

# 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO<sub>2</sub> 排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系

秦 越<sup>1,2</sup>, 李彬彬<sup>1</sup>, 武兰芳<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态网络观测与模拟重点实验室禹城试验站, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**田间定位试验开始于 2008 年,共设置秸秆还田翻耕(CT+),无秸秆翻耕(CT-),秸秆还田免耕(NT+)和无秸秆免耕(NT-)四个处理。利用静态箱—气相色谱法,测定分析了 2010—2011 年度和 2012—2013 年度两个小麦生长季内土壤 CO<sub>2</sub> 排放、土壤 DOC 含量及土壤有机质含量的动态变化。结果表明:两个小麦生长季内土壤 CO<sub>2</sub> 排放规律基本一致,从当年小麦出苗到越冬土壤 CO<sub>2</sub> 排放量下降,第二年小麦返青后,土壤 CO<sub>2</sub> 排放量开始上升,到开花期达到排放高峰,其后开始下降直至小麦成熟。各处理 2010—2011 年、2012—2013 年度土壤 CO<sub>2</sub> 平均排放通量分别为:CT+246.44、273.94 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,CT-183.54、212.57 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,NT+188.41、200.06 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,NT-179.66、179.10 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。土壤 DOC 含量的动态变化表现为在一定范围内上下波动,各处理 2010—2011 年、2012—2013 年度土壤 DOC 平均含量分别为:CT+0.601、0.467 g·kg<sup>-1</sup>;CT-0.530、0.377 g·kg<sup>-1</sup>;NT+0.621、0.544 g·kg<sup>-1</sup>;NT-0.528、0.402 g·kg<sup>-1</sup>。方差分析表明,秸秆还田能增加土壤 CO<sub>2</sub> 排放、DOC 含量和有机质含量;翻耕能增加土壤 CO<sub>2</sub> 排放,对 DOC 含量和有机质含量无显著影响;免耕减少土壤 CO<sub>2</sub> 排放,对 DOC 含量无显著影响,能增加土壤有机质含量。相关分析表明,土壤 CO<sub>2</sub> 排放与 DOC 含量动态变化没有显著相关关系,土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量与土壤有机质含量正相关,DOC 含量和土壤有机质含量无明显相关关系。

**关键词:**秸秆还田;CO<sub>2</sub> 排放;溶解性有机碳;耕作措施

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)07-1442-08 doi:10.11654/jaes.2014.07.027

## Dynamics and Interrelationship of CO<sub>2</sub> Emissions and Dissolved Organic Carbon in Soils with Crop Residue Retention Under Different Tillage Practices

QIN Yue<sup>1,2</sup>, LI Bin-bin<sup>1</sup>, WU Lan-fang<sup>1\*</sup>

(1.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Crop residue retention in soils usually enhances organic matter accumulation but may also increase CO<sub>2</sub> emissions from soils. A long-term experiment was started in 2008. Four treatments were designed: plowing with residue retention (CT+), plowing with residue removed (CT-), no tillage with residue retention (NT+) and no-tillage with residue removed (NT-). Emissions of CO<sub>2</sub> from soils were evaluated by closed static chamber-gas chromatography method. Dissolved organic carbon (DOC) was measured during 2010—2011 and 2012—2013 wheat seasons. The CO<sub>2</sub> emissions decreased from the sprout to the wintering stage, then increased from turning green stage, and reached peak values at flowering stage. The CO<sub>2</sub> emissions in 2010—2011 and 2012—2013 wheat seasons were CT+: 273.94 and 246.44 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; CT-: 212.57 and 183.54 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; NT+: 188.41 and 200.06 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; and NT-: 179.66 and 179.10 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, respectively. During 2010—2011 and 2012—2013 wheat season, the average concentrations of DOC were CT+: 0.601 and 0.467 g·kg<sup>-1</sup>; CT-: 0.530 and 0.377 g·kg<sup>-1</sup>; NT+: 0.621 and 0.544 g·kg<sup>-1</sup>; and NT-: 0.528 and 0.402 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. Crop residue retention significantly increased CO<sub>2</sub> emissions, DOC and soil organic matter. Tillage significantly increased CO<sub>2</sub> emission but had no effects on DOC and organic matter. No-tillage significantly decreased CO<sub>2</sub> emissions and increased organic matter concentrations, but did not influence DOC. There was no significant correlation between CO<sub>2</sub> emission and DOC. However, CO<sub>2</sub> emissions and contents of organic matter were positively correlated. The concentrations of DOC and organic matter were not significantly correlated.

**Keywords:** crop residues retention; CO<sub>2</sub> emission; dissolved organic carbon; tillage practice

收稿日期:2013-11-10

基金项目:国家自然科学基金(31271675);国家科技支撑计划课题(2013BAD05B03)

作者简介:秦 越(1989—),女,内蒙古包头人,在读硕士研究生,主要从事农田温室气体排放研究。E-mail:qinyue0923@gmail.com

\*通信作者:武兰芳 E-mail:wulf@igsnrr.ac.cn

CO<sub>2</sub>是最重要的温室气体,其对全球变暖的贡献率为60%<sup>[1]</sup>。据估计,大气中每年有5%~20%的CO<sub>2</sub>来源于土壤呼吸<sup>[2-3]</sup>,农田生态系统是陆地生态系统的主要组成部分,农业生产是CO<sub>2</sub>等温室气体重要的排放源,据估算,农业生产对温室气体排放的贡献率约为20%<sup>[4]</sup>。农田土壤呼吸主要包括植物根系呼吸、土壤动物呼吸、土壤微生物呼吸以及含碳物质化学氧化作用<sup>[5]</sup>。影响农田土壤CO<sub>2</sub>排放的因素众多,温度、水分、施肥、秸秆还田、耕作措施、作物类型以及种植方式等均会影响CO<sub>2</sub>的排放<sup>[3]</sup>,其中耕作措施和秸秆还田是两个最重要的人为因素。

土壤溶解性有机质(DOM)是指能通过0.45 μm有机微孔滤膜、大小不等、结构不同、能溶于水或稀酸稀盐溶液的有机物的连续体或混合体<sup>[6]</sup>,是土壤有机质中最活跃的组成部分。溶解性有机质包括溶解性有机碳(DOC)、溶解性有机氮(DON)、溶解性有机磷(DOP)及溶解性有机硫(DOS),农田土壤中以DOC和DON为主。一些学者认为,外源有机物料的加入和土壤腐殖质的淋溶及降解过程是溶解性有机质形成的主要途径。McDowell等<sup>[7]</sup>指出,森林土壤中DOM的形成主要以腐殖质的淋溶(物理过程)及微生物分解(生物化学过程)为主;Qualls等<sup>[8]</sup>发现在落叶林生态系统中可溶性有机物的最大流量出现在森林地面的枯枝落叶层。土壤中溶解性有机质主要有两种去向:其一是被土壤微生物降解成为CO<sub>2</sub>或者同化为生物体组分<sup>[9]</sup>,据研究表明DOC中可生物降解的组分占10%~40%<sup>[10]</sup>;其二是通过吸附、络合、螯合、絮凝、沉淀等物理化学作用转化为非溶解性有机质<sup>[6,11]</sup>,这些物理化学过程的发生决定了溶解性有机质在土壤中的动态变化。土壤质地、有机质含量、pH值以及离子强度等土壤自身性质对溶解性有机质有重要影响,同时外界环境条件如温度、湿度、植被类型和农田土壤管理措施等对溶解性有机质也会产生影响<sup>[12-16]</sup>。

秸秆还田是有机碳归还农田的一项重要农作措施。还田的秸秆在其腐解过程中,一部分经微生物分解后直接以CO<sub>2</sub>形式排放到大气中,另一部分则通过微生物的降解作用进入土壤中,其中可溶性的小分子物质成为溶解性有机质的补充源,另外一些难以直接被利用的大分子物质成为土壤有机质的潜在来源。土壤中可被微生物直接利用的有效碳源是DOC,因此土壤中DOC含量与CO<sub>2</sub>的产生与排放密切相关。虽然国内外已开展一些秸秆还田结合不同耕作措施对土壤CO<sub>2</sub>排放和有机质影响的研究,但我国华北平原

以小麦/玉米一年两熟种植为主,籽粒产量较高,秸秆还田量较多,多年连续秸秆直接还田的固碳减排效应仍然需要进一步研究。本研究旨在通过田间定位试验研究不同耕作措施下秸秆还田土壤CO<sub>2</sub>排放规律、土壤DOC含量、土壤有机质含量变化及其相关关系,为作物秸秆还田促进固碳减排提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

田间定位试验始于2008年10月,在中国科学院禹城综合试验站进行,位于东经116°36',北纬36°57',地貌类型为冲积平原,属暖温带半湿润季风气候,年均气温13.1℃,年均降水量538.0 mm,降水量主要集中在6—8月。土壤以潮土为主,试验前0~20 cm土壤养分状况为:有机质12.2 g·kg<sup>-1</sup>,全氮0.8 g·kg<sup>-1</sup>,全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)2.06 g·kg<sup>-1</sup>,全钾(K<sub>2</sub>O)22.9 g·kg<sup>-1</sup>,pH8.4。种植制度为小麦/玉米一年两熟种植,小麦在每年10月15日左右播种、6月10日左右成熟收获,玉米在当年小麦收获后随即进行播种,当年10月上旬成熟收获。

### 1.2 试验设计

试验共设置4个处理即秸秆还田翻耕、无秸秆翻耕,秸秆还田免耕、无秸秆免耕,分别用CT+、CT-、NT+和NT-代表,每个处理3次重复。处理采用田间小区试验,小区面积为6.25 m<sup>2</sup>,小区与小区之间用厚12 cm、深60 cm的水泥隔板分隔,各小区在田间随机排列。秸秆还田量为每个小区上一生长季作物收获籽粒后所有根、茎、叶的总量。秸秆在还田时切成20 cm左右的小段,均匀撒在地表,翻耕措施下秸秆被翻埋在耕层中与土壤混合,免耕措施即保留在地表。小麦播种采用人工开沟撒种,行距20 cm;播种的同时在两行小麦中间开沟施入底肥,沟深3~5 cm。玉米人工点播,不施底肥。小麦生育期内其他的农作管理措施,如浇水、追肥、除草、病虫害防治等均与当地大田相同。

### 1.3 测定项目和测定方法

土壤温室气体采集方法:采用静态箱法采集。采样箱以PVC材料制作,底面积78.5 cm<sup>2</sup>,高度为25 cm。在播种前将不锈钢底座插入土壤中,每次采样前先清除底座内的作物和杂草。采样时将采样箱放置于底座上,底座外围的凹槽用水密封。采样箱内装有温度传感器,用以测量采样时间内箱内温度变化。观测时间为20 min,每间隔5 min用医用注射针管抽取采样箱内气体,抽取完毕后以三通阀密闭针管保存

气体。分别在2010年11月至2011年6月及2012年11月至2013年6月两个小麦生长季内进行了采集测定。小麦越冬期(12月中旬至来年3月)内只采集测定一次,其他生育期内采样频率为每周一次。每次采样从9点开始,11点结束,严格记录采样的准确时间,这个时间段是目前比较通用的采样时间段,选择上午可以避免高温的影响,对日平均值的估算有较好的代表性<sup>[17]</sup>。

气体测定方法:采集的气体样品立即带回室内测定CO<sub>2</sub>浓度。CO<sub>2</sub>浓度用安捷伦4890气相色谱仪进行分析,CO<sub>2</sub>检测器为离子火焰化检测器(FID)。

计算方法:气体通量表示单位时间、单位面积观测箱内该气体质量的变化,其计算公式为:

$$F=M/V_0 \times P/P_0 \times T_0/T \times H \times dC_i/dt$$

式中: $F$ 为土壤气体通量(CO<sub>2</sub>通量单位为mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>); $M$ 为气体的摩尔质量,g·mol<sup>-1</sup>;  $V_0$ 为标准状态下(温度273 K,气压1013 kPa)气体摩尔体积,22.41 L·mol<sup>-1</sup>;  $T_0$ 和  $P_0$ 分别为标准状态下空气的绝对温度和气压; $P$ 为采样点气压; $T$ 为采样时的绝对温度; $dC_i/dt$ 为观测时间内箱内气体浓度随时间变化的直线斜率,正值表示排放,负值表示吸收; $H$ 为采样箱的高度。

土壤DOC含量的测定:每次采集气体的同时采集0~20 cm土壤,每个小区采集5个点的土样进行混合,捡取作物残留物和小石子后,过2 mm筛,保存在4℃冰箱内备用。DOC的提取采用1:5水土比法<sup>[18]</sup>,称取10 g鲜土,用50 mL去离子水溶解后振荡30 min,4000 r·min<sup>-1</sup>离心20 min,然后上清液过0.45 μm滤膜,提取的滤液即为DOC溶液,DOC含量用TOC仪测定,DOC含量的测定在浸提后一周内完成。

土壤有机质含量的测定:土壤有机质测定采用重

铬酸钾氧化—外加热法(GB 7857—1987)。

#### 1.4 数据处理及分析

数据用SPSS20.0进行统计分析,其中不同处理CO<sub>2</sub>排放通量及DOC含量均值采用单因素方差分析进行比较。CO<sub>2</sub>排放通量与DOC含量、CO<sub>2</sub>排放通量与土壤有机质含量、土壤有机质含量与DOC含量的相关性分析采用二元变量相关分析方法。采用内插法和数值积分法对整个小麦生育期内CO<sub>2</sub>累积排放量进行估算<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理土壤CO<sub>2</sub>排放通量的动态变化

小麦生长季(从出苗到成熟)内土壤CO<sub>2</sub>排放通量的动态变化如图1所示。2010—2011和2012—2013年度两个小麦生长季内各处理CO<sub>2</sub>排放通量的变化趋势总体上基本一致:从出苗后到越冬前的一段时间内呈下降趋势,返青后开始增加,到抽穗开花期达到高峰,其后开始下降。

不同处理冬小麦土壤CO<sub>2</sub>排放平均通量和整个生育期累积排放量如表1所示。

表1 小麦生长季CO<sub>2</sub>排放平均通量和累积排放量

Table 1 Average flux and cumulative amount of CO<sub>2</sub> emissions during winter-wheat season

| 项目  | 2010—2011 年                                  |                               | 2012—2013 年                                  |                               |
|-----|----------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|
|     | 平均通量/<br>mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> | 累积排放量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> | 平均通量/<br>mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> | 累积排放量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> |
| CT+ | 273.94b                                      | 10 941.82c                    | 246.44c                                      | 9 641.44c                     |
| CT- | 212.57a                                      | 8 776.16b                     | 183.54a                                      | 6 944.79a                     |
| NT+ | 188.41a                                      | 7 124.16a                     | 200.06b                                      | 7 526.36b                     |
| NT- | 179.66a                                      | 7 001.20a                     | 179.10a                                      | 7 242.57b                     |

注:同一列不同字母表示在5%水平上差异显著。

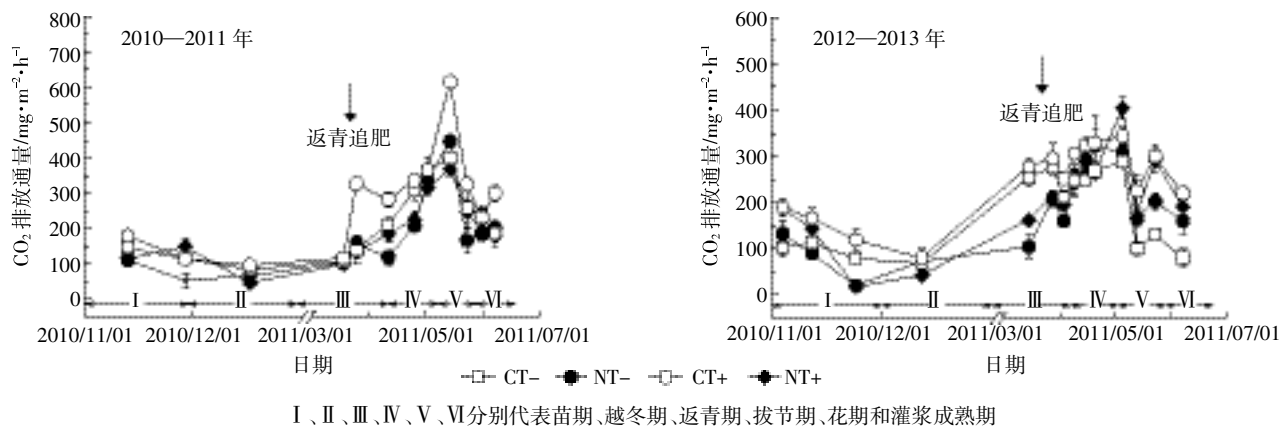


图1 CO<sub>2</sub>排放通量动态变化

Figure 1 Dynamic changes of CO<sub>2</sub> emissions from soils over time

方差分析结果表明,无论在翻耕还是免耕条件下,秸秆还田处理 CO<sub>2</sub> 排放平均通量均大于秸秆不还田处理,这说明秸秆还田能够显著促进土壤 CO<sub>2</sub> 排放。无论秸秆还田与否,翻耕处理 CO<sub>2</sub> 排放平均通量均大于免耕处理,在秸秆还田条件下,翻耕与免耕处理差异显著,在无秸秆还田条件下,翻耕与免耕处理 CO<sub>2</sub> 排放平均通量差异不显著,因此本试验不能完全确定翻耕和免耕对于 CO<sub>2</sub> 排放的作用结果。但已有较多的研究表明,免耕对土壤 CO<sub>2</sub> 排放存在着抑制作用。

## 2.2 不同处理土壤溶解性有机碳(DOC)的变化

各处理 2010—2011、2012—2013 年度小麦季 DOC 含量动态变化如图 2 所示。出苗后至越冬前,各处理 DOC 含量呈先下降后上升趋势,其中 CT- 处理变化幅度较小,其他处理变化幅度很大。返青至拔节这段时期,各处理 DOC 含量均大幅度减少。拔节至收获期,各处理土壤 DOC 含量在一定范围内变化,但均在花期(5月上旬)处于整个生育期内最低水平。

不同处理土壤 DOC 平均含量如图 3 所示。秸秆还田处理土壤 DOC 含量显著高于秸秆不还田处理,说明秸秆还田可以增加土壤 DOC 含量,而耕作方式

对土壤 DOC 含量则无显著影响。2010—2011 小麦季各处理 DOC 平均含量顺序为 NT+>CT+>CT->NT-, 2012—2013 小麦季各处理 DOC 平均含量顺序为 NT+>CT+>NT->CT-。2010—2011 年小麦季各处理 DOC 含量高于 2012—2013 年度小麦季,与 2010—2011 年度小麦生育期内较多降水有关。

## 2.3 土壤 CO<sub>2</sub> 排放与 DOC 含量的关系

土壤溶解性有机碳是可以被微生物直接利用的有效碳源,因此其含量高低对土壤 CO<sub>2</sub> 的排放有着重要影响。从两季小麦生育期内土壤 CO<sub>2</sub> 排放与 DOC 含量的动态变化曲线可知,在播种至越冬前这段时期,土壤 CO<sub>2</sub> 排放动态变化与土壤 DOC 含量动态变化基本一致,均表现为下降趋势。土壤中的 DOC,一方面通过微生物的异氧呼吸作用被消耗,另一方面通过外源有机物料的腐解及土壤自身腐殖质的降解过程进行补充。这段时期,随着温度下降,土壤微生物数量及活性降低,使得土壤呼吸作用减少,同时也使 DOC 的补充过程减缓,因此二者同时表现为下降趋势。越冬期,土壤 CO<sub>2</sub> 排放量处于整个生育期内最低的水平而且变化幅度很小,但这段时期土壤 DOC 含量出现较大幅度的增长,这可能是由于土壤呼吸作用的减弱,使得微生物对 DOC 的消耗减少,导致土壤中 DOC 逐渐累积。小麦返青至拔节期,土壤 CO<sub>2</sub> 排放呈上升趋势,土壤 DOC 含量表现为下降趋势,这段时期随着温度回升土壤呼吸作用逐渐变强,DOC 作为可直接被微生物利用的碳源,在这段时期内被大量分解,因此土壤 DOC 含量表现出与 CO<sub>2</sub> 排放通量相反的动态变化。拔节至花期,CO<sub>2</sub> 排放通量呈上升趋势,土壤 DOC 含量则表现为在一定范围内变动,由于 DOC 在土壤中始终处于动态的吸附-解吸平衡过程,当 DOC 被大量消耗时,处于吸附

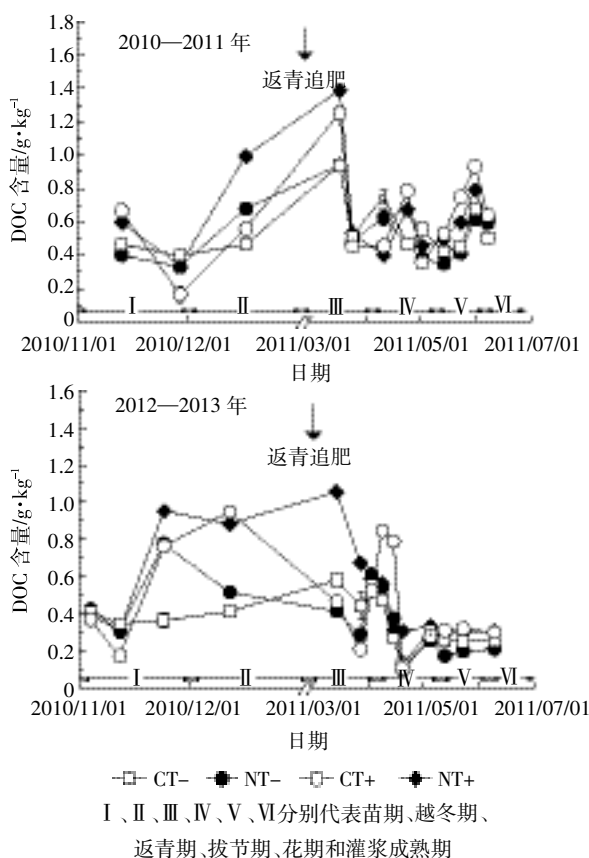


图 2 DOC 含量动态变化

Figure 2 Dynamic changes of DOC concentrations in soils over time

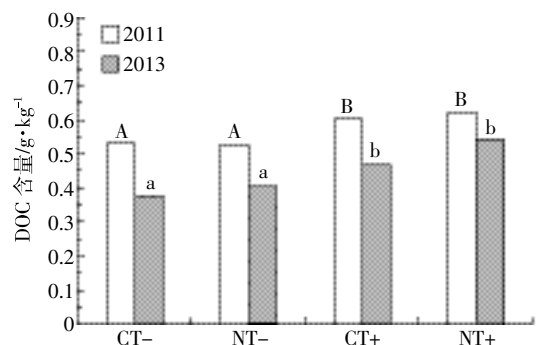


图 3 DOC 含量平均值

同一年 4 个处理的柱型上方不同字母表示在 5% 水平上差异显著

Figure 3 Average concentrations of DOC in soils

态的 DOC 会进入土壤中补充,总体来说,这段时期内 DOC 由于呼吸作用消耗的量要大于其补充的量。因此,在  $\text{CO}_2$  排放最旺盛的花期,DOC 含量处于低谷值。从花期至收获期, $\text{CO}_2$  排放通量趋于平稳,DOC 含量动态变化也较平稳。

对  $\text{CO}_2$  排放量和 DOC 含量的相关分析表明,二者没有显著相关关系。 $\text{CO}_2$  排放是土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸、植物根系呼吸以及含碳物质的化学氧化综合作用的结果,据相关研究表明,土壤呼吸释放的  $\text{CO}_2$  中 30%~50% 来自根系的活动或自养呼吸作用,其余部分源于土壤微生物对有机质的分解作用。DOC 是可以被微生物直接利用的碳源,其含量的高低决定了微生物呼吸底物的浓度,但由于植物根系呼吸及自养呼吸作用的影响,土壤 DOC 含量的变化并不能直接地表现在土壤  $\text{CO}_2$  排放量上。另外,土壤中 DOC 的补充途径较多,土壤自身腐殖质的转化、土壤微生物代谢产物、外源性有机物加入都会对土壤 DOC 含量产生一定影响。因此,在作物的整个生育期内土壤 DOC 含量与  $\text{CO}_2$  排放量未表现出同步的动态变化。土壤  $\text{CO}_2$  排放量与 DOC 含量相关分析结果见表 2。

表 2  $\text{CO}_2$  排放量与 DOC 含量相关系数

Table 2 Correlations between  $\text{CO}_2$  emissions and DOC contents

| 项目  | 2010—2011 年 | 2012—2013 年 |
|-----|-------------|-------------|
| CT- | 0.083       | -0.060      |
| CT+ | 0.071       | 0.062       |
| NT- | -0.285      | -0.310      |
| NT+ | -0.251      | -0.267      |

## 2.4 还田秸秆分解比例的估算

假设秸秆还田和无秸秆处理其  $\text{CO}_2$  排放量差异只由还田秸秆量决定,通过计算秸秆还田处理与无秸秆处理的  $\text{CO}_2$  累计排放量差值,与秸秆添加量进行比较,估算出了还田秸秆在腐解过程中以  $\text{CO}_2$  形式散失的比例。计算结果表明,翻耕处理还田的秸秆在小麦生育期内有 40.8%~47.1% 以  $\text{CO}_2$  的形式分解掉了,免耕这一比例则小得多,仅为 1.7%~4.1%。这可能是由于翻耕措施下秸秆被翻埋在土壤中,与土壤中微生物接触充分,被分解的比例更大,而免耕措施下秸秆是直接覆盖在地表,因此分解缓慢而且分解率较低。从秸秆分解比例和  $\text{CO}_2$  排放总量来看,秸秆还田后,翻耕处理中由秸秆腐解产生的  $\text{CO}_2$  占总量的 43%,免耕处理中由秸秆腐解产生的  $\text{CO}_2$  量占总量的 3.7%。

秸秆还田处理在 2010—2011、2012—2013 年度秸秆添加量如表 3 所示。

表 3 秸秆还田量( $\text{kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Table 3 Quantity of crop residue retention in soils

| 项目  | 2010—2011 年 | 2012—2013 年 |
|-----|-------------|-------------|
| CT+ | 1 501.41    | 1 568.33    |
| NT+ | 1 899.62    | 1 798.31    |

## 2.5 土壤有机质含量与 $\text{CO}_2$ 排放、DOC 含量的关系

各处理土壤有机质含量变化如表 4 所示。秸秆还田能够显著提高土壤有机质含量,经过 5 年的秸秆还田措施后,秸秆还田翻耕处理有机质含量提高了 66%,秸秆还田免耕处理提高了 57%。当没有外源性有机物加入时,免耕措施利于土壤有机质的积累,无秸秆还田免耕处理土壤有机质含量较初始提高了 35%。在一个小麦生长季内,秸秆还田的处理其土壤有机质含量是增加的,无秸秆还田的处理,其有机质含量是减少的。这说明在小麦生育期内,当没有外源有机物的加入时,土壤的呼吸作用会消耗土壤原有的一部分有机质,当外源有机物加入时,一部分外源性有机物以  $\text{CO}_2$  形式散失了,另一部分则以有机质形式贮存在土壤中。

土壤中有有机质含量的变化是一个相对缓慢的过程,而土壤  $\text{CO}_2$  排放的有效碳源是溶解性有机碳,因此,在小麦生育期内土壤  $\text{CO}_2$  排放和有机质动态变化未表现出较好的相关性。但从整个生育期土壤有机质含量和  $\text{CO}_2$  排放总量来看,土壤有机质含量与  $\text{CO}_2$  排放总量有正相关关系(表 5),土壤有机质含量高则相应  $\text{CO}_2$  排放量多,如土壤有机质含量最高的 CT+ 处理,其  $\text{CO}_2$  排放总量也最大。土壤有机质含量与 DOC 含量的动态变化没有表现出较好的同步性(表 6),这是由于土壤有机质的变化是一个相对缓慢的过程,而 DOC 含量的变化是其产生和利用过程的综合表现。但与土壤有机质含量和  $\text{CO}_2$  排放总量之间的关系不同的是,土壤有机质含量高的处理,其 DOC 含量均值

表 4 土壤有机质含量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 4 Soil organic matter contents in different treatments

| 项目                | CT+   | CT-   | NT+   | NT-   |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| 2008 年处理前(裸地)     | 12.20 | 12.20 | 12.20 | 12.20 |
| 2010—2011 年小麦季播种前 | 15.67 | 12.42 | 14.18 | 14.58 |
| 2010—2011 年小麦季收获后 | 16.42 | 12.31 | 15.03 | 14.21 |
| 2012—2013 年小麦季播种前 | 18.95 | 12.57 | 17.32 | 17.06 |
| 2012—2013 年小麦季收获后 | 19.21 | 12.45 | 18.19 | 16.46 |

表 5 土壤有机质含量与 CO<sub>2</sub> 通量相关系数Table 5 Correlations between soil organic matter contents and CO<sub>2</sub> fluxes

| 项目  | 2010—2011 年 | 2012—2013 年 |
|-----|-------------|-------------|
| CT- | 0.389       | 0.507 *     |
| CT+ | 0.127       | 0.099       |
| NT- | 0.257       | 0.179       |
| NT+ | 0.203       | -0.093      |

表 6 土壤有机质含量与 DOC 含量相关系数

Table 6 Correlations between soil organic matter contents and DOC contents

| 项目  | 2010—2011 年 | 2012—2013 年 |
|-----|-------------|-------------|
| CT- | 0.032       | 0.028       |
| CT+ | 0.023       | -0.156      |
| NT- | 0.039       | 0.029       |
| NT+ | -0.251      | -0.154      |

并不高,如土壤有机质含量最高的 CT+处理,其DOC含量却低于 NT+处理,这可能由于秸秆覆盖在地表,更利于秸秆腐解产物转化为可溶性的小分子物质,而非直接分解成 CO<sub>2</sub>。

秸秆中含碳物质在还田后,一部分在腐解过程中以 CO<sub>2</sub> 形式直接散失,另一部分则进入土壤中参与土壤碳的转化利用过程。综合秸秆还田后以 CO<sub>2</sub> 形式散失的比例和土壤有机碳提高的比例来看,免耕较翻耕的固碳效率更高,免耕措施下每加入 C 含量为 1 kg 的秸秆后,其对土壤有机质含量提高贡献为 0.002 7%,翻耕措施下这一值为 0.001 6%。

### 3 讨论

#### 3.1 华北平原冬小麦温室气体通量范围

2010—2011 年小麦季各处理 CO<sub>2</sub> 排放通量范围:CT+为 95.58~614.98 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,CT-为 84.55~400.66 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,NT+为 46.64~367.99 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,NT-为 53.43~447.06 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 2012—2013 年小麦季各处理 CO<sub>2</sub> 排放通量变化范围:CT+为 80.02~343.75 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,CT-为 50.45~287.791 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,NT+为 17.35~404.36 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,NT-为 20.02~322.35 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。本研究中小麦季 CO<sub>2</sub> 排放通量的变化范围与其他学者在华北平原上的研究结果一致,即在 20~934 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 范围内变化<sup>[19-22]</sup>。

#### 3.2 耕作措施对 CO<sub>2</sub> 排放量的影响

Oorts 等<sup>[23]</sup>对持续 32 年的翻耕和免耕土壤 CO<sub>2</sub> 排放进行测定,在其观测的 331 d 内,免耕土壤 CO<sub>2</sub> 累

积释放量为 (4064±138) kg·hm<sup>-2</sup>,翻耕 CO<sub>2</sub> 累积释放量为 (3160±269) kg·hm<sup>-2</sup>,即免耕对土壤 CO<sub>2</sub> 排放有促进作用。本试验中 235 d 内 CO<sub>2</sub> 累积排放量的测定结果却与之相反,分析原因,可能与不同气候下种植不同作物及其水肥管理措施等因素差异有关。本试验中连续四年翻耕土壤的 CO<sub>2</sub> 排放总量低于两年翻耕土壤,连续四年免耕土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量则高于两年免耕,这种结果的出现可能与长期免耕和翻耕有关,但本试验耕作处理时间较短,不能确定长期翻耕和免耕对于 CO<sub>2</sub> 排放的影响。但这种变化的趋势与 Oorts 等的研究结果是一致的,即土壤经过长期的免耕措施,可能会使土壤 CO<sub>2</sub> 排放量增加,甚至超越同等条件下的翻耕措施。本定位试验只有 4 年时间,至于连续多年采用同一耕作措施土壤 CO<sub>2</sub> 排放量是否会达到一个相对稳定状态,有必要继续进行定位观测研究。

#### 3.3 影响土壤 DOC 含量的因子

相关研究表明,DOC 含量受温度影响较大,温度升高微生物活性增加,DOC 含量也随之变化<sup>[24]</sup>。试验结果显示,越冬前,CT+、NT+处理土壤 DOC 含量大幅度下降,而 CT-处理 DOC 含量变化很小,这可能是由于温度的降低,微生物活性下降,对还田的玉米秸秆分解速率变慢,导致溶出的 DOC 减少,CT-处理无外源有机物的加入,DOC 主要来源于土壤腐殖质的淋溶及转化,因此受温度影响不明显。越冬期各处理土壤 DOC 含量较大幅度上升,这是由于微生物活性的降低使得 DOC 在土壤中的分解变缓,造成 DOC 的累积。返青后,各处理 DOC 含量较越冬期有较大幅度的增加,可能与返青后土壤温度升高,灌水施肥促进小麦生长有关。正如有研究表明,干湿交替可明显促进土壤 DOC 含量的增加<sup>[16]</sup>。

土壤施用有机物料可以提高 DOC 含量,提高的程度以及影响时间与有机物料的化学组成<sup>[25]</sup>以及土壤理化性质有关。王良梅等<sup>[26]</sup>采用盆栽试验研究表明,绿肥、猪粪在腐解前 3 周均能显著提高红壤、潮土 DOC 含量,腐解期间土壤 DOC 变化趋势表现为迅速降低并趋于稳定;卢萍等<sup>[27]</sup>采用田间试验研究表明,麦秸施用的前 9 周显著增加了土壤 DOC 的浓度,9 周后无显著差异。本试验于秸秆还田后 40 d 左右开始采集土壤样品,比较小麦播种后各处理第一次土壤 DOC 含量可发现,CT-处理明显低于 CT+和 NT+处理。但这种现象的出现无法判断到底是由于秸秆腐解产物溶出 DOC 积累所致还是土壤有机质转化为 DOC 过程所致。在今后的研究中,可以通过同位素标

记等手段,确切的描述田间条件下秸秆还田后含碳物质向大气、DOC 及土壤有机质的分配转移过程。

### 3.4 秸秆还田固碳减排作用

秸秆还田对土壤  $\text{CO}_2$  排放、溶解性有机质含量和有机质含量均有一定的促进作用。秸秆还田后,一部分在腐解过程中直接以  $\text{CO}_2$  形式散失,这部分还田的秸秆增加了土壤  $\text{CO}_2$  的排放,另一部分秸秆以溶解性有机质或者有机质的形式进入土壤中,而溶解性有机质和有机质含量的提高,又会促进土壤  $\text{CO}_2$  的排放。单从  $\text{CO}_2$  排放角度考虑,秸秆还田确实增加了土壤向大气中  $\text{CO}_2$  的输送,但是结合土壤中溶解性有机质和有机质含量的变化,还田的秸秆分解为  $\text{CO}_2$  的只是其中的一部分,另外的部分则进入土壤碳的利用和转化过程中。将秸秆焚烧处理,则会使秸秆中所有的含碳物质转化为  $\text{CO}_2$  进入大气中。综合来看,秸秆还田在农业生产活动中起到固碳减排的作用。

## 4 结论

(1)小麦生育期内各处理  $\text{CO}_2$  排放具有明显的季节变化趋势,受温度影响明显,具体表现为从出苗后到越冬前的一段时间内呈下降趋势,返青后开始增加,到开花期达到高峰,其后开始下降。

(2)土壤 DOC 含量与  $\text{CO}_2$  排放动态没有显著相关关系。

(3)土壤有机质含量与土壤  $\text{CO}_2$  排放、土壤 DOC 含量动态变化均无显著相关关系。土壤  $\text{CO}_2$  排放总量与有机质含量呈正相关关系,但土壤有机质含量与 DOC 含量无明显关系。

(4)秸秆还田能显著增加土壤  $\text{CO}_2$  排放量、土壤 DOC 含量和有机质含量。

(5)翻耕措施能显著增加土壤  $\text{CO}_2$  排放和土壤有机质含量,对 DOC 含量无显著影响;免耕措施显著降低土壤  $\text{CO}_2$  排放,增加土壤有机质含量,对 DOC 含量无显著影响。

### 参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248(4960):1217-1219.
- [2] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases:an assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(8):713-719.
- [3] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4):240-249.
- [4] ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):240-249.
- [4] Vergé X, Kimpe C D, Desjardins R. Agricultural production, green-house gas emissions and mitigation potential[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 142(2):255-269.
- [5] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, 43(4):449-528.
- [6] Kalbitz K, Solinger S, Park J, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4):277-304.
- [7] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 105(1):175-182.
- [8] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest[J]. *Ecology*, 1991, 72(5):254-266.
- [9] Zhou L, Wong J. Microbial decomposition of dissolved organic matter and its control during a sorption experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(6):1852-1856.
- [10] 刘 微,王树涛.土壤中溶解性有机物及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4):997-1002.
- LIU Wei, WANG Shu-tao. Review of researches of dissolved organic matter in soil and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4):997-1002.
- [11] Kahle M, Kleber M, Jahn R. Retention of dissolved organic matter by phyllosilicate and soil clay fractions in relation to mineral properties[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(3):269-276.
- [12] Marschner B, Noble A D. Chemical and biological processes leading to the neutralisation of acidity in soil incubated with litter materials[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(6):805-813.
- [13] Magill A H, Aber J D. Dissolved organic carbon and nitrogen relationships in forest litter as affected by nitrogen deposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(5):603-613.
- [14] 杨继松,刘景双,于君宝,等.草甸湿地土壤溶解有机碳淋溶动态及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1):113-117.
- YANG Ji-song, LIU Jing-shuang, YU Jun-bao, et al. Dynamics of dissolved organic carbon(DOC) leaching in meadow marsh soil and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1):113-117.
- [15] Tipping E, Woof C. Humic substances in acid organic soils: modelling their release to the soil solution in terms of humic charge[J]. *Journal of Soil Science*, 1990, 41(4):573-586.
- [16] Lundquist E, Jackson L, Scow K. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(7):1031-1038.
- [17] 田慎重,宁堂原,迟淑筠,等.不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. *生态学报*, 2012, 32(3):879-888.
- TIAN Sheng-zhong, NING Yuan-tang, CHI Shu-jun, et al. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2012, 32(3):879-888.
- [18] 张甲坤, 陶 澍, 曹 军. 土壤中水溶性有机碳测定中的样品保存与前处理方法[J]. 土壤通报, 2000, 31(4):31-33.
- ZHANG Jia-shen, TAO Shu, CAO Jun, et al. Soil sample preservation and pretreatment for water soluble organic carbon determination [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(4):31-33.
- [19] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3):297-307.
- SONG Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3):297-307.
- [20] 赵建波. 保护性耕作对农田土壤生态因子及温室气体排放的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- ZHAO Jian-bo. Effects of conservation tillage on soil environmental factors and the emission of greenhouse gas in the field[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008.
- [21] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 田间管理对华北平原冬小麦产量土壤碳及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2495-2500.
- WANG Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Field managements affect yield, soil carbon, and greenhouse gases emission of winter wheat in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2495-2500.
- [22] 张 贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3):653-659.
- ZHANG He, GUO Li-ping, XIE Li-yong, et al. The effect of management practices on emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from the winter wheat field in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3):653-659.
- [23] Oorts K, Merckx R, Gréhan E, et al. Determinants of annual fluxes of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in Northern France[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1):133-148.
- [24] 张甲坤, 陶 澍, 曹 军. 中国东部土壤水溶性有机物含量与地域分异[J]. 土壤学报, 2001, 38(3):81-87.
- ZHANG Jia-shen, TAO Shu, CAO Jun. Spatial distribution pattern of water soluble organic carbon in Eastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3):81-87.
- [25] 代静玉, 周江敏, 秦淑平. 几种有机物料分解过程中溶解性有机物质化学成分的变化[J]. 土壤通报, 2004, 35(6):724-727.
- DAI Jing-yu, ZHOU Jiang-min, QIN Shu-ping. Dynamic changes of chemical composition of dissolved organic matter during decomposition of organic materials [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6):724-727.
- [26] 王艮梅. 农田土壤中水溶性有机物的动态及其对重金属铜、镉环境行为的影响[D]. 南京农业大学, 2004.
- WANG Gen-mei. Dynamics of dissolved organic matter and its impact on the behaviors of copper and cadmium in farmland[D]. Nanjing Agricultural University, 2004.
- [27] 卢 萍, 单玉华, 杨林章, 等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):30-35.
- LU Ping, SHAN Yu-hua, YANG Lin-zhang, et al. Effect of wheat straw incorporation into paddy soil on dissolved organic matter in soil solution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):30-35.
- [28] Delprat L, Chassin P, Linères M, et al. Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation[J]. *Developments in Crop Science*, 1997, 25(8):257-266.
- [29] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3):88-92.
- ZHANG Jin-bo, SONG Chang-chun, YANG Wen-yang. Influence of land-use type on soil dissolved organic carbon in the Sanjiang Plain[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(3):88-92.