

# 长期施肥对春玉米田土壤呼吸及碳平衡的影响研究

程万莉<sup>1</sup>, 雷康宁<sup>2</sup>, 王淑英<sup>1</sup>, 李利利<sup>3</sup>, 樊廷录<sup>1</sup>, 李尚中<sup>1</sup>,  
赵刚<sup>1</sup>, 张建军<sup>1</sup>, 唐小明<sup>1</sup>, 党翼<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>

(1. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所/甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 甘肃 兰州 730070;  
2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 平凉市农业科学院, 甘肃 平凉 744500)

**摘要:**为探讨不同施肥方式下农田碳平衡规律, 研究农田排放到大气 CO<sub>2</sub> 的“源”、“汇”特征, 依托 39 a 肥料定位试验测定了秸秆和氮磷肥配施(SNP)、农家肥和氮磷肥配施(MNP)、单施农家肥(M)、氮磷肥配施(NP)、单施氮肥(N)和不施肥(CK)等6种不同施肥方式下西北黄土旱塬春玉米拔节期到成熟期的土壤呼吸。结果表明:长期不同施肥方式能够影响春玉米农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放, 不同生育时期排放特征不同, 呈先升高后下降趋势, 即开花期达到排放高峰, SNP、MNP 和 M 的 CO<sub>2</sub> 排放通量分别达到 3 650.54、2 980.50 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> 和 2 167.61 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 与 CK 相比, 分别增加了 340.32%、259.51% 和 161.45%。不同施肥处理间表现为 SNP>MNP>M>NP>N>CK。整个测定时期内土壤 CO<sub>2</sub> 平均排放速率表现为 SNP>MNP>M>NP>N>CK, 土壤呼吸中根系呼吸的贡献率波动在 31%~77% 之间。6 种不同施肥处理农田土壤均表现为大气 CO<sub>2</sub> 排放的“汇”, 不同施肥处理农田碳汇强弱不同, 表现为 SNP>M>MNP>NP>N>CK。

**关键词:**春玉米; 施肥方式; CO<sub>2</sub> 排放; 碳平衡; 长期定位试验

**中图分类号:**S147.21<sup>+</sup>1; S513 **文献标志码:**A

## Effects of long-term fertilization on soil respiration and carbon balance in spring corn fields

CHENG Wan-li<sup>1</sup>, LEI Kang-ning<sup>2</sup>, WANG Shu-ying<sup>1</sup>, LI Li-li<sup>3</sup>, FAN Ting-lu<sup>1</sup>, LI Shang-zhong<sup>1</sup>,  
ZHAO Gang<sup>1</sup>, ZHANG Jian-jun<sup>1</sup>, TANG Xiao-ming<sup>1</sup>, DANG Yi<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>

(1. *Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Efficient Water Utilization in Dryland Farming of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China;*  
2. *College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;*  
3. *Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang, Gansu 744500, China*)

**Abstract:** A field experiment was carried out to explore fertilization effects on soil CO<sub>2</sub> emission, relative contribution of root and soil respiration and carbon balance, and carbon respiration intensity during the period of spring corn jointing to maturity. The effects of different fertilizer applications: straw and chemical fertilizer (SNP), manure and chemical fertilizer (MNP), single manure (M), nitrogen and phosphorus fertilizer (NP), single nitrogen fertilizer(N), and no fertilizer (CK) on soil respiration were analyzed based on long-term fertilization experiment of 39 years. The results showed that soil CO<sub>2</sub> emission was significantly affected by different fertilization techniques. It showed a considerable fluctuation with the growth stages, which was in hoisting until reached the peak in anthesis and dropping during the following period. The CO<sub>2</sub> emission of SNP, MNP and N was 3 650.54, 2 980.50 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> and 2 167.61 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, respectively. Compared with CK, the increases were 340.32%, 259.51% and 161.45% for SNP, MNP and N, respectively. The order of average soil CO<sub>2</sub> emission rates were SNP

收稿日期:2018-02-03

修回日期:2019-01-23

基金项目:国家自然科学基金(41561067);国家重点研发计划(2016YFD0300110);国家玉米产业体系(CARS-02-66);甘肃省农业科学院中青年基金(2017GAAS71)

作者简介:程万莉(1989-),女,甘肃靖远人,研究实习员,主要从事农田土壤地力培肥及节水研究。E-mail:chwli@163.com

通信作者:樊廷录(1964-),男,甘肃临洮人,研究员,主要从事旱作节水农业及栽培生理研究。E-mail:Fantinglu3394@163.com

>MNP>M>NP>N>CK. The contribution ratio of rhizosphere respiration to total soil CO<sub>2</sub> emission was fluctuated from 31% to 77%. Therefore, soils were sinks of atmosphere CO<sub>2</sub> under all fertilization, but impact intensity on the carbon sink varied and in an order of SNP>M>MNP>NP>N>CK.

**Keywords:** spring corn; fertilization mode; CO<sub>2</sub> emission; carbon balance; long-term positioning test

CO<sub>2</sub> 作为重要的温室气体,对温室效应的贡献率为 60%<sup>[1]</sup>。农业土壤作为陆地碳循环中最大的碳库,具有巨大的碳截获潜力<sup>[2]</sup>。土壤呼吸是绿色植物将光合作用固定的 CO<sub>2</sub> 分解后又释放返回大气的主要途径,是农业生产增加大气 CO<sub>2</sub> 浓度的关键生态学过程。因此在全球气候变暖的当下土壤呼吸备受科研人员关注。

土壤呼吸包括根系呼吸和微生物呼吸两个部分<sup>[3]</sup>,但由于无法有效地区分纯根系呼吸和根际微生物呼吸,该方面研究尚不成熟。现有研究将土壤呼吸简单地分为由光合产物控制的根系呼吸和由土壤有机质控制的土壤微生物异养呼吸。这两种呼吸方式因代谢底物不同,对土壤呼吸和全球变暖的贡献也不同<sup>[4]</sup>。农田生态系统中已有相关研究主要集中于不同作物、不同耕作方式和单一环境因素作用下根系呼吸对土壤呼吸的贡献<sup>[5-8]</sup>,对于不同施肥方式对根系呼吸的研究也主要是基于短期试验,而基于长期肥料定位试验研究植株存在下对根系及土壤呼吸影响方面的文献相对较少。本文利用静态箱-根去除法相结合测定长期不同施肥方式下土壤 CO<sub>2</sub> 排放动态变化,探讨根系呼吸对土壤呼吸的贡献,计算不同施肥方式下的碳平衡。旨在说明不同施肥方式下的农田土壤固碳能力的差异,为建立合理的施肥制度,提高西北黄土高原区农田土壤固碳潜力提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验依托位于黄土高原东部半湿润偏旱区甘肃省平凉市泾川县高平镇境内(107°30'E,35°16'N)的长期定位试验进行。该区地势平坦,年均气温 8℃,≥10℃积温 2 800℃,无霜期约 170 d,海拔 1 150 m,年降水量 540 mm,主要集中在 7、8、9 月

份,年蒸发量 1 380 mm。光热资源丰富,雨热同期。为典型的一年一熟农作区。

长期定位试验开始于 1979 年,试验共设 6 个处理:不施肥-CK;单独施用氮肥-N(90 kg·hm<sup>-2</sup>);氮磷肥配施-NP(N 90 kg·hm<sup>-2</sup>+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>);秸秆和氮磷肥配施-SNP(S 3 750 kg·hm<sup>-2</sup>+N 90 kg·hm<sup>-2</sup>+每隔一年施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>);农家肥-M(75 t·hm<sup>-2</sup>);农家肥和氮磷肥配施-MNP(M 75 t·hm<sup>-2</sup>+N 90 kg·hm<sup>-2</sup>+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>)。每个处理为一个大区,面积 666.7 m<sup>2</sup>,顺序排列,大区与大区之间用水泥砌成隔离带;每个大区再划分为 3 个小区,每小区 220 m<sup>2</sup>,顺序排列,作为重复。农家肥和磷肥在作物播前全部基施,施用的磷肥是过磷酸钙;氮肥为尿素,氮肥施用 60%基肥+40%追肥;还田秸秆为该区当季种植作物秸秆。试验采用 4 年冬小麦-2 年春玉米的一年一熟轮作制,供试土壤为覆盖黑垆土,质地为壤土,试验前(1978 年秋季)0~20 cm 土壤理化性状见表 1。本试验于 2017 年春玉米季进行,供试玉米品种为五谷 704,种植密度为 5.5 株·m<sup>-2</sup>。

### 1.2 取样及测定方法

1.2.1 气体测定 气体测定在玉米拔节期、开花期、灌浆期和生理成熟期进行,共 4 次。每次测定均在上午 9:00-11:00 进行。CO<sub>2</sub> 排放通量采用静态箱法测定,将底座插入到 5 cm 深的土壤中,每区固定 2 个,一个套入一株长势均匀的植株,随生育期进程增加箱体数量进行测定,另一个固定于无植株的裸地上,固定后不再挪动。取样箱垂直固定在底座凹槽内,并给底座凹槽中注入适量水(保证气密性,使箱内气体不与外界空气发生气体交换),静态箱由深色不透光 PVC 板制成,箱体体积为 50 cm×50 cm×50 cm。箱体内置温度感应器和风扇,采样前用水银温度计校准各静态箱温度。固定好箱体后

表 1 试验地基本土壤化学特性

Table 1 Basic chemical properties of soil

处理	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> ) OM	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total N	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total P	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Alkeline-N	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Olsen-P	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Avail. K
CK	10.5	0.95	0.57	60	7.2	165
N	10.4	0.95	0.59	72	7.5	168
NP	10.9	0.94	0.56	68	6.6	162
SNP	11.1	0.97	0.57	78	5.8	164
M	10.8	0.95	0.58	65	6.5	160
MNP	10.8	0.94	0.57	74	7.0	160

用三通阀连接好取样口、注射针筒和气袋,打开风扇开关,使箱体内气体混合均匀。分别在扣好箱体的 0、7、14、21、28 min 各采集气体一次,每次抽取 60 mL 于提前抽好真空的气袋中。气体样品由甘肃省水资源高效利用重点实验室在 5 d 内完成测定。采集气体样品的同时读取相应箱体内的温度和 5 cm 处地温。

CO<sub>2</sub> 气体样品用气相色谱仪(美国安捷伦 7890B)测定。采用单阀单柱进样分离系统,用氢火焰离子检测器(FID),工作温度为 200℃,内径为 2 mm×1 mm;CO<sub>2</sub> 样品随载气 N<sub>2</sub> 经过 Ni 催化,在 375℃ 下被 H<sub>2</sub> 还原为 CH<sub>4</sub> 后再经过 Porapak Q 填充柱分离测定,柱箱温度为 70℃。每次测定前使用标准气体进行标定,测定相对误差 ≤1.5%。

CO<sub>2</sub> 气体排放通量  $F$  计算公式如下:

$$F = \frac{C_2 \times V \times M_0 \times 273/T_2 - C_1 \times V \times M_0 \times 273/T_1}{A \times (t_2 - t_1) \times 22.4 \times 10^{-3}} \times 1000$$

式中, $F$  为 CO<sub>2</sub> 气体排放通量(mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>); $A$  为取样箱底面积(m<sup>2</sup>); $V$  为体积(m<sup>3</sup>); $M_0$  为气体分子量; $C_1$ 、 $C_2$  分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温室气体的体积浓度(mg·g<sup>-1</sup>); $T_1$ 、 $T_2$  分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温度(K); $t_1$ 、 $t_2$  为测定开始和结束时间(h)。

1.2.2 农田小区碳平衡计算 农田小区生态系统碳平衡水平通常用净生态系统生产力  $NEP$  (Net ecosystem productivity) 表示。 $NEP$  为净初级生产力  $NPP$  (Net primary productivity) 与土壤微生物异养呼吸碳释放量 (Carbon emission of soil microbial heterotrophic respiration,  $R_m$ ) 的差值<sup>[9]</sup>。一般认为地上部与地下部根的生物量之和为作物的  $NPP$ 。据已有研究,本文假定玉米通过光合作用合成 1 g 有机质需要固定碳为 0.47 g<sup>[10]</sup>,由此可知  $NPP$  的固碳量。据估算, $R_m$  为不同施肥处理下相应无植株裸地上土壤碳释总量 (Total soil carbon emission,  $R_s$ ) 乘以转换系数 0.865<sup>[11]</sup>。即  $NEP = NPP - R_m$ ;  $R_m = R_s \times 0.865$ 。

当  $NEP > 0$  时,表示该农田系统为 CO<sub>2</sub> 的吸收“汇”;反之,则为 CO<sub>2</sub> 的排放“源”。

1.2.3 其他指标的测定 在成熟期各小区取玉米植株 2 株,挖取植株下土壤 (30 cm×30 cm×35 cm),挑取玉米根系,用水冲洗干净,将植株地上部分和根系鲜样在 105℃ 下杀青,然后 80℃ 烘至恒重。用

单株玉米的生物量乘以种植密度即为整个小区玉米的生物量。全区收获进行测产。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥方式农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放动态变化

春玉米生长期间,各施肥处理 5 cm 地温变化规律相同,整体呈先升高后降低的趋势(图 1A)。测定期地温变化幅度在 16.1~28.5℃ 之间。不同生育时期 N、NP、SNP、M、MNP 和 CK 在 5 cm 处平均地温为 21.4℃、21.53℃、23.13℃、22.38℃、22.95℃ 和 20.48℃。

通过对长期定位施肥植株参与下土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的测定可看出(图 1B),不同施肥方式下春玉米田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与 5 cm 处地温呈现出相似的变化趋势,即从拔节期到成熟期均为先升高后下降。拔节期开始,由于长期不同施肥和地温升高的影响,土壤 CO<sub>2</sub> 排放量呈逐渐上升的趋势。到开花期,不同处理 CO<sub>2</sub> 排放通量均达到最大值,处理 SNP、MNP 和 M 的 CO<sub>2</sub> 排放通量分别达到 3 650.54、

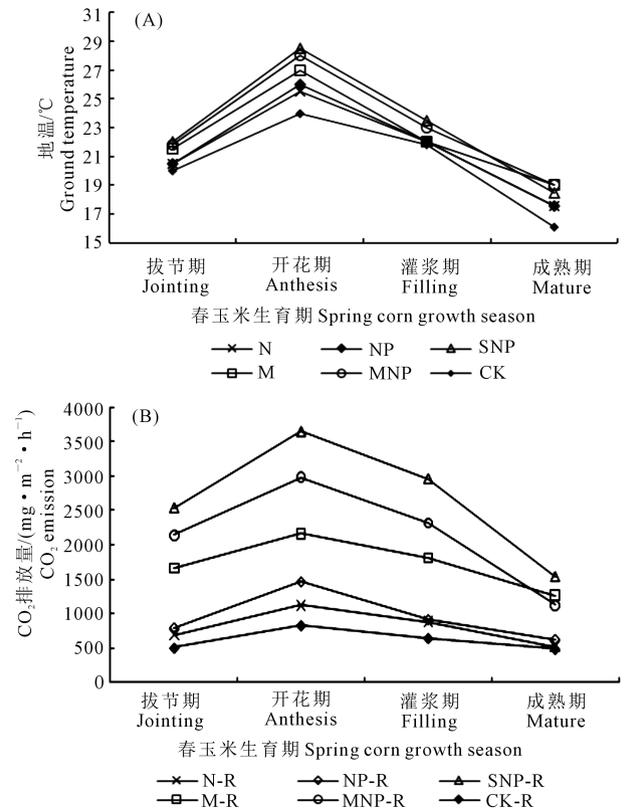


图 1 不同施肥方式农田春玉米存在条件下地温 (A) 和土壤 CO<sub>2</sub> 排放 (B) 动态变化

Fig.1 Dynamics of ground temperature (A) and soil CO<sub>2</sub> emission (B) under different fertilizer applications on spring corn fields

2 980.50 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> 和 2 167.61 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 显著高于单施化肥和不施肥处理, 与 CK 相比, 分别增加了 340.32%、259.51% 和 161.45%。不同施肥处理间表现为 SNP>MNP>M>NP>N>CK。这是由于长期施用有机类肥料可改善土壤理化性状, 提高土壤生物活性, 促进土壤有机质的矿化, 增加土壤 CO<sub>2</sub> 排放量。有机类肥料与化学氮磷肥配施, 调控了土壤碳氮比, 较单独施用有机类肥料更有利于土壤有机质矿化。

不同施肥方式下裸地农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放也具有相似的变化规律(图 2), 即呈现先升高后降低的变化趋势, 6 种施肥处理下排放量最高值均出现在开花期。与春玉米田总土壤呼吸量相比, 不同施肥处理下裸地农田系统 CO<sub>2</sub> 排放量显著降低。从 CO<sub>2</sub> 排放平均速率上比较, 从拔节期到生理成熟期种植春玉米土壤与裸地农田相比, 不同施肥处理农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放量增加了 43.21%~54.43%。

## 2.2 长期不同施肥方式下作物根系呼吸变化

在忽略植物生长对土壤有机质分解的激发作用时, 利用种植春玉米的土壤呼吸值(SR)减去相应处理不种植春玉米时的土壤呼吸值, 即可得到相应处理的植物根系呼吸量(Rr), 如表 2 所示。根系呼

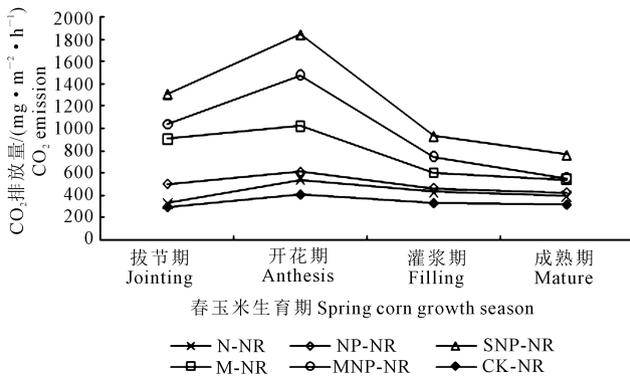


图 2 不同施肥方式下裸地土壤 CO<sub>2</sub> 排放变化规律

Fig.2 Dynamics of soil CO<sub>2</sub> emission of bared soil under different fertilizer applications

表 2 春玉米生育期不同施肥方式下农田土壤呼吸

Table 2 Soil respiration during spring corn growth season under different fertilization methods

处理 Treatment	拔节期 Jointing		开花期 Anthesis		灌浆期 Filling		成熟期 Mature	
	Rr	Rr/SR/%	Rr	Rr/SR/%	Rr	Rr/SR/%	Rr	Rr/SR/%
N	361.17	41.79	586.92	50.31	454.47	48.75	124.31	23.92
NP	287.91	44.79	847.51	50.46	442.49	51.27	195.70	31.30
SNP	1222.91	52.28	1800.94	57.98	2024.89	68.38	763.69	49.92
M	741.44	48.20	1139.41	51.88	1198.19	66.41	708.89	56.46
MNP	1100.47	51.46	1499.37	52.57	1568.86	67.79	568.03	50.65
CK	211.95	36.17	418.32	49.33	315.38	48.52	173.75	35.50

注: Rr 表示根系呼吸; SR 表示土壤呼吸值。

Note: Rr: Rhizosphere respiration; SR: Soil respiration.

吸量占土壤呼吸的比值即可反映出植物光合产物在土壤呼吸中的作用<sup>[12]</sup>。

拔节期到成熟期, 不同施肥处理下春玉米植株存在根系对土壤呼吸的贡献率波动在 31.62%~76.08%, 此时随着温度升高, 降雨量增加, 作物处于快速生长期, 植物根系活性提高, 故而根系呼吸增强。不同生育时期表现为在灌浆期达到最高, 成熟期降为最低, 这是由于根系呼吸与光合作用是对立统一关系, 灌浆期光合作用最强, 合成有机碳类产物增多, 根系呼吸反过来通过消耗部分光合作用的产物, 为光合作用提供反应所需底物, 保证光合作用的顺利进行。同一生育时期不同施肥处理间根系呼吸变化不同, 除成熟期外, 施用有机肥的处理均表现为 SNP>MNP>M, 且大于单施化肥和不施肥处理。根系呼吸是作物生长呼吸的一部分, 与植株长势密切相关, 不同施肥处理因养分含量不同使作物长势出现差异, 进而影响根系呼吸强度, 导致不同施肥处理间根系呼吸出现差异。

## 2.3 农田碳平衡

不同施肥方式下农田碳平衡计算结果见表 3。结果表明该区域不同施肥方式春玉米拔节期到生理成熟期均表现为土壤的碳“汇”。虽然春玉米生长季农田土壤 CO<sub>2</sub> 的释放总量表现为 SNP>MNP>M>NP>N>CK, 但从碳平衡结果来看, 不同施肥方式下土壤碳汇从强到弱依次为: SNP>M>MNP>NP>CK>N。SNP 处理虽然产量水平高于 M 处理, 但是由于秸秆分解增加了土壤矿化碳释放量, 因此 CO<sub>2</sub> 释放总量较高, 使碳汇强度较弱。施用有机类肥料与单施化学肥料相比, 由于有机类肥料能够改善土壤理化性质, 增强根系生长活力和呼吸, 促进地上部分生长<sup>[13-14]</sup>, 所以较长期单施化肥相比, 表现为既增加了土壤 CO<sub>2</sub> 排放量, 也呈现出较强的土壤碳汇。N 处理由于长期单独施用氮肥, 导致土壤理化性质恶化, 使得作物产量和碳汇强度均低于 CK 处理。

表 3 不同施肥方式下春玉米拔节期-成熟期农田碳平衡

Table 3 Soil carbon balance from jointing to mature of spring corn under different fertilization methods

	N	NP	SNP	M	MNP	CK
产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	4808	7733	9863	9278	9015	4883
地上部生物量 Aboveground biomass/(kg·hm <sup>-2</sup> )	8680	12534	20080	17282	19189	7931
根的生物量 Biomass of root/(kg·hm <sup>-2</sup> )	770	1136	1734	1298	1594	674
NPP/(kg·hm <sup>-2</sup> )	9450	13670	21814	18580	20783	8605
NPP/(kg·hm <sup>-2</sup> )	4257	6158	9826	8369	9362	3876
土壤 CO <sub>2</sub> 释放总量 Total soil CO <sub>2</sub> emission/(kg·hm <sup>-2</sup> )	11771	15240	22773	17028	21711	9887
土壤碳释放总量 Rs/(kg·hm <sup>-2</sup> )	3207	4153	6205	4640	5916	2694
土壤微生物异氧呼吸 C 释放量 Rm/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2774	3592	5367	4013	5117	2330
NEP	1482	2566	4459	4356	4244	1546
NPP/Rs	1.33	1.48	1.58	1.80	1.58	1.44

### 3 讨论

#### 3.1 长期施肥下春玉米田为大气 CO<sub>2</sub> 排放的碳汇

利用静态箱法测得长期施用不同肥料土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量动态,结果表明在春玉米生育期内,种植春玉米的土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量显著高于裸地,不同施肥处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量排序态势与土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率一致。SNP 和 MNP 处理由于长期施用有机肥,提高了土壤有机碳含量,改善了土壤理化和生物学性质<sup>[15]</sup>,而化肥施用可为作物生长提供无机养分,同时能够促进土壤有机碳的分解,尤其是与有机肥配合施用对土壤释放的 CO<sub>2</sub>-C 的累积量具有正的交互作用,化肥增加了土壤潜在矿化碳的总量,有机肥能加快土壤呼吸,促进农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放量,有机无机肥配施加大土壤有机碳矿化速率<sup>[16]</sup>,各处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量大小为:SNP>MNP>M>NP>N>CK。这与乔云发等人<sup>[17-18]</sup>在东北黑土长期施肥上的研究结果一致。有机肥与化肥配施促进了植株生长和根系呼吸,提高了作物生长季土壤呼吸量,反过来又促进了光合作用,增加了作物地上部分和地下部分干物质质量,固定更多碳于作物和土壤碳库中,使春玉米田净初级生产力为正值,土壤 CO<sub>2</sub> 排放的碳汇强于单施化肥和不施肥处理<sup>[11]</sup>,表现为 SNP>M>MNP>NP>N>CK。

#### 3.2 春玉米田土壤呼吸变化比例与土壤呼吸的关系

从春玉米拔节期到成熟期,6 种施肥处理下根系呼吸占土壤呼吸的比例在 23.92%~68.38%之间,平均占比为 49.42%。以往研究平均结果显示,农田生态系统根系呼吸对土壤呼吸的贡献率为 (48±5)%<sup>[19]</sup>,与此结果一致。较之张宪洲<sup>[20]</sup>等人在青裸生态系统测得的 33%~44%波动范围和 40%的平均值,长期定位施肥后根系呼吸排放量占土壤呼吸

的波动范围更广,平均值略高。也高于蔡艳等<sup>[21]</sup>在玉米全生育期测得的根系呼吸对土壤呼吸量为 46%的平均贡献率。出现这一结果主要是因为:(1)与当地的气候条件、土壤类型有关;(2)与作物种类及取样的次数、取样时的环境条件有关。Hanson 等<sup>[22]</sup>认为生态系统中根系呼吸占土壤呼吸的比例变化幅度较大,基本保持在 10%~90%之间。本结果与其一致。这表明可以利用静态箱-根去除相结合研究作物根系呼吸对土壤呼吸的贡献率。综上可知,中国农业土壤具有很大的固碳潜力与容量,农业及其耕地土壤的有机碳固定势必成为我国 CO<sub>2</sub> 减排压力下碳汇的最重要去向。准确估算土壤 CO<sub>2</sub> 的排放量是研究全球气候变化情景下碳循环的基础,而作为土壤呼吸重要组成部分的根系呼吸,因其受土壤质地、作物种类等环境因子影响大,不同生态区和不同作物带农区变幅较大,因此应继续加强和重视土壤 CO<sub>2</sub> 排放观测和分析。

### 4 结论

不同施肥方式下春玉米田拔节期到成熟期土壤 CO<sub>2</sub> 排放平均速率为 SNP>MNP>M>NP>N>CK,无植株参与的土壤呼吸速率变化趋势与其一致。利用根去除法测得 6 种不同施肥处理下春玉米存在对土壤呼吸的贡献率介于 31%~77%之间。由计算结果可知长期不同施肥方式下春玉米田净生态系统生产力均为正值,表现为大气 CO<sub>2</sub> 排放的“汇”,6 种施肥方式下土壤碳汇从强到弱依次为:SNP>M>MNP>NP>N>CK。

#### 参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effects[J]. Science, 1990, 248: 1217-1219.
- [2] 黄承才, 葛嵩. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 324-328.
- [3] Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the pro-

- portion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1970, 2(1): 9-18.
- [4] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Root exerts a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [5] 李凌浩, 王其兵, 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 680-686.
- [6] 陈素英, 胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究[J]. *生态农业研究*, 1997, 5(2): 42-46.
- [7] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦农田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9): 3354-3360.
- [8] 陈书涛, 谷敏, 贾刘敏, 等. 冬小麦返青-拔节期土壤的自养和异养呼吸研究[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 937-944.
- [9] Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [10] Larcher W. *Physiological Plant Ecology* [M]. Berlin: Springer, 2003: 512-513.
- [11] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 156-160.
- [12] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 9-15.
- [13] Xiao Y, Xie G D, Lu C X, et al. The value of gas exchange as a service by rice paddies in suburban Shanghai, P R China[J]. *Agricultural Ecosystems & Environment*, 2005, 109(3-4): 44-46.
- [14] 朱小红. 施肥对农田温室气体排放的影响研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(2): 7-11.
- [15] 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]. *地球科学地展*, 2005, 20(6): 687-692.
- [16] 诸葛玉平, 张旭东, 刘启. 长期施肥对黑土呼吸过程的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 391-394.
- [17] 乔云发, 韩晓增, 苗淑杰. 长期定量施肥对黑土呼吸的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(5): 887-890.
- [18] 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.
- [19] Skopp J, Jawson M D, Doran D W. Steady state aerobic microbial activity as function of soil-water content[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54(6): 1619-1625.
- [20] 张宪洲, 刘允芬, 钟华平, 等. 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[J]. *资源科学*, 2003, 25(5): 103-107.
- [21] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及分组贡献[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4273-4280.
- [22] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.

(上接第107页)

#### 参考文献:

- [1] Huang J k., Hu R F, Cao J M, et al. Training programs and in-the-field guidance to reduce China's overuse of fertilizer without hurting profitability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(5): 165A-167A.
- [2] 杨兴明, 徐阳春, 黄启为, 等. 有机(类)肥料与农业可持续发展 and 生态环境保护[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 925-932.
- [3] 朱敏, 郭志彬, 曹承富, 等. 不同施肥模式对砂姜黑土微生物群落丰度和土壤酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(9): 1693-1700.
- [4] 焦晓光, 魏丹, 隋跃宇. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 698-703.
- [5] 沈德龙, 曹凤明, 李力. 我国生物有机肥的发展现状 & 展望[J]. *中国土壤与肥料*, 2007, (6): 1-5.
- [6] 鲁如坤. “微域土壤学”一个可能的土壤学的新分支[J]. *土壤学报*, 1999, 36(2): 287-288.
- [7] 苏芸. 新疆农业高效节水灌溉技术选择研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- [8] 窦超银, 康跃虎, 万书勤, 等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 44-51.
- [9] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 234-288.
- [10] 关松荫. *土壤酶及其研究法* [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-320.
- [11] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (6): 24-27.
- [12] 徐岩. 有机肥优化土壤微域环境的机制研究[J]. 长春: 吉林农业大学, 2003.
- [13] Benitez E, Melgar R, Sainz H, et al. Enzyme activities in the rhizosphere of pepper (*Capsicum annuum*, L.) grown with olive cake mulches[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 32(13): 1829-1835.
- [14] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续3年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(3): 481-488.
- [15] 于镇华, 李彦生, 金剑, 等. 不同施肥措施对农田黑土剖面土壤酶活性特征的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(3): 276-283.
- [16] 刘淑英. 不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 222-223.
- [17] 施娴, 刘艳红, 王田涛, 等. 有机肥与烟草专用肥配施对植烟土壤微生物和土壤酶活性的动态变化[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1126-1131.
- [18] 战厚强. 水稻秸秆还田对土壤酶活性及土壤养分的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [19] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2208-2212.
- [20] 何倩, 罗莉, 李俊华, 等. 滴灌水分驱动穴施鸡粪对土壤酶活空间分布的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (1): 114-121.