

长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响

吴瑞娟^{1,2}, 王迎春², 朱平³, 贺美², 黄诚诚², 王立刚^{2*}, 张凤路¹

(1 河北农业大学农学院, 河北保定 071000; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统联合实验室, 北京 100081;

3 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林长春 130033)

摘要:【目的】探究不同施肥措施对土壤呼吸的影响, 为我国东北黑土区固碳减排研究提供科学依据。【方法】本研究基于“国家黑土肥力与肥料效益监测基地”长期定位试验, 选取不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、化肥配施秸秆(NPKS)、化肥配施低量有机肥(NPKM1)、化肥配施高量有机肥(NPKM2)5个不同施肥处理。采用 Soil-box343 土壤呼吸测量系统进行野外监测, 并同时观测环境条件。【结果】长期不同施肥处理下, 农田土壤呼吸速率变化范围为 4.12~7.23 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 随玉米生长表现出“先升高后降低”的季节变化特征, 最高值出现在播种后 69 天左右, NPKM2 处理土壤呼吸速率的峰值显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。监测期内土壤呼吸速率与土壤温度之间呈现显著的正相关关系, 土壤温度可以解释土壤呼吸速率变异的 41%~77%, 土壤温度敏感系数 Q_{10} 值的变化范围 2.35~3.49。春玉米生长季内农田土壤呼吸总量变化范围为 3473~5643 kg/hm^2 , NPKS 处理显著高于 CK 处理 34.2%, 而 NPKM2 处理分别比 NPKS、NPK 和 CK 处理高 21.0%、26.4%、62.4% ($P < 0.05$), 长期有机无机肥配施处理土壤有机碳含量增加趋势比其他处理明显, 截止到 2016 年, NPKM1 和 NPKM2 处理 SOC 较初始 SOC 分别增加了 6.01 g/kg 和 5.55 g/kg。【结论】长期施用有机肥能够增加土壤呼吸, 提高土壤有机碳含量, 有利于农田生产力提高和农田可持续利用。

关键词: 黑土; 化肥; 有机肥; 秸秆; 土壤呼吸; 土壤有机碳

Effects of long-term fertilization on soil respiration in spring maize field in the central part of northeast China

WU Rui-juan^{1,2}, WANG Ying-chun², ZHU Ping³, HE Mei², HUANG Cheng-cheng², WANG Li-gang^{2*}, ZHANG Feng-lu¹
(1 College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000 China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture/CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research, Beijing 100081 China; 3 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: 【Objectives】 In order to provide scientific basis for the study of carbon sequestration and emission reduction in black soil area of northeast China, the effects of long-term different fertilization measures on soil respiration were explored. 【Methods】 This study was based on the long-term fertilization experiment from the National Black Soil Fertility and Fertilizer Efficiency Monitoring Base. Five fertilization treatments were selected, including no fertilizer (CK), only chemical fertilizer application (NPK), combining chemical fertilizer with straw (NPKS), combining chemical fertilizer with low level of organic fertilizer (NPKM1), combining chemical fertilizer with high level of organic fertilizer (NPKM2). Field monitoring was conducted using Soil-box343 soil respiration measuring system, and environmental conditions were observed at the same time. 【Results】 The soil respiration rate of the treatments was in range of 4.12 to 7.23 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, showing the trend of “increasing first

收稿日期: 2017-03-28 接受日期: 2017-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0101100, 2017YFD0201801); 国家自然科学基金(31770486); 公益性行业(农业)科研专项(201303126-2, 21303103); 中国农业科学院创新工程资助。

联系方式: 吴瑞娟 E-mail: wuruijuan1991@163.com; *通信作者 王立刚 E-mail: wangligang@caas.cn

and then decreasing” during the growth period of corn, and the highest value appeared at about 69 days after sowing. The peak respiration rate of NPKM2 treatment was significantly higher than those of other treatments ($P < 0.05$). There was a significant positive correlation between soil respiration rate and soil temperature during the monitoring period. Soil temperature can explain 41%–77% of the variation of the soil respiration rate, and the range of soil temperature sensitive coefficient Q_{10} was from 2.35 to 3.49. The total soil respiration varied from 3473 to 5643 kg/hm². NPKM2 treatment was respectively 21.0%, 26.4% and 62.4% higher than those in NPKS, NPK and CK treatments, and NPKS was 34.2% higher than that in the CK ($P < 0.05$). The increasing trend of soil organic carbon content in long-term organic and inorganic treatments is more obvious than other treatments, and the soil organic carbon contents in NPKM1 and NPKM2 treatments were increased by 6.01 g/kg and 5.55 g/kg compared with the initial soil organic carbon content, respectively. 【 **Conclusions** 】 Long-term application of organic fertilizer can increase soil respiration, and improve the content of soil organic carbon at the same time. Manure application plays a win-win effect for improving agricultural productivity and sustainable utilization.

Key words: black soil; chemical fertilizer; organic fertilizer; straw; soil respiration; soil organic carbon

土壤呼吸既是全球碳循环中关键的过程^[1], 又是表征农田土壤肥力和土壤质量的重要指标^[2], 土壤呼吸与生态系统生产力、土壤肥力等密切相关^[3]。农田生态系统受人类干扰较为频繁, 农业管理措施(如肥料施用、耕作措施等)通过改变生态环境, 从而影响土壤呼吸排放特征和强度^[4]。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地, 其在保障粮食安全和农业可持续发展中发挥着不可替代的重要作用^[5]。黑土自开垦以来, 黑土资源呈现“量减质退”的态势, 耕地土壤有机碳(SOC)减少幅度在20%~50%左右^[6], 而损失的碳主要以土壤呼吸(CO₂)的形式释放到大气中。采取合理的施肥方式不仅可以培肥黑土地力, 促进作物生长, 而且影响土壤呼吸^[7]。前人通过短期试验和室内培养试验均表明, 黑土农田土壤呼吸速率变化特征与作物生长规律一致, 施用有机肥、秸秆还田等管理措施能够促进土壤呼吸, 改善土壤性状, 增强农田土壤生产力^[8-10], 同时, 由于增加了有机物料的投入, 抵消了因土壤呼吸损失的碳, 会增强农田土壤的“碳汇”效应^[11-13], 并且土壤呼吸总量与可溶性有机碳含量呈现显著线性相关关系^[14-15]。而关于更长时间尺度下(20年以上)不同管理措施对土壤呼吸的研究较少, 而施肥时间的长短显著影响土壤有机碳的转化及CO₂排放^[14], 进而影响土壤有机碳含量及土壤碳平衡状态^[16]。长期定位试验可以连续监测不同管理措施下的累积效应, 是研究农田碳循环的理想平台^[17]。因此, 本研究基于“国家黑土肥力与肥料效益监测基地”长期定位试验, 探究26年单施化肥、有机肥与无机

肥配施、化肥配施秸秆等施肥措施对土壤呼吸以及土壤有机碳含量的影响, 为明确长期不同施肥方式下黑土的固碳效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016年在“国家黑土肥力与肥料效益监测基地”开展, 基地位于吉林省公主岭市农业科学院, 土壤为中层典型黑土, 其地理位置为东经124°48'33.9"、北纬43°30'23", 四季变化明显, 春季多风少雨, 夏季温热多雨, 秋季短, 冬季寒冷干燥; 年平均气温4~5℃, 年降水量450~650 mm, 无霜期140 d左右, 日照时数2500~2700 h, 积温2600~3000℃。长期定位试验开始于1990年, 初始土壤基本理化性质为: 土壤有机质含量23.3g/kg, 全氮含量1.4 g/kg, 有效磷含量11.79 mg/kg, 速效钾含量158.33 mg/kg, pH 7.6, 土壤容重1.19 g/cm³, 总孔隙度53.9%, 田间持水空隙达到35.8%。

1.2 试验设计

本试验选取“国家黑土肥力与肥料效益监测基地”中的5个不同施肥处理: 1) 不施肥(CK); 2) 单施化肥(NPK); 3) 化肥配施玉米秸秆(NPKS); 4) 化肥配施低量有机肥(NPKM1); 5) 化肥配施高量有机肥(NPKM2)。各处理施肥量见表1。有机肥为牛粪, 5个处理中磷钾肥作为底肥一次性施入, 氮肥1/3用作底肥施入, 2/3用作追肥在拔节期施入, 有机肥于玉米收获后施入农田, 前一年的秸秆于第二

表 1 各处理施肥量 (kg/hm²)

Table 1 The rate of fertilizer application in each treatment

处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Manure	秸秆 Straw
CK	0	0	0	0	0
NPK	165	82.5	82.5	0	0
NPKS	112.1	82.5	82.5	0	7500
NPKM1	50	82.5	82.5	23000	0
NPKM2	165	82.5	82.5	30000	0

年粉碎后在拔节期追肥时撒施于垄沟。试验处理设为大区处理，每个试验区的面积为 400 m²，无重复。供试玉米品种：1990—1993 年为丹育 13，1994—1996 年为吉单 222，1997—2005 年为吉单 209，2006—2016 年为郑单 958，自玉米播种后，各施肥处理田间管理措施一致。2016 年 4 月 25 日播种，9 月 27 日收获。追肥日期为 6 月 23 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤呼吸速率野外监测 土壤呼吸速率的测定采用田间原位观测方法，测定仪器为美国生产的 Soilbox-343 便携式呼吸测量系统。玉米播种后，每个小区随机放置 3 个直径 20 厘米、高 12 厘米的 PVC 管底座，埋入土壤中 9 厘米，田间监测时，将仪器的气体收集罩置于底座上，启动仪器，待仪器稳定后，开始计时测量，测量时间为 10 分钟；玉米生长初期，气温较低，降雨量较少，土壤呼吸速率较低，变化不大，平均每隔 15 天测定一次^[18-19]；玉米追肥后，玉米生长进入旺盛阶段，并且气温升高，降雨量增加，土壤呼吸速率波动性强，平均每 5 天测量一次；玉米生长后期，平均每 10 天测定一次，全生育期共进行 17 次测量，测量均在上午 9:00—11:00 内完成；土壤温度采用地温计，插入土壤深度为 0—10 cm；土壤含水率用便携式土壤水分测试仪 (德国, TRIME-PICO64) 测定。

1.3.2 土壤呼吸速率 (R_s) 及土壤呼吸总量 ($\text{CO}_2\text{-C}$) 的计算

$$\text{土壤呼吸速率: } R_s = PV(C_2 - C_1)/RTSt$$

式中： R_s 为单位时间单位面积 CO_2 的变化量，单位为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ； P 为压强，单位为 Pa； V 为气体体积即呼吸室体积，单位为 m^3 ； C_2 为测定结束时 CO_2 浓度； C_1 为开始测量时 CO_2 浓度； R 为理想气体常数，约等于 8.31441； T 为热力学温度； S 和 t 分别为呼吸室的底面积和测量时间。

土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量计算是根据 2016 年 5 月

1 日到 10 月 3 日测定的土壤呼吸速率估算土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 日排放量，未测定日期用插值法求出其日排放量，然后累加求生育期 (5 月 1 日到 10 月 3 日) 内的土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放量。公式为^[20]：

$$\text{土壤呼吸日排放量 } X = R_s \times 3600 \times 24 \times 12 \times 10^{-5}$$

$$\text{土壤呼吸排放总量 } \text{CO}_2\text{-C}(\text{kg}/\text{hm}^2) =$$

$$\sum_{i=\text{first}}^{n=\text{last}} X_i + X_{i+1} \times N + \dots + X_{i+n} \times N$$

式中： X 为土壤每天 CO_2 排放量 (kg/hm^2)； R_s 为测定的土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]；12 为 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的摩尔质量 (g/mol)；3600 和 24 为换算系数； i 为第 1 次测定土壤呼吸速率； n 为最后一次监测值； N 是相邻两次监测之间相隔的天数，相邻两次土壤呼吸的线性内插作为间隔土壤呼吸速率值。

1.3.3 土壤有机碳和可溶性有机碳测定 在春玉米收获后，用土钻取 0—20 cm 土壤样品，用自封袋密封，带回实验室。采用四分法，1/4 土壤风干，过 0.15 mm 筛用于测定土壤有机碳，1/4 土壤样品置于 -4℃ 冰箱中冷冻保存，用于测定可溶性有机碳。土壤有机碳采用干烧法，用总碳分析仪测定；土壤可溶性有机碳用蒸馏水浸提后采用 TOC 仪测定。

1.4 数据分析

数据采用 EXCEL2003 和 SPSS17.0 软件进行统计分析，LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率动态变化

在春玉米整个生育期内，土壤呼吸速率随春玉米的生长表现出一定的季节性变化特征，并且不同施肥处理土壤呼吸变化趋势基本一致，总体上均呈现“先升高后降低”的变化态势 (图 1)。春玉米播种后，刚施入基肥，为土壤中的微生物提供了原料^[21]，提高了土壤中微生物活性，伴随着土壤温度的逐渐升高与玉米生长，土壤呼吸速率在播种后的 56 d 内呈现不断增加的态势；在播种后第 61 d，土壤呼吸速率略有下降，这可能是由于降雨所导致的；各个处理土壤呼吸速率的峰值出现在播种后第 69 d 左右，此时也正值玉米营养生长的旺盛时期，根部呼吸量也逐渐增加；之后土壤呼吸速率不断下降，第 85 d 到第 97 d，土壤呼吸速率有小幅度的回升，但在第 97 d 至玉米收获，各处理土壤呼吸速率呈不断下降的趋势，收获时降到最低值。在整个监测期

间, NPKM2 处理土壤呼吸平均速率高于其他处理, 分别比 NPKS、NPKM1、NPK、CK 处理提高 32.9%、39.0%、44.0%、75.9% ($P < 0.05$); 监测期间内, NPKM1、NPKS 和 NPK 处理土壤呼吸平均速率差异不显著, CK 处理土壤呼吸平均速率最小。

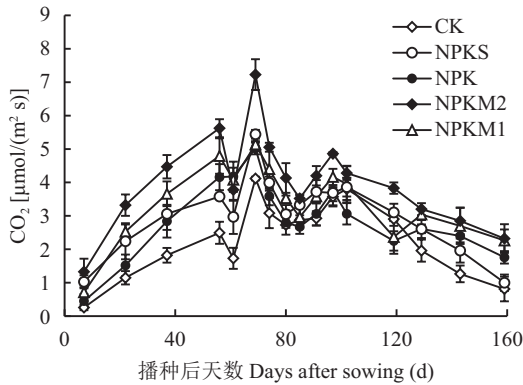


图 1 不同施肥处理下土壤呼吸速率的变化

Fig. 1 Changes of soil respiration under different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理下土壤呼吸速率与温度、含水率的关系

Table 2 Relationship of soil respiration with temperature and water content under different fertilization treatments

处理 Treatment	呼吸速率与温度 Respiration via temperature			土壤呼吸速率与含水率 Respiration via water content	
	拟合方程 Fitting formula	R^2	Q_{10}	拟合方程 Fitting formula	R^2
CK	$y = 0.446e^{0.1251x}$	0.7651**	3.49	$y = -0.0079x^2 + 0.2757x + 0.8771$	0.6775*
NPK	$y = 0.8473e^{0.0942x}$	0.4665*	2.56	$y = -0.0109x^2 + 0.3655x + 0.5716$	0.4346
NPKS	$y = 0.633e^{0.1196x}$	0.6303**	2.35	$y = -0.0186x^2 + 0.6871x - 2.3681$	0.4343
NPKM1	$y = 1.088e^{0.0858x}$	0.4052*	3.30	$y = -0.0185x^2 + 0.7058x - 2.0977$	0.6598
NPKM2	$y = 0.8785e^{0.0998x}$	0.5937**	2.71	$y = -0.0181x^2 + 0.641x - 1.2564$	0.6365

注 (Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

2.3 不同施肥处理对土壤呼吸总量的影响

图 2 可以看出, 不同施肥处理下土壤呼吸总量的变化范围为 CO_2-C 3474~5643 kg/hm^2 , 总体表现为 NPKM2 > NPKM1 > NPKS > NPK > CK 处理, NPKM2 处理土壤呼吸总量显著高于 NPKS、NPK、CK 处理, 分别提高 21.0%、26.5%、62.4%; NPKM2 比 NPKM1 提高 8.6%, 但未达到显著性水平; NPKM1 土壤呼吸总量比 NPK 和 CK 处理分别提高 16.4% 和 49.6% ($P < 0.05$)。表明长期化肥配施高量有机肥可以显著增加土壤呼吸总量, 这一方面由于有机肥施用增加了土壤呼吸的基质 (土壤有机质); 另一方面有机肥能显著增强土壤微生物的活性, 提高土壤的呼吸强度, 促进土壤有机质的矿化分解^[23]。在本监测期内, NPKM1 和 NPKS 处理之间土壤呼吸量

2.2 土壤温度和含水率与土壤呼吸速率间的关系

土壤温度与湿度是影响土壤呼吸的主要因素^[22]。本研究采用指数函数 ($R_s = ae^{bT}$) 来拟合不同处理下土壤呼吸速率 (R_s) 与土壤温度 (T) 之间的关系 (表 2), 结果表明, CK、NPKS 和 NPKM2 处理, 土壤呼吸速率和土壤温度之间达到了极显著的相关水平 ($P < 0.01$), NPK 和 NPKM1 处理也达到了显著相关水平 ($P < 0.05$), 土壤温度可以解释土壤呼吸速率变异的 41%~77%, 各个处理的温度敏感系数 Q_{10} 的变化范围为 2.35~3.49, 其中以 CK 处理的 Q_{10} 值最大, NPKS 处理的 Q_{10} 值最小。土壤呼吸与土壤水分之间的关系较复杂, 通常取决于与温度的协调情况^[17]。国内外学者一般采用线性模型、二次方程、指数模型等多种方法拟合两者之间的关系, 在本试验条件下二次方程拟合的效果较好, 但不同施肥处理下 (除 CK 外) 土壤含水量和土壤呼吸速率之间均未达到显著性相关。

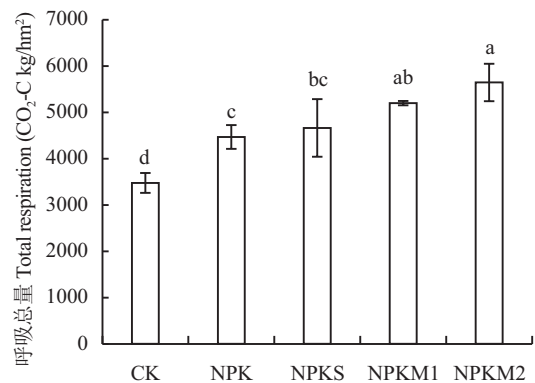


图 2 不同施肥处理下土壤呼吸总量

Fig. 2 Total soil respiration under different fertilization treatments

注 (Note): 柱上不同字母表示在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant differences at 0.05 level.]

差异不显著, 并且 NPKS 和 NPK 两个处理之间土壤呼吸总量差异也不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 土壤有机碳和可溶性有机碳与土壤呼吸总量的关系

进一步分析土壤呼吸总量与土壤有机碳和可溶性有机碳含量之间的关系发现, 土壤有机碳 (SOC) 与可溶性有机碳含量 (DOC) 与土壤呼吸总量之间均存在较好的正相关关系, 并且采用二次方程拟合效果较好 (图 3)。本研究条件下, 土壤呼吸总量随着 SOC 和 DOC 含量的增加而增加, 且土壤呼吸总量与土壤有机碳含量之间的相关性 ($R^2 = 0.9327$) 优于土壤呼吸总量与土壤可溶性有机碳含量之间的相关性 ($R^2 = 0.8105$)。长期不同施肥条件造成土壤有机碳含量的差异, 使其在长时间尺度下作为影响土壤呼吸的主要因素, 造成不同施肥措施下土壤呼吸表现出不同的排放量。

2.5 长期不同施肥处理土壤有机碳含量的变化

本试验从 1990~2016 年不同施肥处理持续应用造成土壤有机碳含量的差异 (图 4)。有机肥配施化肥处理土壤有机碳含量明显高于其他处理, 虽然年际间有所波动, 但随着施肥年限的增加总体呈上升的趋势, 尤其是在 2000 年以后, NPKM1 和 NPKM2 处理与其它处理之间 SOC 差异越来越大, 但土壤有机碳含量并未随有机肥施入量的高低, 表现出明显的差异, 究其原因可能是由于取样误差和测定方法不同造成, 也可能是监测年限不够, 有机肥不同施水平对土壤有机碳固存的影响还未明显体现出来^[24]。截止到 2016 年, NPKM1 和 NPKM2 处理 SOC 较初始 SOC 分别增加了 6.01 g/kg 和 5.55 g/kg, 平均年增加量分别为 0.23 和 0.21 g/kg。长期秸秆还田处理土壤有机碳含量年际间变化趋势较稳定, 总体表现为增加的趋势, 但与施有机肥处理相比, 增加幅度较

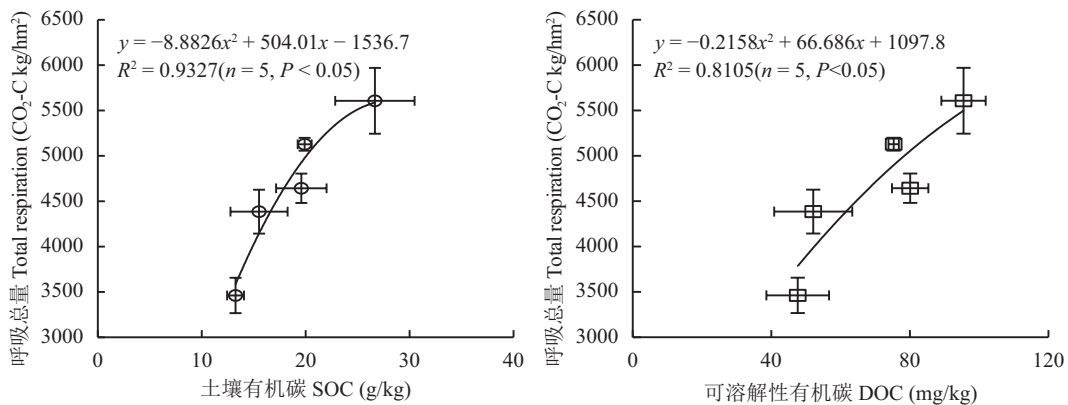


图 3 土壤有机碳和可溶性有机碳与土壤呼吸总量的相关关系

Fig. 3 Correlation between soil organic carbon (SOC) and total soil respiration or dissolved organic carbon (DOC) and total soil respiration

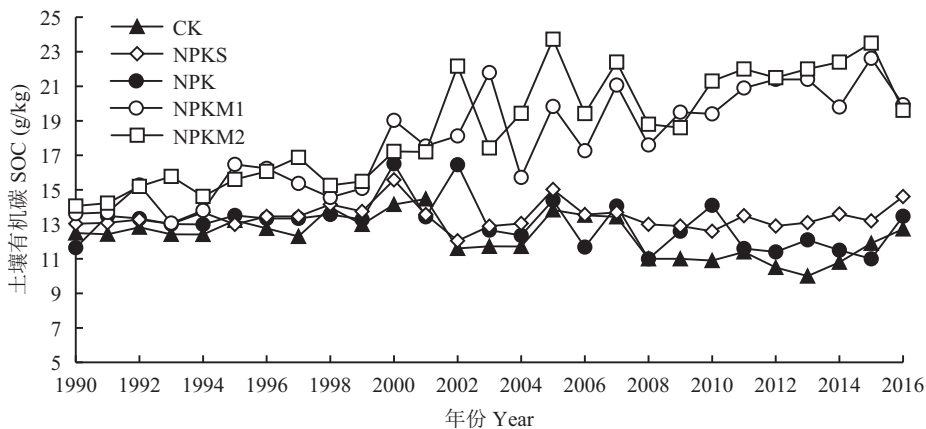


图 4 长期不同施肥处理下土壤有机碳的变化

Fig. 4 Changes of soil organic carbon (SOC) under long-term different fertilization treatments

小, 土壤有机碳含量较初始含量增加 1.58g/kg, 单施化肥处理 1990~2000 年土壤有机碳含量呈稳定上升趋势, 2000 年之后, 不同年限间土壤有机碳含量波动性变化, 到 2016 年, 土壤有机碳含量较初始含量增加 1.83 g/kg, 长期不施肥处理 (CK) 土壤有机碳含量略有下降 (0.24 g/kg)。

3 讨论

3.1 土壤呼吸速率特征及其影响因素

本研究表明, 土壤呼吸速率呈现明显的季节性变化, 呈“先升高后降低”的变化特征, 峰值出现在播种后 69 天 (拔节期) 左右, 这与芦思佳等^[15]、龚振平等^[13]研究结果基本相同。有相关研究表明^[25], 在一定范围内增加温度可以提高土壤微生物活性, 同时直接影响根系生理活动和生长, 土壤呼吸与土壤温度呈正相关, 但当土壤温度较高时, 它将不再是土壤呼吸的限制因子。本研究表明土壤呼吸速率随温度呈指数正相关关系。长期以来研究者常用 Q_{10} 来描述土壤温度和土壤呼吸速率之间的关系, Zheng 等^[26]综合大量文献得出 Q_{10} 值一般为 1.28~4.75, 本研究不同施肥处理 Q_{10} 值的变化范围为 2.35~3.49, 处于以上范围之内。其中 CK 处理的 Q_{10} 值最大, 说明排除施肥的干扰, 土壤呼吸受温度的影响更大, 施肥可能掩盖或降低了土壤呼吸对温度的敏感性^[27-28]。NPKS 处理的 Q_{10} 值最小, 说明无机肥配合秸秆还田能够降低土壤温度敏感系数, 可能降低由于温度升高所导致的土壤有机碳分解速率的增加, 与芦思佳等^[15]研究结果相一致。土壤水分通过调控土壤通气与氧化还原状况以及土壤微生物活性等进而影响土壤温室气体的产生和排放, 关于土壤水分对土壤呼吸的影响目前尚未有明确的结论, 很多研究认为土壤呼吸的最优土壤湿度是接近田间持水量, 土壤湿度只有在最低或者最高的情况下才会抑制土壤呼吸^[29-31]。李虎等^[32]研究认为, 土壤湿度对土壤呼吸的影响比较复杂, 同时取决于与温度的相互协调情况。很多野外研究则表明土壤湿度只有在最低或最高的情况下才会抑制土壤呼吸通量^[33]。Mielnick 等^[34]用二次方程模型研究土壤呼吸速率和土壤湿度之间的关系时, 发现当土壤湿度达到一定程度时土壤呼吸会随着湿度的增加而减小。本研究表明土壤呼吸速率和土壤含水率之间采用二次函数拟合关系较好, 说明随着土壤含水量的增加, 土壤呼吸强度并不是一直增强^[35]。通过对不同施肥处理土壤含水率与土壤呼吸速率的二次函数求导得出土壤含水率在

35% 左右时, 土壤呼吸速率达到最高值, 当土壤含水率高于 35% 时, 土壤呼吸速率可能呈下降趋势。

3.2 长期不同施肥对土壤呼吸的影响

长期不同培肥措施造成了土壤肥力和作物生长的差异, 使得不同施肥处理土壤呼吸速率和生育期内 CO_2 释放总量表现出明显差异^[23]。本试验下, 施高量有机肥处理 (NPKM2) 土壤呼吸速率峰值为 7.23 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (折算成土壤 CO_2 通量为 1145.23 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 且显著高于其他处理, 乔云发等^[14]和尤孟阳^[36]研究虽然也同样表明化肥配施有机肥可以显著增加土壤呼吸速率, 但与其他施肥处理之间差异不显著。这也说明不同培肥措施的使用对土壤呼吸及其碳循环的影响是一个长期的过程, 短期试验可能不足以揭示不同措施之间的差异。长期秸秆还田处理也促进土壤呼吸, 土壤平均呼吸速率显著高出 CK 处理 41.45%。这与宋秋来等^[12]和吕艳杰等^[37]的研究结果相一致, 表明施用有机肥和秸秆还田处理下, 由于外界碳源和氮源的添加, 增强了土壤微生物活性, 促进土壤中碳排放速率, 同时满足作物生长的需要, 促进作物根系生长, 根呼吸增加。

土壤有机碳是土壤肥力与土壤微生物分解活动的基础, 在本试验条件下, 长期施用有机肥处理土壤呼吸总量远远高于单施化肥处理, 而无肥处理土壤呼吸总量低于其他施肥处理。而前人通过室内培养试验研究表明, 虽然施用有机肥增加土壤呼吸, 但与其他施肥处理间的差异不明显^[38]。这可能是由于本研究基于长期定位试验, 能够体现不同管理措施在不同年限下对作物、土壤等的影响差异而短期室内试验还不能完全表征土壤肥力变化特征^[39], 此外, 土壤呼吸与土壤有机碳含量的高低高度相关^[40], 本试验条件下, 也有相似的研究结果, 土壤呼吸总量与土壤有机碳含量之间采用二次曲线拟合关系较好, 这与龚振平等^[11]和秦越等^[41]的研究结果相似。土壤有机碳的演变是一个相对缓慢的过程, 主要由土壤有机碳输入和输出的平衡所决定^[42-43]。本研究 26 年的试验结果表明, 长期施用有机肥土壤有机碳含量表现为明显增加的趋势, 说明长期施用有机肥一方面能够为土壤微生物提供碳源和氮源, 增强微生物活性, 促进土壤中 CO_2 的排放, 提供当季作物生长所需要的肥力水平^[44]; 另一方面在长时间尺度下, 施用有机肥 (包括秸秆还田) 等管理措施能够抵消由于土壤呼吸损失的碳量, 实现农田土壤有机碳的固存^[45], 提高东北黑土土壤的生产力和可持续利用。

4 结论

1) 玉米生育期内, 土壤呼吸速率呈不对称的“先升高后降低”单峰曲线变化, 峰值出现在播种后 69 天(拔节期)左右; 土壤温度与土壤呼吸速率呈显著正相关, 温度敏感系数 Q_{10} 的变化范围为 2.35~3.49。

2) 不同施肥处理下化肥配施有机肥处理土壤呼吸总量均显著高于单施化肥和不施肥处理, 秸秆还田处理土壤呼吸总量远高于不施肥处理, 但与单施化肥相比, 土壤呼吸总量增加不明显。

3) 土壤呼吸总量与土壤有机碳含量密切相关, 长期施用有机肥可促进土壤中 CO_2 排放, 增加土壤呼吸总量, 同时也有助于土壤有机碳含量的累积。

参考文献:

- [1] Schlesinger W, Andrews J. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7–20.
- [2] 杨玲, 张前兵, 王进, 等. 管理措施对绿洲农田土壤总有机碳及易氧化有机碳季节变化的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2013, (5): 549–555.
- Yang L, Zhang Q B, Wang J, *et al.* Effects of main technical measures on soil total organic carbon and easily oxidation seasonal dynamics of oasis farmland[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition)*, 2013, (5): 549–555.
- [3] Sikora L J, McCoy J L. Attempts to determine available carbon in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9: 19–24.
- [4] 陈书涛, 朱大威, 牛传坡, 等. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, (10): 2858–2865.
- Chen S T, Zhu D W, Niu C P, *et al.* Effects of management regime on soil respiration from agroecosystems[J]. *Environmental Science*, 2009, (10): 2858–2865.
- [5] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. *黑龙江农业科学*, 2016, (1): 158–161.
- Wei D, Kuang E J, Chi F Q, *et al.* Status and protection strategy of black soil resources in Northeast of China[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016, (1): 158–161.
- [6] 方华军, 杨学明, 张晓平. 农田土壤有机碳动态研究进展[J]. *土壤通报*, 2003, (6): 562–568.
- Fang H J, Yang X M, Zhang X P. Research progress on soil organic carbon dynamics[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, (6): 562–568.
- [7] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5): 83–88.
- Dong Y H, Ouyang Z, Li Y S, *et al.* Influence of fertilization and environmental factors on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(5): 83–88.
- [8] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, (1): 66–71.
- Han X Z, Wang F X, Wang F J, *et al.* Effects of long term application of organic fertilizer on soil fertility and crop yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, (1): 66–71.
- [9] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4790–4799.
- Gao H J, Peng C, Zhang X Z, *et al.* Effects of long-term fertilization on maize yield stability in black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4790–4799.
- [10] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, (35): 263–269.
- Hao X X, Yang C B, Yuan Y R, *et al.* Effects of continuous straw returning on soil organic carbon content and soil fertility in black soil aggregates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, (35): 263–269.
- [11] 龚振平, 王雪松, 宋秋来, 等. 不同有机质含量土壤 CO_2 排放季节变化规律及差异研究[J]. *东北农业大学学报*, 2016, (3): 31–37.
- Gong Z P, Wang X S, Song Q L, *et al.* Study on seasonal variation of soil carbon dioxide emissions under different contents of soil organic matter[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, (3): 31–37.
- [12] 宋秋来, 赵泽松, 龚振平, 等. 东北黑土区旱作农田土壤 CO_2 排放规律[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 200–207.
- Song Q L, Zhao Z S, Gong Z P, *et al.* CO_2 emission law of dry farmland soil in black soil region of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23): 200–207.
- [13] 龚振平, 朱捷, 宋秋来, 等. 松嫩平原玉米田土壤 CO_2 排放规律与碳平衡特征[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(9): 9–15, 29.
- Gong Z P, Zhu J, Song Q L, *et al.* CO_2 emissions law research and characteristics of carbon balance of corn field in Songnen Plain[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(9): 9–15, 29.
- [14] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1028–1035.
- Qiao Y F, Miao S J, Wang S Q, *et al.* Soil respiration affected by fertilization in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1028–1035.
- [15] 芦思佳, 韩晓增. 施肥对土壤呼吸的影响[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2011, (3): 366–370.
- Lu S J, Han X Z. The effect of fertilization on soil respiration[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2011, (3): 366–370.
- [16] 李海波, 晓增风. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展[J]. *土壤通报*, 2007, (2): 384–388.
- Li H B, Xiao Z F. Advances in soil carbon and nitrogen cycling under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, (2): 384–388.
- [17] 许咏梅, 刘骅, 王西和. 长期不同施肥下新疆灰漠土土壤呼吸特征研究[J]. *新疆农业科学*, 2012, (7): 1294–1300.
- Xu Y M, Liu H, Wang X H. The soil respiration characteristics of grey desert soil under long-term fertilization[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, (7): 1294–1300.
- [18] 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.
- [19] 李昌珍, 张婷婷, 冯永忠, 等. 不同轮作方式对免耕农田土壤 CO₂排放的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, (4): 143–149.
- Li C Z, Zhang T T, Feng Y Z, *et al.* Effects of different cropping systems on no-tillage soil CO₂ emission[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, (4): 143–149.
- [20] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国. 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, Che S G. 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.
- [21] 王碧胜, 武雪萍, 于维水, 等. 不同碳氮管理措施对春玉米农田土壤呼吸的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (4): 1–7.
- Wang B S, Wu X P, Yu W S, *et al.* Effects of different carbon and nitrogen management on soil respiration of spring maize farmland[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (4): 1–7.
- [22] 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]. *草业科学*, 2012, 21(1): 273–278.
- Yu A Z, Huang G B, Chai Q. Effects of different tillage treatments on soil respiration of winter-wheat farmland in oasis irrigated area of Northeast China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(1): 273–278.
- [23] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 农田生态系统土壤 CO₂释放研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, (12): 1–7.
- Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, *et al.* Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2004, (12): 1–7.
- [24] 王成己, 潘根兴, 田有国, 等. 不同施肥下农田表土有机碳含量变化分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 650–657.
- Wang C J, Pan G X, Tian Y G, *et al.* Changes in cropland topsoil organic carbon with different fertilizations under long-term agro-ecosystem experiments across mainland China[J]. *Scientia Sinica: Life Science*, 2010, 40(7): 650–657.
- [25] 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 its affected factors under different tillage systems in dryland production systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2919–2924.
- [26] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1531–1540.
- [27] 张俊丽, 廖允成, 曾爱, 等. 不同施氮水平下旱作玉米田土壤呼吸速率与土壤水热关系[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1382–1388.
- Zhang J L, Liao Y C, Zeng A, *et al.* Effects of different levels of N fertilizer on soil respiration, and its relation to soil moisture and soil temperature under rainfed land of summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1382–1388.
- [28] 刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO₂排放[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2506–2511.
- Liu X Y, Pan G X, Li L X, *et al.* CO₂ emission under long-term fertilization during rape growth season of a paddy soil from Tailake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2506–2511.
- [29] Li H J, Yan J X, Yue X F, *et al.* Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 490–503.
- [30] Cook F J, Orchard V A. Relationships between soil respiration and soil moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 1013–1018.
- [31] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO₂通量的影响[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 214–226.
- Yang J Y, Wang C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in Northeastern China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 214–226.
- [32] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模型分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 14–20.
- Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 14–20.
- [33] 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.
- [34] Mielnick P C, William A D. Soil CO₂ flux in a tall grass prairie[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 221–228.
- [35] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. *生态环境学报*, 2013, (1): 18–24.
- Li Y K, Chen M P, Xia X, *et al.* Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, (1): 18–24.
- [36] 尤孟阳. 农田管理措施对土壤 CO₂排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2012.
- You M Y. Impacts of management regimes on soil CO₂ emission from croplands [D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2012.
- [37] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, (11): 1456–1463.
- Lü Y J, Yu H Y, Yao F Y, *et al.* Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, (11): 1456–1463.
- [38] 葛高飞, 梁永超. 玉米生长过程中施肥对土壤呼吸和微生物量碳的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, (18): 73–78.
- Ge G F, Liang Y C. Effect of fertilization on soil respiration and microbial biomass carbon during maize growth period[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, (18): 73–78.
- [39] 焦晓光, 隋跃宇, 魏丹, 等. 长期施肥对农田黑土酶活性及土壤肥力

- 的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, (4): 443–447.
- Jiao X G, Sui Y Y, Wei D, *et al.* Effect of long-term fertilization on enzyme activities and soil fertility for the black soil in the farmland[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, (4): 443–447.
- [40] 孟磊, 丁维新, 何秋香, 等. 长期施肥对冬小麦/夏玉米轮作下土壤呼吸及其组分的影响[J]. 土壤, 2008, (5): 725–731.
- Meng L, Ding W X, He Q X, *et al.* Effect of long-term fertilization on soil respiration flux and its components under winter wheat/summer maize rotation[J]. Soils, 2008, (5): 725–731.
- [41] 秦越, 李彬彬, 武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤CO₂排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1442–1449.
- Qin Y, Li B B, Wu L F. Dynamics and interrelationship of CO₂ emissions and dissolved organic carbon in soils with crop residue retention under different tillage practices[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(7): 1442–1449.
- [42] 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]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687–692.
- Meng L, Ding W X, Cai Z C, *et al.* Storage of soil organic C and soil respiration as affected by long-term quantitative fertilization[J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(6): 687–692.
- [43] 高崇升, 王建国. 黑土农田土壤有机碳演变研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1468–1474.
- Gao C S, Wang J G. A review researches of evolution of soil organic carbon in mollisols farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1468–1474.
- [44] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445–1451.
- Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, *et al.* Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil respiration in 26 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445–1451.
- [45] 郝小雨, 马星竹, 周宝库, 等. 长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 316–321.
- Hao X Y, Ma X Z, Zhou B K, *et al.* Effects of soil organic carbon sequestration under long-term fertilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 316–321.