最小。

表 2 不同轮作方式各土层地温与 CO₂ 排放通量关系的模拟

Table 2 Simulation equations between soil temperature in different soil depths and CO ₂ emission flux under different rotation modes						
土层/cm Soil layer	处理 Treatment	幂函数 Power function	R^2	处理 Treatment	幂函数 Power function	R^2
5	FA	$Y = T^{0.7892}$	0.9748 **	FN	$Y = T^{0.6779}$	0.9849 **
	MA	$Y = T^{0.9695}$	0.9929 **	MN	$Y = T^{0.9620}$	0.9946 **
	SA	$Y = T^{0.9055}$	0.9918 **	SN	$Y = T^{0.7964}$	0.9979 **
10	FA	$Y = T^{0.7943}$	0.9756 **	FN	$Y = T^{0.6893}$	0.9859 **
	MA	$Y = T^{0.9890}$	0.9916 **	MN	$Y = T^{0.9913}$	0.9924 **
	SA	$Y = T^{0.9198}$	0.9890 **	SN	$Y = T^{0.8037}$	0.9973 **
15	FA	$Y = T^{0.7822}$	0.9736 **	FN	$Y = T^{0.6954}$	0.9833 **
	MA	$Y = T^{1.0220}$	0.9857 **	MN	$Y = T^{0.9988}$	0.9907 **
	SA	$Y = T^{0.9269}$	0.9886 **	SN	$Y = T^{0.8064}$	0.9979 **
20	FA	$Y = T^{0.7855}$	0.9736 **	FN	$Y = T^{0.7012}$	0.9868 **
	MA	$Y = T^{1.0179}$	0.9868 **	MN	$Y = T^{1.0063}$	0.9894 **
	SA	$Y = T^{0.9296}$	0.9877 **	SN	$Y = T^{0.8111}$	0.9974 **
25	FA	$Y = T^{0.7940}$	0.9715 **	FN	$Y = T^{0.6961}$	0.9898 **
	MA	$Y = T^{1.0260}$	0.9859 **	MN	$Y = T^{0.9989}$	0.9913 **
	SA	$Y = T^{0.9442}$	0.9851 **	SN	$Y = T^{0.8216}$	0.9967 **

注: ** 表示极显著相关($P = 0.01$)。下同。
Note: ** shows extremely significant correlation($P = 0.01$). The same as below.

2.3.2 土壤水分与 CO₂ 排放的关系 从土壤 CO₂ 排放通量与 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层含水率的关系模型中可以看出(表 3),不同处理土壤 CO₂ 排放通量与 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土壤含水率均呈极显著正相关($P < 0.0001$)。冬小麦 - 夏闲和冬小麦 - 夏大豆轮作方式秸秆还田处理土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率的相关性均高于秸秆未还田处理。冬小麦 - 夏玉米轮作和冬小麦 - 夏闲轮作土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率在 0 ~ 10 cm 模拟值好于 10 ~ 20 cm;冬小麦 - 夏大豆轮作土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率

在 10 ~ 20 cm 土层模拟值要好于 0 ~ 10 cm 的模拟。
2.4 不同处理对土壤碳、氮含量的影响
2.4.1 土壤有机碳的变化 由图 7 可知,土壤有机碳含量从 0 ~ 100 cm 呈先降低再升高趋势,且所有处理变化趋势一致。各处理土壤有机碳含量冬小麦收获后均比播种前高。有机碳含量最高的是 0 ~ 10 cm,冬小麦收获后 FA、FN、MA、MN、SA、SN 处理 0 ~ 10 cm 土壤有机碳含量分别较播种前提高 49.14%、43.41%、14.43%、24.52%、45.76%、32.29%,0 ~ 100 cm 平均有机碳含量分别较播种前提高 1.54、

1.60、1.26、1.47、1.51、1.58 g·kg⁻¹, FA、FN 增加最大,其次是 SA、SN, MA、MN 增加最小。这主要是由于夏闲处理对土壤结构的破坏最小,有机碳氧化分解较少,且夏闲期在土壤表层散落部分杂草秸秆,随降雨和微生物活动逐渐分解,使有机碳含量增加^[5]。

表 3 不同轮作方式 0~20 cm 土壤含水率与 CO₂ 排放通量关系的模拟

Table 3 Simulation equations between soil moisture in 0~20 depth and CO₂ emission flux under different rotation modes

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	幂函数 Power function	R ²
0~10	FA	$Y = M^{0.8082}$	0.9833 **
	FN	$Y = M^{0.7060}$	0.9765 **
	MA	$Y = M^{1.0546}$	0.9940 **
	MN	$Y = M^{1.0256}$	0.9961 **
	SA	$Y = M^{0.9873}$	0.9971 **
	SN	$Y = M^{0.8605}$	0.9883 **
10~20	FA	$Y = M^{0.8324}$	0.9836 **
	FN	$Y = M^{0.7191}$	0.9729 **
	MA	$Y = M^{1.0924}$	0.9958 **
	MN	$Y = M^{1.0486}$	0.9943 **
	SA	$Y = M^{1.0167}$	0.9977 **
	SN	$Y = M^{0.8716}$	0.9902 **

2.4.2 土壤碱解氮的变化 从图 8 可以看出,所有处理冬小麦收获后平均碱解氮含量均比播种前高,且 0~40 cm 各土层碱解氮含量均增加。碱解氮含量最高的是 0~10 cm 土层,冬小麦收获后 FA、FN、MA、MN、SA、SN 处理 0~10 cm 碱解氮含量分别较播种前提高 64.05、47.43、53.38、42.00、67.03、64.75 mg·kg⁻¹,且秸秆还田处理较未还田处理增加值高。FA、FN、MA、MN、SA、SN 处理冬小麦收获后 0~40 cm 土层平均碱解氮含量分别是 46.99、52.19、47.99、44.63、59.81、54.25 mg·kg⁻¹,与播种前相比,SA、SN 增加量最大,分别增加 53.51、46.99 mg·kg⁻¹,其次是 FA、FN,增加量分别为 40.78、45.02 mg·kg⁻¹,MA、MN 增加量最小,分别增加 40.87 和 36.75 mg·kg⁻¹。

2.5 小麦成熟性状调查和产量分析

从表 4 可以看出,不同处理对冬小麦成熟期有效穗数、穗粒数、千粒重和产量的影响差异较大。有效穗数表现为 SN>SA>FN>FA>MN>MA,各处理间差异显著。不同处理冬小麦穗粒数差异达到极显著水平。冬小麦千粒重最大的是 MA,为 41.72 g·千粒⁻¹。6 个处理冬小麦产量无显著差异,产量最高的是 FA,为 7 833.3 kg·hm⁻²,产量最低的是 SN,为 6 166.7 kg·hm⁻²。

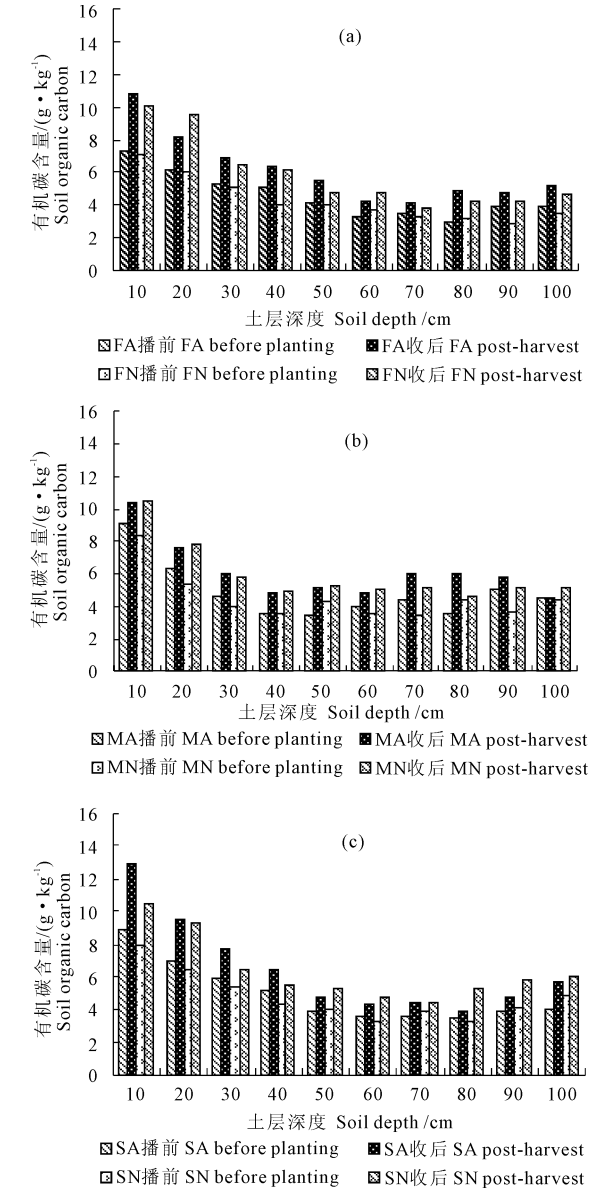


图 7 不同处理播种前和收获后土壤有机碳的变化
Fig.7 Soil organic carbon varied with soil depths before planting and after harvesting

表 4 不同处理对冬小麦产量性状的影响

处理 Treatment	有效穗数 Spike number /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernels weight /g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
FA	640.67ab	42.37ab	41.49ab	7833.3 ± 600.9a
FN	661.67ab	42.20ab	40.30b	6333.3 ± 1013.8a
MA	575.00b	46.60a	41.72a	7166.7 ± 166.7a
MN	623.67b	45.60a	40.16b	7166.7 ± 440.9a
SA	719.67a	38.60b	40.69ab	7666.7 ± 440.9a
SN	723.00a	38.63b	40.95ab	6166.7 ± 833.3a

注:同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Note: Different small letters in the same column denote significant difference at 0.05 level.

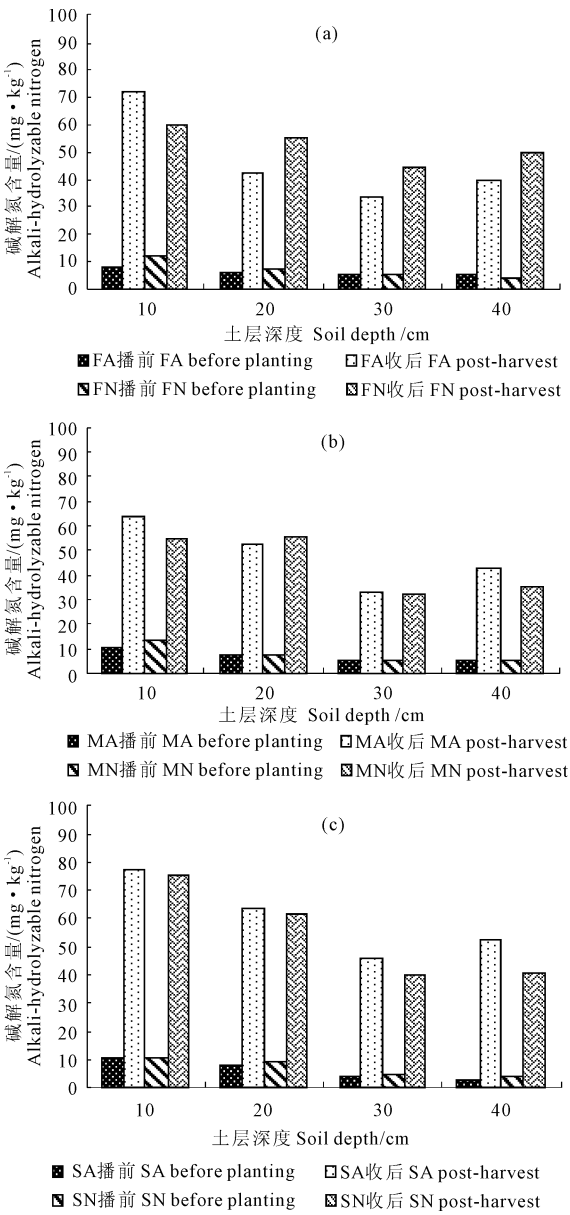


图 8 不同处理播种前和收获后土壤碱解氮的变化
Fig.8 Soil alkali-hydrolyzable nitrogen varied with soil depths before planting and after harvesting

3 讨 论

3.1 不同轮作方式秸秆还田对土壤 CO₂ 排放的影响

本研究中冬小麦-夏玉米轮作土壤 CO₂ 排放量最大,其次是冬小麦-夏大豆,冬小麦-夏闲 CO₂ 排放量最小。这可能与前茬作物的施肥水平不同有关,高会议等^[13]研究认为施肥显著影响土壤呼吸速率,且土壤呼吸速率(以 CO₂ 排放量计算)随施肥量增多而增强^[12]。本研究中秸秆还田处理显著增加土壤 CO₂ 排放量,这与于爱忠^[15]和李玮^[16]等研究秸秆覆盖能增加土壤碳排放相一致,这主要是由于秸秆还田后,秸秆腐烂分解为微生物提供丰富的碳

源,促进微生物生长活动和繁殖,同时加大了有机质的分解速率,增加土壤 CO₂ 排放量^[13]。

3.2 土壤温、湿度对土壤 CO₂ 排放的影响

农田土壤呼吸受很多因子的影响,土壤温度和湿度是影响土壤呼吸的两个主要因子^[15]。郝旺林等^[17]研究认为土壤温度对土壤呼吸的直接作用最大。本研究采用幂函数模拟土壤温度与 CO₂ 排放的关系,各处理 5、10、15、20、25 cm 地温与 CO₂ 排放通量均呈极显著的正相关关系。在三种轮作方式中,冬小麦-夏玉米轮作土壤 CO₂ 排放通量在 5 cm 和 10 cm 地温模拟值要高于其它土层模拟值;冬小麦-夏大豆轮作土壤 CO₂ 排放通量在 5 cm 模拟值最大,这与以往研究结果相一致^[9-10]。很多野外测量结果表明,土壤湿度只有在最低或最高的情况下才会抑制土壤 CO₂ 通量^[18]。CO₂ 通量和土壤含水量的关系非常复杂,它们之间的关系被描述为线性、二次方、抛物线、指数和双曲线方程。本研究采用幂函数模拟 0~10、10~20 cm 土壤含水率与 CO₂ 排放通量的关系,均呈极显著正相关。说明土壤含水率对 CO₂ 排放有极其重要的作用^[5,14]。

3.3 不同轮作方式秸秆还田对土壤碳、氮的影响

有研究指出,免耕对土壤有机碳积累的促进作用仅发生在表层土壤^[19]。Boddey 等人^[20]对巴西不同地区长期定位实验点的观测数据分析表明,免耕对土壤有机碳积累的促进作用可深达 100 cm 土层。本研究各处理冬小麦收获后 0~100 cm 平均土壤有机碳含量均比播种前高,且各土层有机碳含量均增加,这与 Boddey 等人的研究结果相一致。FA、FN 处理有机碳增加幅度最大,这主要是由于夏闲处理对土壤结构的破坏最小,有机碳氧化分解较少^[5]。

所有处理冬小麦收获后碱解氮含量均比播种前高,且 0~40 cm 各土层碱解氮含量均增加。这是因为土壤表层的作物残茬及还田秸秆在适宜的温、湿度条件下腐烂分解,使土壤腐殖化系数相应提高,增加了氮素积累^[21],起到了暂时增加氮素的作用。由于氮素的淋溶作用,使部分表层土壤氮素转移到深层土壤,使得深层土壤氮素含量增加。冬小麦收获后 0~40 cm 土层平均碱解氮含量与播种前相比,SA、SN 增加量最大,其次是 FA、FN,MA、MN 增加量最小。这可能是由于不同轮作方式下土壤对氮肥和作物残茬中含氮物质的转化效率不同。0~10 cm 土层碱解氮含量最高,秸秆还田处理较未还田处理 0~10 cm 土层碱解氮含量增加幅度大,这是由于还田秸秆中含有大量氮素,且秸秆大多都分布在土壤表层,秸秆腐烂分解后,氮素就分布在表层土壤。

4 结 论

1) 三种轮作方式秸秆还田冬小麦土壤 CO₂ 排放规律基本一致,均随生育期呈先增加后降低的趋势。整个生长季,平均 CO₂ 排放通量表现为 MA > MN > SA > SN > FA > FN。冬小麦-夏玉米轮作方式 CO₂ 排放通量最大,其次是冬小麦-夏大豆,冬小麦-夏闲 CO₂ 排放量最小;秸秆还田可显著增加 CO₂ 排放量。

2) 各处理土壤温度随时间的变化呈先上升后下降再上升趋势。整个观测期土壤温度的最低值和最高值分别是在返青期和收获期,秸秆还田处理较不还田处理的温度高。不同处理土壤温度从 5 cm 到 25 cm 逐渐降低。6 种处理下农田 0~20 cm 土壤含水率具有相似的变化趋势,从返青期开始土壤含水率持续降低直至抽穗期,在乳熟期出现最高值。0~100 cm 平均土壤含水率在返青期出现最高值,抽穗期出现最低值。

3) 不同处理土壤 CO₂ 排放通量与 0~10、10~20 cm 土壤含水率及与 5、10、15、20、25 cm 地温均呈极显著正相关关系。在三种轮作方式中,秸秆未还田处理地温模拟要好于秸秆还田处理。

4) 各处理冬小麦收获后土壤有机碳含量均比播种前高,有机碳含量最高的是 0~10 cm。FA、FN 处理有机碳增加最大,其次是 SA、SN 处理,MA、MN 增加幅度最小。

5) 所有处理冬小麦收获后碱解氮含量均比播种前高,SA、SN 增加量最大,其次是 FA、FN,MA、MN 增加量最小。

6) 6 个处理冬小麦产量无显著差异,产量最高的是 SN,最低的是 MA,其它处理产量表现为 MN > SA > FA > FN。

参 考 文 献:

[1] Canadell J G, Le Quéré C, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 18866-18870.

[2] Le Quéré C, Raupach M R, Canadell J G, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide[J]. Nature Geosciences, 2009, 2: 831-836.

[3] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 70: 103-116.

[4] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20: 229-236.

[5] 张俊丽, Tanveer S K, 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: 192-199.

[6] 江晓东, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 少免耕模式对土壤呼吸的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23: 253-256.

[7] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, et al. Soil temperature and moisture sensitivities of CO₂ efflux before and after tillage in wheat field of Loess Plateau, China[J]. Journal of Environment Sciences, 2011, 23: 79-86.

[8] Philip J B, James R F, Jeff M N, et al. Soil CO₂ flux from a Norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90: 205-211.

[9] 孟凡乔, 桂桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 2006, 26: 992-999.

[10] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应[J]. 生态学报, 2004, 24: 2649-2655.

[11] 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: 778-785.

[12] 吕佩毓, 柴 强. 不同施氮水平对玉米生长季土壤呼吸的影响[J]. 草业科学, 2011, 28: 1919-1923.

[13] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J]. 生态学报, 2009, 29: 2551-2559.

[14] 张 宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO₂ 排放影响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25: 47-53.

[15] 于爱忠, 黄高宝, 柴 强. 不同耕作措施对西北绿洲灌区冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 草业学报, 2012, 21: 273-278.

[16] 李 玮, 张佳宝, 张丛志. 秸秆还田方式和氮肥类型对黄淮海平原夏玉米土壤呼吸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20: 842-849.

[17] 郝旺林, 梁银丽, 吴 兴, 等. 不同茬冬小麦土壤呼吸特征及其影响因子分析[J]. 环境科学, 2011, 32: 3167-3173.

[18] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32: 719-733.

[19] Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment[J]. Soil Sci Soc Am J, 2008, 72: 693-701.

[20] Boddey R M, Jantalian C P, Conceic P C, et al. Carbon accumulation at depth in ferralsols under zero-till subtropical agriculture[J]. Glob Change Biol, 2010, 16: 784-795.

[21] 王立刚, 邱建军, 马永良, 等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(6): 15-19.