网络出版时间:2014-03-26 17:09 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.018 网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.018.html

不同轮作方式对免耕农田土壤 CO₂ 排放的影响

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] 【目的】研究免耕条件下不同轮作方式对土壤 CO₂ 排放的影响,以期为农田固碳减排提供参考。【方 法】采用大田定位试验的方法,以冬小麦(*Triticum aestivum* L.)-夏闲、冬小麦-夏玉米(*Zea mays* L.)、冬小麦-夏大豆 (*Glycine max* (Linn.) Merr.)和冬油菜(*Brassica campestris* L.)-夏玉米4种轮作方式为研究对象,在免耕条件下,分 析 2012 年 3-6 月冬小麦和冬油菜生长季土壤 CO₂ 排放规律,以及其与土壤温度和湿度之间的关系。【结果】免耕条 件下4种轮作方式土壤 CO₂ 排放通量具有明显的变化规律,整体呈先上升再下降的趋势;平均 CO₂ 排放通量表现为 冬小麦-夏玉米(13.91 µmol/(m² • s))>冬小麦-夏大豆(9.09 µmol/(m² • s))>冬小麦-夏闲(6.43 µmol/(m² • s))> 冬油菜-夏玉米(4.56 µmol/(m² • s)),且不同处理间平均土壤 CO₂ 排放通量差异达极显著水平(P<0.01);冬小麦-夏闲处理土壤温度最低,土壤湿度最大,平均土壤温度和湿度分别为 14.49 ℃和 13.28%,且与土壤 CO₂ 排放通量的 相关性最小,说明土壤温湿度变化对冬小麦-夏闲处理土壤呼吸的影响较小。【结论】4种轮作方式中,冬油菜-夏玉米 轮作最有利于减少农田温室气体排放,缓解全球气候变化。

[关键词] 轮作方式;土壤 CO₂ 排放;土壤温度;土壤湿度;相关关系

[中图分类号] S181 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2014)04-0143-07

Effects of different rotation modes on soil CO₂ emission fluxes from no-till farmland

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: [Objective] The paper studied the effects of different rotation modes on soil CO_2 emission, to provide a reference for farmland carbon sequestration and emission reduction. [Method] Long-term field experiments were conducted to research the dynamic variation of CO_2 emission fluxes under 4 rotation modes (winter wheat (*Triticum aestivum* L.)-summer fallow, winter wheat-summer maize (*Zea mays* L.), winter wheat-summer soybean (*Glycine max* (Linn.) Merr.), and winter rape (*Brassica campestris* L.)-summer maize) during winter wheat and winter rape growth period from March to June in 2012. The relationship between soil CO_2 emission with soil temperature and soil moisture was analyzed as well. [Result] CO_2 emission fluxes had significant fluctuation under different rotation modes. The CO_2 emission flu-

[收稿日期]	2013-04-07
[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,陕西商洛人,在读硕士,主要从事生物质能与循环农业技术研究。
	E-mail:lichangzhen029@163.com
[通信作者]	杨改河(1957-),男,陕西铜川人,教授,博士,博士生导师,主要从事资源与环境生态、循环农业研究。
	E-mail;ygh@nwsuaf. edu. cn

xes of four modes were in a decreasing order of winter wheat-summer maize(13.91 μ mol/(m² • s))>winter wheat-summer soybean(9.09 μ mol/(m² • s))>winter wheat-summer fallow(6.43 μ mol/(m² • s))> winter rape-summer maize(4.56 μ mol/(m² • s)) with extremely significant difference (P<0.01) within different modes. Winter wheat-summer fallow mode had the lowest soil temperature of 14.49 °C, the highest soil moisture of 13.28%, and the lowest correlation coefficients with CO₂ emission flux. It is indicated that soil temperature and moisture had less effect on CO₂ emission flux in winter wheat-summer fallow mode. [Conclusion] Winter rape-summer maize model was the best treatment to reduce agricultural greenhouse gas emissions and mitigate global climate change among the 4 tested rotation modes.

Key words: rotation modes; soil CO₂ emission flux; soil temperature; soil moisture; correlation coefficient

土壤 CO₂ 排放是土壤碳损失的主要途径之 一^[1],在人类活动 CO₂ 排放总量中占 25 %^[2-3]。农 业土壤在全球碳库中最活跃,对维持全球的碳平衡 具有不可忽视的作用[4-5],但极易受农业管理措施的 影响。免耕被认为是一项具有直接降低温室气体排 放且提高农田土壤固碳潜力的有效措施之一[6-7],免 耕条件下土壤 CO2 排放显著低于翻耕和旋耕处 理^[8]。目前,关于免耕对农田土壤 CO₂ 排放影响的 研究较多[9-10],但关于轮作方式对免耕农田土壤 CO2 排放影响的研究却较少,郝旺林等[11]研究表 明,不同前茬处理的冬小麦田碳排放存在较大差异。 一般认为,土壤温度和湿度是影响土壤呼吸的主要 因素[12-13]。据研究,表层土壤温度与农田土壤呼吸 具有较高的相关性[14-15],而土壤湿度对农田土壤呼 吸的影响较为复杂;除土壤温湿度外,土壤微生物状 况^[16]、秸秆覆盖^[17]、施肥^[18]、灌溉等^[19]因素也可影 响农田土壤呼吸强度。在关中地区,随着市场经济 的发展,单一的轮作体系已被多元化轮作体系代替。 鉴于此,本试验采用陕西关中地区常见的轮作方式 为研究对象,对不同轮作方式冬小麦(Triticum aestivum L.)和冬油菜(Brassica campestris L.)生长 季土壤 CO₂ 排放及其影响因素进行测定和分析,探 讨土壤呼吸的变化规律和 CO2 排放特点以及水热 因子与土壤呼吸的关系,为建立科学有效的农田固 碳减排措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验安排在陕西杨凌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,年降 水量约为660 mm,主要集中在7-9月,为大陆性暖 温带季风气候,一年两熟。试验地土壤为搂土,0~ 40 cm 土层养分含量为,有机质 6.48 g/kg,碱解氮 11.14 mg/kg,速效磷 16.19 mg/kg,速效钾 154.55 mg/kg。

试验开始于 2010 年,共设置 4 种轮作方式,分 别为冬小麦-夏闲(WF)、冬小麦-夏玉米(Zea mays L.)(WM)、冬小麦-夏大豆(Glycine max (Linn.) Merr.)(WS)和冬油菜-夏玉米(RM)。本研究采用 2012年冬小麦和冬油菜生长季3-6月的数据。所 有处理都是在免耕条件下进行,作物成熟后将地上 部分收获,作物根系留在土壤中。每处理设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 889,千粒质量 40g,免耕条播小麦 375 kg/hm²,播幅 9行,行距 18.89 cm;冬油菜品种为陕油 9 号,千粒质量 3.2 g, 免耕条播油菜 7.5 kg/hm²,播幅 3 行,行距 60 cm; 2011-10-07 播种, 2012-06-10 收获。冬小麦和冬油 菜播种前施底肥尿素(N素质量分数 46%) 375 kg/hm²,磷酸二胺(P₂O₅质量分数 46%) 375 kg/hm²。冬小麦-夏玉米和冬油菜-夏玉米轮作过程 中夏玉米采用追肥,追肥量为375 kg/hm² 尿素(N素 质量分数 46%),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/hm²;夏闲田不施肥。试验统一管理,整个生 育期不灌水,其他田间管理措施同当地常规栽培。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤 CO₂ 排放通量测定 土壤 CO₂ 排放通 量测定采用 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)。待冬小 麦和冬油菜播种后,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 含量,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 含量。CO₂ 排放通量计算公式为: $F = k(X_2 - X_1) H/\Delta t \cdot M$ 。式中:F为 CO₂ 排放通 量, μ mol/(m² · s);k为换算系数,k = 0.56(25 °C, 1)个标 准大气压);X₁ 为测定时 CO₂ 初始含量, mg/kg;X₂ 为 CO₂ 即时含量,mg/kg;H 为容器高 度,m; Δt 为测定时间,s;M 为 CO₂ 的相对分子质 量,44.01。为了减小不同处理土壤 CO₂ 排放通量 的测定误差,每次测定在上午 09:00-11:00 进行, 该时间段土壤 CO₂ 通量最接近日 CO₂ 平均通 量^[20-21]。每小区重复 3 次,求平均值作为该生育时 期土壤 CO₂ 排放通量。

1.2.2 土壤温湿度测定 土壤温度采用直角地温 计测定,待冬小麦和冬油菜播种后,将直角地温计埋 到 PVC 腔室附近,每个小区埋1套,埋置深度分别 为 5,10,15 和 20 cm,在测定土壤 CO₂ 排放通量的 同时记录土壤温度。

土壤湿度采用铝盒烘干称质量法测定,每次测 定土壤 CO₂ 排放通量的当天,用土钻采集 0~30 cm 土层土样,每 10 cm 为 1 个分层,带回实验室称质量 进行测定。

所有指标均于 03-26 开始测定,10 d 左右测 1 次,06-07 结束,共测 7 次。

1.3 数据处理与分析

试验数据分析采用 Origin 7.5 和 SAS V8 统计软件完成。

- 2 结果与分析
- 2.1 冬小麦和冬油菜不同轮作方式下土壤 CO₂ 的 排放特征

由图 1 可知,4 种轮作方式土壤 CO₂ 排放规律 基本一致,从03-26到5月中旬整体呈先上升再下 降的趋势。整个观测期,平均 CO₂ 排放通量表现为 WM(13.91 μ mol/(m² • s)) > WS(9.09 μ mol/ $(m^2 \cdot s)) > WF(6.43 \ \mu mol/(m^2 \cdot s)) > RM(4.56$ μ mol/(m² • s)),且不同处理间平均土壤 CO₂ 排放 通量存在极显著差异(P<0.01)。这可能与前茬作 物的施肥水平有关,施肥量越大,CO2 排放越强[22], 也与作物根系呼吸强度有关^[18]。WM 处理土壤 CO₂ 排放通量一直最高,其波动范围是 11.42~15.92 µmol/(m² • s),分别与WS、WF和RM处理存在显著 差异(P<0.05); RM 处理 CO2 排放通量一直最低,其 变化范围为 1.74~6.81 μmol/(m² • s), 且与 WM 和 WS处理存在显著差异(P<0.05)。不同处理土壤 CO₂ 排放通量峰值出现的时间不同,其中 WF 和 WM 处理 CO₂ 排放通量分别在 03-26 和 04-06 出现最低 值,分别为 4.30 和 11.42 µmol/(m² • s),在 5 月中下 旬出现最高值,分别为 8.61 和 15.92 μmol/(m² • s); WS和RM处理在03-26出现最低值,分别为6.60和 1.74 μmol/(m² • s),在 06-07 出现最高值,分别为 10.39 和 6.81 μ mol/(m² • s)。



Fig. 1 Variation of soil CO_2 emission fluxes under different crop rotation modes

variation of son CO₂ emission nuxes under unterent crop rotation mod

during winter wheat and winter rape growth period

2.2 冬小麦和冬油菜不同轮作方式下土壤温度的 变化

由图 2 可知,不同处理土壤温度随时间变化表

现出明显规律,随着气温升高,土壤温度受到较大影响,整体表现为先上升后下降再上升的趋势。从03-26开始,土壤温度持续上升,在05-08到达第1个高

峰,由于5月中旬降雨量较大,土壤温度有所降低, 之后土壤温度迅速上升直至作物收获。在观测期, WF、WM、WS和RM处理土壤温度的最高值均出 现在06-07,分别为20.48,21.95,21.70和21.03 ℃,最低值出现在03-26,分别为8.10,8.35,12.18 和 9.38 ℃。整个观测期,4 种轮作方式土壤温度的 平均值表现为 WS(17.17 ℃)>RM(15.58 ℃)> WM(15.35 ℃)>WF(14.49 ℃)。WF 处理土壤温 度一直最低,平均温度分别比 WM、WS 和 RM 处理 低 0.86,2.68 和 1.09 ℃。



图 2 冬小麦和冬油菜生长季不同轮作方式下 0~20 cm 土层土壤温度的变化

Fig. 2 Variation of soil temperature in soil layer of 0 to 20 cm under different crop rotation modes

during winter wheat and winter rape growth period

2.3 冬小麦和冬油菜不同轮作方式下土壤湿度的 变化

由图 3 可知,4 种轮作方式土壤湿度随时间变 化趋势基本一致,整体表现为先下降后上升,从 03-26 开始,随着气温的升高,土壤水分蒸发散失增多, 土壤湿度逐渐下降,直到 5 月中下旬,试验地区降雨 量较大,土壤湿度有所升高。所有处理除 WF 外,其 他处理土壤湿度最高值都出现在 03-26,说明气温对 表层土壤水分有很大影响。整个观测期,WF 处理 平均土壤湿度最高,为 13.28%;其次是 RM 处理, 为 13.18%;WM 和 WS 处理土壤湿度较低,分别为 12.12%和 12.17%。方差分析表明,各处理间平均 土壤湿度差异不显著(P>0.05)。





2.4 土壤 CO₂ 排放与土壤温湿度的关系

由表 1 可知,不同轮作处理条件下,土壤温度与 土壤 CO₂ 排放通量相关性差异很大,但都呈正相关 关系。RM 处理各土层温度和 0~20 cm 平均土壤 温度与土壤 CO₂ 排放通量呈极显著正相关(P < 0.01);WS 处理 10,15 和 20 cm 土层温度以及 0~ 20 cm 平均土壤温度与土壤 CO₂ 排放通量呈显著 (P < 0.05)或极显著正相关(P < 0.01);WF 和 WM 处理土壤温度与 CO₂ 排放通量相关性不显著。不 同轮作处理土壤温度与土壤 CO₂ 排放通量相关性 随土层深度变化存在差异,RM 处理土壤 CO₂ 排放 通量与 10 和 15 cm 土层土壤温度相关性最好,相关 系数都是 0.995; WS 处理土壤 CO₂ 排放通量与 10 cm 土层温度相关性最好,相关系数为 0.980; WM 处理土壤 CO₂ 排放通量与 15 cm 土层温度,以及 WF 处理土壤 CO₂ 排放通量与 20 cm 土层温度相关 性最好,相关系数分别为 0.704 和 0.672; RM、WS 和 WM 处理土壤 CO₂ 排放通量都与 5 cm 土层温度 相关性最差,相关系数分别为 0.923, 0.238 和 0.588; WF 处理土壤 CO₂ 排放通量与 15 cm 土层温 度相关性最差,相关系数为 0.589。4 种轮作方式下 0~20 cm 平均土壤温度与土壤 CO₂ 排放通量相关 性表现为 RM>WS>WM>WF。

表 1 冬小麦和冬油菜生长季不同轮作方式下土壤 CO2 排放通量与不同土层土壤温度的关系

Table 1 Correlation coefficients of soil CO₂ emission fluxes and soil temperature at different soil layers under different crop rotation modes during winter wheat and winter rape growth period

处理		不同土层土壤温度	€ Soil temperature unde	er each soil layer	
Treatment	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	$0\!\sim\!20~{\rm cm}$
WF	0.600	0.636	0.589	0.672	0.629
WM	0.588	0.641	0.704	0.682	0.682
WS	0.238	0.980**	0.878**	0.870*	0.936 * *
RM	0.923 * *	0.995**	0.995**	0.992**	0.994 * *

注:"*"表示显著相关,"**"表示极显著相关。下表同。

Note: "*" shows significant correlation, while "* *" shows extremely significant correlation. The same below.

由表 2 可知,不同轮作处理土壤湿度与土壤 CO₂ 排放通量的相关性差异比较明显。4 种轮作方 式中,WM、WS和 RM 处理土壤湿度与土壤 CO₂ 排 放通量均呈负相关。WM 和 WS 处理 10~20 和 20~30 cm 土层湿度以及 0~30 cm 平均土壤湿度 与 CO₂ 排放通量呈显著负相关; RM 处理 20~30 cm 土层湿度和 0~30 cm 平均土壤湿度分别与 CO₂ 排放通量呈极显著和显著负相关,相关系数分别为 -0.948 和-0.793。不同处理土壤 CO₂ 排放通量 与土壤湿度的相关性不一致,WF、WS 和 RM 处理 土壤 CO₂ 排放通量与 20~30 cm 土层土壤湿度相 关性最好,相关系数分别为 0.518,-0.852 和 -0.948;WM 处理土壤 CO₂ 排放通量与 10~20 cm 土层土壤湿度相关性最好,相关系数为-0.768。4 个处理 0~30 cm 平均土壤湿度与土壤 CO₂ 排放通 量相关性表现为 WM>RM>WS>WF。

表 2 冬小麦和冬油菜生长季不同轮作方式下土壤 CO2 排放通量与不同土层土壤湿度的关系

Table 2 Correlation coefficients of soil CO2 emission fluxes and soil moisture at different soil layers

	under diff	erent crop	rotation	modes	during	winter	wheat	and	winter	rape	growth	period
--	------------	------------	----------	-------	--------	--------	-------	-----	--------	------	--------	--------

处理		不同土层土壤湿度 Soil mo	isture under each soil layer	
Treatment	$0 \sim 10 \text{ cm}$	$10\!\sim\!20~{ m cm}$	$20\sim\!30~\mathrm{cm}$	$0\sim 30$ cm
WF	0.348	0.102	0.518	0.500
WM	-0.611	-0.768*	-0.763*	-0.805*
WS	-0.428	-0.806*	-0.852*	-0.783*
RM	-0.572	-0.548	-0.948**	-0.793*

3 讨 论

3.1 轮作方式对土壤 CO₂ 排放的影响

本研究中,4 种轮作处理条件下土壤 CO₂ 排放 规律基本相同,都是在测量初期(3-4 月)较低,成 熟期或接近成熟期(5-6 月)出现高峰值,这可能与 土壤温度对土壤 CO₂ 排放影响有很大关系,在一定 范围内,随着温度升高,土壤 CO₂ 排放增强^[23]。在 温度较低时,随着温度升高,土壤 CO₂ 排放增大,且 温度也会通过影响根的生长间接影响 CO₂ 排放。 在测量初期,地下分配的碳主要用于根系构建,而成 熟期地下分配的碳大部分通过根系呼吸或根系沉淀 物损失^[24],因此成熟期根系呼吸明显高于测量初 期。本研究中,平均土壤 CO₂ 排放通量表现为冬小 麦-夏玉米>冬小麦-夏大豆>冬小麦-夏闲>冬油 菜-夏玉米,这可能与前茬作物的施肥水平有关,冬 小麦-夏玉米轮作方式下的夏玉米生长季施肥量最 大,其次是冬小麦-夏大豆轮作方式,夏闲田未施肥。 这与吕佩毓等[22]的研究结果一致。较大的施肥量 促进作物的生长,作物生长速率越高,呼吸也越强。 此外,施肥还会影响地面残茬的分解从而影响土壤 微生物的呼吸,对土壤 CO2 排放造成影响。由于本 试验是在免耕条件下进行,作物收获后根系留在土 壤中,根系腐烂分解产生 CO2 对后茬作物土壤呼吸 造成影响,夏玉米地下生物量最大,其次是夏大豆, 夏闲期地下生物量为零。农田种植小区的土壤呼吸 包括植物根呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸 以及含碳物质化学氧化作用的过程。冬油菜-夏玉 米轮作方式的施肥量虽与冬小麦-夏玉米轮作方式 相同,但冬油菜植株间距较大,单位面积根系数量 少,根系呼吸对土壤呼吸的贡献率较低,而根系呼吸 在土壤呼吸中占重要地位[18],因此冬油菜-夏玉米 轮作方式下土壤 CO2 排放通量较低。

3.2 土壤温湿度对土壤 CO₂ 排放的影响

本研究中,不同轮作方式下,土壤温度与土壤 CO2 排放通量均呈正相关关系,且部分土层温度与 土壤 CO2 排放通量相关性达显著或极显著水平,这 与张俊丽等[25]的研究结果一致。土壤温度是影响 土壤呼吸的关键因子,几乎影响呼吸过程的各个方 面,在温度较低时呼吸速率随着温度的升高呈指数 增加,在一定温度时达到最大值,然后随着温度增加 呼吸速率开始下降。本研究中,冬小麦-夏玉米、冬 小麦-夏大豆和冬油菜-夏玉米处理土壤 CO2 排放通 量与 5 cm 土层土壤温度相关性最差。而江晓东 等^[8]则认为,土壤呼吸速率与5 cm 土层土壤温度相 关性最大,这可能是由于试验地区气候差异以及土 壤理化性质或农田处理措施不同所致。刘合明 等[26]研究认为,土壤湿度在最低或最高的情况下会 抑制土壤呼吸。本研究中,冬小麦-夏玉米、冬小麦-夏大豆和冬油菜-夏玉米处理 20~30 cm 土层土壤 湿度与土壤 CO₂ 排放通量相关关系均显著,冬小 麦-夏闲处理土壤温度和湿度与土壤 CO₂ 排放通量 的相关性均不显著,这主要是由于夏闲田土壤在夏 闲期未被扰动,土壤理化性质和团粒结构相对稳定, 农田管理措施和环境因子对其影响较小,土壤温湿 度对土壤呼吸的影响较弱,因此土壤温湿度与土壤 呼吸的相关性较小。由于本研究是长期定位试验, 关于轮作方式对土壤呼吸机理以及土壤温湿度与土 壤呼吸关系的研究将在后续工作中进一步补充完善,以期为关中地区农田固碳减排体系的构建提供 理论依据。

4 结 论

1)4 种轮作处理土壤 CO₂ 排放具有明显规律, 从 03-26 到 5 月中旬整体呈先上升再下降的趋势,5 月中旬之后整体略有下降。平均 CO₂ 排放通量表 现为冬小麦-夏玉米>冬小麦-夏大豆>冬小麦-夏 闲>冬油菜-夏玉米,且不同处理间平均土壤 CO₂ 排放存在极显著差异(*P*<0.01)。冬油菜-夏玉米轮 作方式下土壤 CO₂ 排放通量最小,有利于农田温室 气体固碳减排,对全球气候变化具有缓解作用。

2)冬小麦-夏闲轮作平均土壤温度最低,平均土 壤湿度最高,且土壤温湿度与土壤 CO₂ 排放的相关 性最小,而冬油菜-夏玉米轮作和冬小麦-夏玉米轮 作土壤温度和湿度与土壤 CO₂ 排放通量的相关性 最大,说明适宜的土壤温湿度更有利于增强冬油菜-夏玉米和冬小麦-夏玉米土壤呼吸,而对冬小麦-夏 闲处理土壤呼吸的影响较小。

[参考文献]

- [1] Parkin T B.Kaspar T C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss
 [J]. Soil Science Society America Journal, 2003, 67:1763-1772.
- [2] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases [J]. Fertilizer Research, 1994, 38: 151-163.
- [3] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle [J]. American Scientist, 1990, 78: 310-326.
- [4] 袁道先."岩溶作用与碳循环"研究进展 [J].地球科学进展, 1999,14(5):425-432.
 Yuan D X. Progress in the study on karat processes and carbon cycle [J]. Advance in Earth Science, 1999,14(5):425-432. (in Chinese)
- [5] 姜 勇,庄秋雨,梁文举.农田生态系统土壤有机碳库及其影响 因子 [J].生态学杂志,2007,26(2):278-285.
 Jiang Y,Zhuang Q L,Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology,2007,26(2):278-285. (in Chinese)
- [6] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 70:103-116.
- [7] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context [J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3):229-236.
- [8] 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(2):253-256.
 Jiang X D, Chi S J, Ning T Y, et al. Effects of minimum tillage and no-tillage patterns on soil respiration [J]. Journal of Soil

and Water Conservation, 2009, 23(2): 253-256. (in Chinese)

- [9] 张 字,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(4):47-53. Zhang Y,Zhang H L,Chen J K,et al. Effects of different tillage practices on CO₂ emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(4):47-53. (in Chinese)
- [10] 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(1):273-278.
 Yu A Z, Huang G B, Chai Q. Effect of different tillage treatments on soil respiration of winter-wheat farmland in oasis irrigated area Northwest China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012,21(1):273-278. (in Chinese)
- [11] 郝旺林,梁银丽,吴 兴,等.不同前茬冬小麦土壤呼吸特征及 影响因子分析 [J].环境科学,2011,32(11):3167-3173.
 Hao W L,Liang Y L, Wu X, et al. Soil respiration variations in winter wheat field in different previous crops and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2011, 32 (11): 3167-3173. (in Chinese)
- [12] 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(1): 79-86.
- [13] 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(1/2): 205-211.
- [14] 孟凡乔,关桂红,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 (6):992-999.

Meng F Q,Guan G H,Zhang Q Z, et al. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2006,26(6):992-999. (in Chinese)

- [15] 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(11):2649-2655.
 Chen Q S,Li L H, Han X G, et al. Acclimatization of soil respiration to warming [J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(11): 2649-2655. (in Chinese)
- [16] 屈 冉,李俊生,罗遵兰,等. 土壤微生物和有机酸对土壤呼吸 速率的影响 [J]. 水土保持学报,2010,24(11):242-245.
 Qu R,Li J S,Luo Z L, et al. Influence of soil microbial and organic acids on soil respiration rates [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(11):242-245. (in Chinese)
- [17] 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(7):842-849.

Li W, Zhang J B, Zhang C Z. Effects of straw incorporation and N fertilization on soil respiration during maize (*Zea mays* L.) growth in Huanghuaihai Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 842-849. (in Chinese)

[18] 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(5):2551-2559.

Gao H Y,Guo S L,Liu W Z,et al. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(5):2551-2559. (in Chinese)

- [19] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展
 [J]. 地球科学进展,2005,20(7):778-785.
 Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. Advances in Earth Science,2005,20(7):778-785. (in Chinese)
- [20] 王 旭,周广胜,蒋延玲,等.山杨白桦混交次生林与原始阔叶 红松林土壤呼吸作用比较[J].植物生态学报,2007,31(3): 348-354.

Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, et al. Soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *Populus davidiana*) secondary forest and primary broad-leaved korean pine forest [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 348-354. (in Chinese)

- [21] 刘 爽,严昌荣,何文清,等.不同耕作措施下旱作农田土壤呼吸及其影响因素[J].生态学报,2010,30(11):2919-2924.
 Liu S, Yan C R, He W Q, et al. Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11):2919-2924. (in Chinese)
- [22] 吕佩毓,柴 强,李 广.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(11):1919-1923.
 Lü P Y, Chai Q, Li G. Effects of fertilizing nitrogen levels on soil respiration during growing season in maize field [J]. Pratacultural Science,2011,28(11):1919-1923. (in Chinese)
- [23] 唐燕飞.下蜀次生栎林和人工火炬松林土壤呼吸动态变化研究[D].南京:南京林业大学,2006.
 Tang Y F. Dynamics of soil respiration in an oak secondary forest and a pine plantation in southeastern China [D]. Nan-jing:Nanjing Forestry University,2006. (in Chinese)
- [24] Domanski G,Kuzyakov Y, Siniakina S V, et al. Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*) [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001, 164: 381-387.
- [25] 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 J L,Sikander K T,Wen X X,et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(18):192-199. (in Chinese)

[26] 刘合明,刘树庆.不同施氮水平对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 通量的影响 [J]. 生态环境,2008,17(3):1125-1129.
Liu H M, Liu S Q. Effect of different nitrogen levels on soil CO₂ fluxes of winter wheat in north China plain [J]. Ecology and Environment,2008,17(3):1125-1129. (in Chinese)