

# 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响

张宇, 张海林, 陈继康, 陈阜

(中国农业大学农学与生物技术学院/农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193)

**摘要:** 【目的】探讨不同耕作方式对冬小麦农田土壤呼吸组分及碳平衡的影响, 比较不同耕作方式下农田的碳汇强度。【方法】试验于 2006-2008 年冬小麦生长季进行, 共设 3 个处理: 翻耕 (CT)、旋耕 (RT)、免耕 (NT), 采用静态箱法测定农田土壤 CO<sub>2</sub> 的排放速率, 同时利用根去除法区分根系对土壤呼吸的贡献率, 通过计算净生态系统生产力 (NEP), 来判断不同耕作方式下农田碳汇强度。【结果】耕作方式对冬小麦农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放具有显著影响, 且表现出明显的季节性排放特征, 即先下降再升高, 其中排放最低值出现在冬小麦越冬期。整个小麦生育期间农田 CO<sub>2</sub> 平均排放速率表现为翻耕 > 旋耕 > 免耕, 其中根系呼吸所占比例平均为翻耕 26.18%、旋耕 29.96%、免耕 36.44%。冬小麦生育期 3 种处理条件下, 土壤呼吸中根系呼吸的贡献率波动在 15%~85%, 其中冬小麦拔节期农田土壤根系呼吸贡献率最高。【结论】3 种耕作方式下农田土壤均表现为大气 CO<sub>2</sub> 排放的“汇”, 但不同耕作方式下农田碳汇强弱不同, 表现为免耕 > 旋耕 > 翻耕。

**关键词:** 耕作方式; 冬小麦; CO<sub>2</sub> 排放; 根系呼吸; 碳平衡

## Tillage Effects on Soil Respiration and Contributions of Its Components in Winter Wheat Field

ZHANG Yu, ZHANG Hai-lin, CHEN Ji-kang, CHEN Fu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University/Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193)

**Abstract:** 【Objective】Field experiment was carried out to estimate tillage effects on soil CO<sub>2</sub> emission, relative contribution of root and soil respiration and carbon balance, and carbon respiration intensity during winter wheat growth season. 【Method】Conventional tillage (CT), rotary tillage (RT), and no tillage (NT) were used during 2006-2008, soil CO<sub>2</sub> emission was measured by using static closed chambers and root contribution of root respiration was detected by root exclusion method. NEP was calculated for estimating carbon sequestration intensity. 【Result】Soil CO<sub>2</sub> emission was affected significantly by different tillage systems and it showed a significant seasonal fluctuating characteristic which was dropping until reached the lowest in hibernation and hoisting during the following period. The order of mean soil CO<sub>2</sub> emission rate was CT>RT>NT. The mean ratio of root respiration contributed to total respiration was 26.18%, 29.96% and 36.44% under CT, RT and NT, respectively. The contribution ratio of rhizospheric respiration to total soil CO<sub>2</sub> emission was fluctuated from 15% to 85% during the season and the ratio was highest at jointing stage of winter wheat under each tillage system. 【Conclusion】Therefore, soils were sinks of atmospheric CO<sub>2</sub> under each tillage system, but the order of the intensity of carbon sink was NT>RT>CT.

**Key words:** tillage; winter wheat; CO<sub>2</sub> emission; root respiration; carbon balance

## 0 引言

【研究意义】全球变暖已成为人们研究焦点, 农

田生态系统土壤呼吸及碳平衡等问题亦成为关注的热点, 农田系统中影响温室气体排放的人为因子包括施肥、耕作方式、土地利用方式变更等, 其中少免耕通

收稿日期: 2008-12-16; 接受日期: 2009-03-10

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAD15B01 和 2007BAD89B08)

作者简介: 张宇 (1983-), 男, 黑龙江富裕人, 硕士研究生, 研究方向为农作制度与区域农业。Tel: 010-62733376; E-mail: zyu256@126.com。  
通信作者陈阜 (1964-), 男, 山西浑源人, 教授, 研究方向为农作制度与区域农业。Tel: 010-62733316; E-mail: chenfu@cau.edu.cn

过减少土壤扰动、增加秸秆覆盖, 其对温室气体排放的影响也逐渐被人们所重视<sup>[1-2]</sup>。【前人研究进展】关于农田温室气体排放的研究多集中于农田土壤呼吸的季节及日变化规律, 或探讨土壤呼吸与温度、水分、肥料等因素对其的影响<sup>[3-7]</sup>, 而对于农田系统土壤呼吸各组分区分的研究仍较少。一般认为, 土壤呼吸 ( $R_t$ ) 可以分为根际的自养呼吸 ( $R_{rh}$ ) 和土壤微生物的异养呼吸 ( $R_s$ )。其中根际呼吸包括根系自养呼吸与根系微生物呼吸, 由于二者之间很难区分, 目前将土壤呼吸简单分为根系呼吸 ( $R_m$ ) 与土壤微生物的异养呼吸 ( $R_s$ )。根系呼吸由植物光合产物控制, 异养呼吸则由土壤有机质控制<sup>[8]</sup>。它们各自呼吸所利用的碳源不同<sup>[7]</sup>, 对土壤呼吸的贡献、对全球变化的作用也不同。在农田系统中以往的研究多集中于某种作物或单一环境因素下根系呼吸在土壤呼吸所占比例<sup>[9-11]</sup>, 而对于不同耕作方式对根系呼吸的影响, 其研究相对较少。李俊等<sup>[12]</sup>通过计算华北地区农田净初级生产力, 比较后发现传统耕作方式比多年免耕相比明显增加碳吸收量, 但也有研究认为传统耕作方式与免耕农田的净生态系统生产力 (NEP) 之间并无明显差别<sup>[13]</sup>。【本研究切入点】但此方面仍缺少不同耕作方式下同一年内农田碳汇强度的横向比较。本文通过根去除法测量不同耕作方式下根系呼吸所占土壤呼吸的比例, 计算不同耕作方式下农田系统碳汇强度。【拟解决的关键问

题】旨在说明不同耕作方式下农田土壤呼吸组分构成及其土壤固碳能力的强弱, 为建立合理耕作制度, 提高华北地区农田土壤固碳潜力提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验在中国科学院栾城生态试验站进行, 位于河北省石家庄市栾城县聂家庄乡 (114°40'E, 37°50'N), 海拔 50.1 m, 年均气温 12.2 °C, 年均降水量 480.7 mm, 为典型的小麦-玉米一年两熟农作区。

长期定位试验处理于 2001 年开始进行, 共设 3 个处理: 翻耕 (CT)、旋耕 (RT)、免耕 (NT), 每个处理约 0.33 hm<sup>2</sup>。翻耕耕深 15 cm; 旋耕耕深 5 cm; 免耕, 直立秸秆自然分布于农田。3 种耕作方式下玉米秸秆全量还田, 翻耕还田量为 7 167 kg·hm<sup>-2</sup>, 旋耕为 6 467 kg·hm<sup>-2</sup>, 免耕为 7 008 kg·hm<sup>-2</sup>。

本试验分别于 2006、2007 年小麦生长季进行, 为测定农田土壤呼吸组分比例, 于 2007 年在各处理上相应设置裸地, 裸地只进行相应秸秆还田和土壤耕作, 还田量与相应的处理相同, 但不播种。分别为翻耕裸地 (CT0)、旋耕裸地 (RT0)、免耕裸地 (NT0)。

试验土壤为潮褐土, 质地为壤土, 土壤基本理化性状见表 1。

表 1 试验地土壤养分特性

Table 1 Soil chemical properties of the tested field

土壤深度 Soil depth (cm)	全氮 Total N (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Available N (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )	总有机质 Total organic matter (%)
0~10	0.074	37.95	62.90	115	0.88
10~20	0.064	30.58	39.62	90	0.94
20~30	0.045	27.99	23.32	65	0.69

### 1.2 测定项目

1.2.1 气体测定 试验从 2006 年 10 月整地开始时进行采样, 其中秋季和春季小麦返青前每月测定 1 次, 冬季只在 1 月 15 日进行 1 次测定, 小麦返青 (3 月 15 日) 后每隔 20 d 测定 1 次, 6 月 15 日小麦收获后结束, 共测定 10 次, 每次测定均在 9:00-10:00 完成。

CO<sub>2</sub> 排放通量采用静态箱法测定。底座埋入作物行间, 入土 5 cm, 整个冬小麦生长季节底座不再移动。取样时, 采样箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封, 以保证箱内气体不与大气进行气体交换。采样箱用有

机玻璃制成。箱体体积为 60 cm×30 cm×30 cm。取样时, 采样箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封, 以保证箱内气体不与大气进行气体交换。采样前, 将箱内顶部风扇打开, 使箱内气体混和均匀, 在盖箱之初及之后的 10、20 和 30 min 用 50 ml 注射器从箱中抽取气体。

气体测定使用 HP6890N 型色谱仪, 测定 CO<sub>2</sub> 的检测器为 FID, 测定温度 200 °C, 柱型为 Poropak Q 柱, 柱温 70 °C。排放通量由箱中气体浓度随时间的变化率计算得出, 通量计算方程为:  $F = dc/dt(hM_w T_s)/M_v$

( $T_{st}+T$ )。式中,  $F$  为排放通量 ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $dc/dt$  为箱内痕量气体随时间的变化率,  $h$  为采样箱高,  $M_w$  为痕量气体的摩尔质量,  $T_{st}$  为标准状态下的温度 273.2 K,  $M_v$  为痕量气体的摩尔 $\times$ 体积,  $T$  为测定时的土壤温度。

**1.2.2 植被碳固定测定与计算** 冬小麦收获时用根钻法测定各处理 0~90 cm 土壤的根生物量;同时用样方收获法测定地上生物量(包括地上部分各器官以及凋落物)。

**1.2.3 碳平衡计算** 采用净生态系统生产力(NEP)来表示生态系统碳平衡<sup>[14]</sup>。NEP 为正值时,表示系统是大气  $\text{CO}_2$  的吸收“汇”;反之为大气  $\text{CO}_2$  的排放“源”。碳平衡计算公式为:  $\text{NEP}=\text{NPP}-\text{Rs}$ 。其中 NPP 为作物地上部生物量与地下部生物量的总和,作物地上部组织和根的碳含量取 45%,土壤微生物异养呼吸 C 释放量为 3 种耕作方式下相应裸地在整个冬小麦生育期间农田  $\text{CO}_2$  的排放量。

数据采用 SPSS 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 农田 $\text{CO}_2$ 排放动态变化

通过连续两年的测定可看出,冬小麦生育期间不同耕作方式下麦田  $\text{CO}_2$  排放具有相似的变化趋势,即  $\text{CO}_2$  的排放呈先下降后升高的趋势(图 1)。由于土壤耕作的影响,冬小麦播种后  $\text{CO}_2$  排放量较高。从冬小麦幼苗期 10 月下旬到冬小麦分蘖期 11 月初,土壤  $\text{CO}_2$  排放急剧下降。此阶段  $\text{CO}_2$  的排放与温度的变化表现出较强的同步性,随着温度的降低,土壤微生物

代谢缓慢,土壤呼吸速率较小,在冬小麦越冬期排放达到最低值。从冬小麦越冬期至冬小麦拔节期,随着土壤温度的逐渐回升, $\text{CO}_2$  排放通量逐渐上升,至冬小麦拔节期出现小的排放高峰。冬小麦拔节期至冬小麦收获  $\text{CO}_2$  排放通量变化较为稳定。

耕作方式对农田  $\text{CO}_2$  的排放有一定的影响,免耕条件下土壤紧实,与空气接触面积较小,加之秸秆覆盖,土壤温度较低,使得土壤呼吸较弱;翻耕比旋耕对耕层破坏更为强烈,土壤温度和水分变化显著,使得翻耕下土壤呼吸排放量较高。对整个小麦生育期各处理  $\text{CO}_2$  排放通量进行平均,2006 至 2007 年麦田 3 种耕作方式下农田  $\text{CO}_2$  释放量分别为 547.04、444.23 和 387.2  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;2007 至 2008 年分别为 483.30、440.47 和 390.96  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,表现为翻耕>旋耕>免耕,旋耕和免耕分别比翻耕降低了 11.14%和 18.02%。

不同耕作方式下裸地农田  $\text{CO}_2$  排放也具有相似的变化规律(图 2),即呈现先降低后升高的变化趋势,3 种处理  $\text{CO}_2$  排放量最低值出现在越冬期。由于受耕作措施的影响, $\text{CO}_2$  在耕作初期排放量较高,随着时间的推移,排放逐渐降低,这主要是由于土壤温度的降低和土壤中易分解有机碳量的减少,导致 3 种处理条件下农田  $\text{CO}_2$  排放量逐渐降低。春季土壤温度的逐渐升高,土壤  $\text{CO}_2$  排放略有增加,翻耕与旋耕裸地情况下, $\text{CO}_2$  排放增加量较为明显,免耕条件下  $\text{CO}_2$  排放较为稳定。小麦生长季相应裸地处理  $\text{CO}_2$  排放通量翻耕、旋耕、免耕分别为 356.44、345.31 和 248.34  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,即旋耕和免耕分别比翻耕降低了 28.55%和 30.70%。

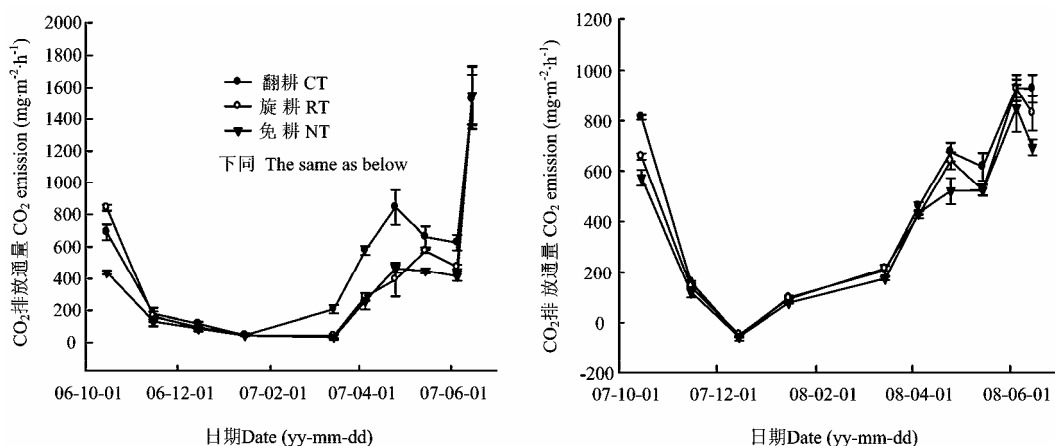


图 1 不同耕作方式农田冬小麦存在条件下土壤  $\text{CO}_2$  排放动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil  $\text{CO}_2$  emission under different tillage of winter wheat fields

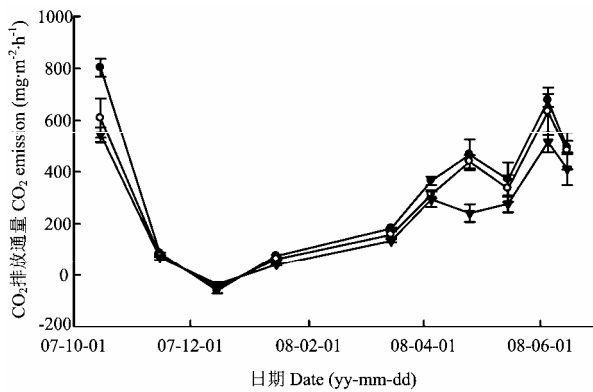
图 2 不同耕作方式下裸地土壤 CO<sub>2</sub> 排放变化规律

Fig. 2 Dynamics of soil CO<sub>2</sub> emission of bared soil under different tillage systems

表 2 冬小麦生育期不同耕作方式下农田土壤呼吸排放量

Table 2 Soil CO<sub>2</sub> emission during winter wheat growth season under different tillage systems (g·m<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	各生育期 Growth and development stages					全生育期 Whole season
	苗期-分蘖期 (10.15-12.15)	越冬期 (12.15-1.15)	返青期 (1.15-3.15)	拔节期 (3.15-4.15)	灌浆期 (4.15-6.15)	
	Seedling-Tillering	Hibernation	Revival	Jointing	Filling	
A 翻耕 CT	388.01a	15.20a	220.15a	512.90a	904.50a	2040.77a
旋耕 RT	320.45b	16.15a	222.10a	486.44b	838.50a	1883.64b
免耕 NT	272.56c	8.13a	181.94b	447.40c	764.94b	1674.98c
B 翻耕 CT	59.33a	9.93a	35.21a	117.05a	312.80a	534.33a
旋耕 RT	65.20a	10.64a	63.72b	137.50b	287.27a	564.35b
免耕 NT	40.91b	6.75a	56.85c	165.59c	340.26b	610.37c
C 翻耕 CT0	328.67a	5.27a	184.94a	395.84a	591.70a	1506.44a
旋耕 RT0	255.24a	5.51a	158.36b	348.94b	551.23a	1319.30b
免耕 NT0	231.65b	1.38a	125.08c	281.80c	424.69b	1064.61c

A 为作物存在下农田土壤呼吸排放量, B 为相应农田小麦根系呼吸 CO<sub>2</sub> 释放量, C 为相应裸地农田土壤矿化 CO<sub>2</sub> 释放量; 表中小写字母 a、b、c 表示同列数据在 0.05 水平上差异显著性。下同

A represents the soil respiration with crop, B represents the wheat root CO<sub>2</sub> emission of correspond field, C represents the CO<sub>2</sub> emission of bare field, and the a、b and c represent the significant level at 0.05. The same as below

利用麦田土壤呼吸 ( $R_t$ ) 值减去相应处理裸地土壤呼吸值 ( $R_s$ ), 得到相应各处理农田根系呼吸 ( $R_m$ )。结果表明,  $R_m$  占总土壤呼吸的比例各处理分别为: 翻耕 26.18%、旋耕 29.96%、免耕 36.44%。3 种处理条件下, 冬小麦各生育时期作物存在对土壤呼吸的贡献率波动在 15%~85%。其中拔节期至收获贡献率平均波动在 30%~45%, 此阶段作物生长迅速, 且土壤温度逐渐升高, 使得植株根系活性提高, 故此根系呼吸增强。此外, 冬小麦越冬期根系呼吸所占比例最高,

与麦田土壤总土壤呼吸量相比, 不同耕作方式下裸地农田 CO<sub>2</sub> 排放显著降低。麦田由于根系的存在, 显著增加了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放, 其中在冬小麦的拔节期至收获阶段, 表现最为突出。从 CO<sub>2</sub> 排放平均速率上比较, 整个冬小麦生育期间裸地农田与种植小麦相比, 翻耕 CO<sub>2</sub> 排放降低了 30.51%, 旋耕降低了 11.24%, 免耕降低了 28.08%。

## 2.2 土壤呼吸组分区分

由方差结果可知 (表 2), 3 种处理下冬小麦生育期间除越冬期以外, 农田土壤呼吸排放量之间存在显著性差异。12 月与 1 月的农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量各处理差异显著, 但由于 12 月的排放速率为负值, 1 月的排放速率为正值且排放通量为较小, 二者平均导致越冬期各处理排放总量之间差异不显著。

平均波动在 65%~80%, 此时土壤温度较低, 土壤微生物活性下降, 土壤有机质矿化速率降至最低。

3 种耕作方式中, 免耕农田土壤呼吸中根系呼吸比重较高, 而该条件下土壤微生物呼吸较低; 亦整个冬小麦生育期免耕条件下微生物矿化分解的土壤有机质最少, 而翻耕最多。秸秆覆盖条件下免耕土壤温度在冬小麦生长前期要低于翻耕、旋耕, 由于温度上的差异导致土壤微生物活性不同, 从而影响土壤微生物矿化有机质的速度。

## 2.3 农田碳平衡

不同耕作方式下农田碳平衡计算结果见表 3。结果表明该地区下冬小麦生育季 3 种耕作处理均表现为土壤碳的“汇”。虽然冬小麦整个生育期间农田土壤 CO<sub>2</sub> 总的排放量表现为翻耕>旋耕>免耕,但从碳平衡计算结果看,3 种耕作方式下碳汇强弱表现为,免耕>旋耕>翻耕。

表 3 不同耕作方式下冬小麦季农田碳平衡

Table 3 Carbon balance at winter wheat growth season under different tillage systems

	翻耕 CT	旋耕 RT	免耕 NT
地上部生物量 Aboveground biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	13579.52a	12936.20b	11524.56c
地下部生物量 Underground biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	597.17a	378.42b	332.34c
净初级生产力 NPP (kg·hm <sup>-2</sup> )	14176.69a	13314.62b	11856.90c
净初级生产力 NPP (kg C·hm <sup>-2</sup> )	6379.51a	5991.58b	5335.61c
土壤碳释放总量 Rs (kg C·hm <sup>-2</sup> )	4108.47a	3598.09b	2903.49c
净生态系统生产力 NEP (kg C·hm <sup>-2</sup> )	2271.03a	2393.49b	2432.11c
NPP/Rs	1.55a	1.66b	1.83c

翻耕与旋耕、免耕相比,虽然其产量水平较高,但由于耕作对土壤搅动最为强烈,增加了土壤矿化碳释放量,因此碳汇强度较弱。旋耕与免耕相比,由于免耕对土壤的破坏较少,加之秸秆覆盖,降低了土壤碳释放总量,致使该处理农田成为大气 CO<sub>2</sub> 的“汇”,而旋耕无论是产量还是农田土壤碳的释放量均处在翻耕、免耕二者之间,故此碳汇强度至于二者之间。

## 3 讨论

### 3.1 利用裸地土壤呼吸计算土壤矿化释放 CO<sub>2</sub> 排放量的可能性

利用静态箱法测得华北地区麦田 3 种耕作方式下农田 CO<sub>2</sub> 排放规律,与前人研究结果较为接近<sup>[5,15]</sup>。利用根去除法测得,3 种处理条件下冬小麦各生育时期作物存在对土壤呼吸的贡献率波动在 15%~85%。研究认为,当土壤含水量过高时,土壤空隙中的水分则会阻碍氧气在土壤中的扩散,从而使得土壤异养呼吸作用占总土壤呼吸的比例降低<sup>[16-17]</sup>。综合分析,由于免耕冬小麦生长前期土壤温度较低,此外秸秆还田可以保持土壤水分,从而影响了土壤呼吸中各部分比例。生态系统中,根系呼吸占土壤呼吸的比例具有很大的不确定性,基本在 10%~90%间波动<sup>[18]</sup>,本试验结果与其一致。由于相应裸地中不存在作物根系,因此该试验并未考虑由于根系存在及相应根系分泌物与根系微生物对土壤呼吸的影响。此外由于裸地无作物覆盖土壤直接暴露,使得与对应的农田系统相比,在整个冬小麦生育期间裸地的土壤温度变化更为敏感,土壤水分略有下降,因此本试验利用所测相应裸地土壤呼吸的排放量近似表示土壤矿化释放的 CO<sub>2</sub> 排放量。

### 3.2 麦田根系呼吸变化比例及与土壤呼吸的关系

冬小麦生育季 3 种耕作处理均表现为大气 CO<sub>2</sub> 排放的“汇”,这与黄斌的计算结果较为接近<sup>[19]</sup>。通过计算可知整个冬小麦生育期 3 种耕作处理下根系呼吸排放量占土壤呼吸的比例介于 30%~41%,张宪洲等<sup>[10]</sup>利用根去除法测定青稞农田根系呼吸在总呼吸量的比例为 34%~44%,全生育期平均为 40%。以往研究表明平均而言农田生态系统中根呼吸对土壤呼吸的贡献为 (48±5)%<sup>[16]</sup>,本试验结果低于该结论,一方面可能与当地的气候,土壤质地上的差异有关,此外测量次数的限制也导致最终计算结果偏低。蔡艳等<sup>[20]</sup>利用根去除法测得的玉米对土壤呼吸的贡献率,全生长期平均为 46%。由于小麦为矮秆须根系作物,与玉米、向日葵等高秆作物相比,根系的影响更为重要。

### 3.3 根去除法应用价值及测量方法的改进

以往研究认为,测定土壤呼吸中根系呼吸的方法包括组分综合法、生物量外推法、根去除法、同位素标记法等<sup>[16-17,21-23]</sup>,Hall 等<sup>[24]</sup>首次在农田利用根去除法发现向日葵灌浆期间根际呼吸占到土壤总呼吸的 60%~70%。Rochette 等<sup>[25]</sup>研究发现用同位素法和用根去除法测得的 Rm 值都在 45%左右,没有明显差异。张宪洲等<sup>[10]</sup>通过测定青稞农田及相应裸地土壤 CO<sub>2</sub> 排放量,证明矮秆作物与高秆作物之间根系呼吸所占比例较为接近。陈书涛等<sup>[11]</sup>研究表明,利用生物量外推法测定小麦返青-拔节期土壤根系呼吸值与相应裸地

土壤呼吸值较为接近。由此看出根去除法在农田系统中同样具有应用价值。根去除法作为一种间接的测定根系呼吸的方法,它是通过测定有根和无根情况下的土壤呼吸得出根系呼吸<sup>[20-21]</sup>,而传统的根去除法由于对土壤耕层具有一定的破坏性,使得其对于测定不同耕作措施下的根系呼吸并不适宜。本试验 3 个处理中的裸地只进行相应土壤耕作,但不进行播种,这样可以保证测量时土壤耕层结构的完整。

## 4 结论

不同耕作方式对麦田土壤 CO<sub>2</sub> 排放具有显著影响,整个冬小麦生育期间农田 CO<sub>2</sub> 平均排放速率表现为翻耕>旋耕>免耕。不同耕作方式下相应裸地土壤呼吸速率同样表现为翻耕>旋耕>免耕。利用根去除法测得,不同耕作方式下农田根系呼吸(Rm)比例分别为翻耕 26.18%、旋耕 29.96%、免耕 36.44%。3 种处理条件下,冬小麦各生育时期作物存在对土壤呼吸的贡献率介于 15%~85%,其中冬小麦拔节期农田土壤根系呼吸贡献率最高。通过计算不同耕作方式冬小麦农田净生态系统生产力(NEP),表明该地区下冬小麦生育季 3 种耕作处理均表现为大气 CO<sub>2</sub> 排放的“汇”。从碳平衡计算结果看,3 种耕作方式下碳汇强度表现为免耕>旋耕>翻耕。

## References

- [1] 刘建民, 胡立峰, 张爱军. 保护性耕作对农田温室效应的影响研究进展. 农艺科学, 2006, 22(8): 246-249.  
Liu J M, Hu L F, Zhang A J. Research progress in greenhouse effect caused by conservation tillage. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 246-249. (in Chinese)
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [3] 张国明, 郭李萍, 史培军, 林而达, 王静爱, 缪驰远. 农田土壤生态系统冬小麦夏玉米轮作 CO<sub>2</sub> 排放特征研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(4): 457-460.  
Zhang G M, Guo L P, Shi P J, Lin E D, Wang J A, Miao C Y. A study on the characteristics of CO<sub>2</sub> emission of winter-wheat and summer-corn in the ecological system of upland soil. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 43(4): 457-460. (in Chinese)
- [4] 董玉红, 欧阳竹, 李 鹏, 张 磊. 长期定位施肥对农田土壤温室气体排放的影响. 土壤通报, 2007, 38(1): 97-100.  
Dong Y H, Ouyang Z, Li P, Zhang L. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fluxes from agricultural soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 97-100. (in Chinese)
- [5] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 史雅娟, 屈 波, 况 星. 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. 环境科学学报, 2006, 26(6): 992-999.  
Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, Shi Y J, Qu B, Kuang X. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 992-999. (in Chinese)
- [6] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47-52.  
Xie J F, Li Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2002, 23(4): 47-52. (in Chinese)
- [7] Linn D M, Doran J W. Effects of water filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 1267-1272
- [8] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D. Root exerts a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396: 570-572.
- [9] Horwath W R, Pregitzer K S, Paul E A. <sup>14</sup>C allocation in tree-soil systems. *Tree Physiology*, 1994, 14: 1163-1176.
- [10] 张宪洲, 刘允芬, 钟华平, 欧阳华. 西藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征. 资源科学, 2003, 25(5): 103-107.  
Zhang X Z, Liu Y F, Zhong H P, Ouyang H. Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in the Tibetan plateau. *Resources Science*, 2003, 25(5): 103-107. (in Chinese)
- [11] 陈书涛, 古 敏, 贾刘敏, 黄 耀. 冬小麦返青-拔节期土壤的自养和异养呼吸研究. 环境科学学报, 2008, 28(5): 937-944.  
Chen S T, Gu M, Jia L M, Huang Y. Soil autotrophic and heterotrophic respiration in a soil-winter wheat system during turning green-elongation periods. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 937-944. (in Chinese)
- [12] 李 俊, 于 强, 孙晓敏, 同小娟, 任传友, 王 靖, 刘恩民, 朱治林, 于贵瑞. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊 I): 210-223.  
Li J, Yu Q, Sun X M, Tong X J, Ren C Y, Wang J, Liu E M, Zhu Z L, Yu G R. Carbon exchange in field ecological system and regulation of environmental factors at North China Plain. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(Suppl. I): 210-223. (in Chinese)
- [13] Baker J M, Griffis T J. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy coraiano and mass balance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128:

- 163-177.
- [14] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199: 141-146.
- [15] 陈述悦, 李 俊, 陆佩玲, 王迎红, 于 强. 华北平原麦田土壤呼吸特征. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1552-1560.
- Chen S Y, Li J, Lu P L, Wang Y H, Yu Q. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1552-1560. (in Chinese)
- [16] Skopp J, Jawson M D, Doran D W. Steady state aerobic microbial activity as function of soil-water content. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54: 1619-1625.
- [17] Kuzyakov Y, Larionova A A. Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168: 503-520.
- [18] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115-146.
- [19] 黄 斌, 王敬国, 龚元石, Karl Stahr, 杨 倩. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 156-160.
- Huang B, Wang J G, Gong Y S, Karl S, Yang Q. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 156-160. (in Chinese)
- [20] 蔡 艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献. *生态学报*, 2006, 26(12): 4273-4280.
- Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4273-4280. (in Chinese)
- [21] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 597-602.
- Cheng S Y, Zhang X Z. A review on differential methods for root and soil microbial contributions to total soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 597-602. (in Chinese)
- [22] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞. 土壤各组分呼吸区分方法研究进展. *生态学杂志*, 2003, 22(2): 65-69.
- Yi Z G, Yi W M, Zhou L X. Advances in the research on the methods for separating the components of soil respiration. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(2): 65-69. (in Chinese)
- [23] 杨玉盛, 董 彬, 谢锦升, 陈光水, 李 灵, 刘东霞, 李 震. 林木根呼吸及测定方法进展. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 426-434.
- Yang Y S, Dong B, Xie J S, Chen G S, Li L, Liu D X, Li Z. A review of tree root respiration: significance and methodologies. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28(3): 426-434. (in Chinese)
- [24] Hall A J, ConNor D J, Whitfield D M. Root respiration during grain filling in sunflower: the effects of water stress. *Plant & Soil*, 1990, 121: 57-66.
- [25] Rochette P, Flanagan L B, Gregorich E G. Separating soil respiration into plant and soil components using analyses of the natural abundance of carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1207-1213.

(责任编辑 郭银巧)