文章编号:1000-7601(2020)01-0079-07

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.11

培肥模式对旱作全膜双垄沟播玉米 生长及土壤呼吸的影响

谢军红1,2,王进斌1,2,李玲玲1,2,周永杰1,2,王林林1,2,齐鹏1,3

(1.甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070;2.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070; 3.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:针对旱作全膜双垄沟播玉米培肥模式单一及碳排放理论薄弱的问题,依托大田试验研究了不施氮肥对照(CK)和等氮(纯 N 200 kg·hm⁻²)条件下 3 个不同氮源(单施化肥,N;商品有机肥配施化肥,NM;单施有机肥,M)对玉米生长、产量、土壤呼吸速率及碳排放量的影响。结果表明:土壤呼吸速率随玉米生育时期的推进呈先增大后减小的趋势,开花期是土壤呼吸的峰值期,土壤呼吸速率达 5.38 μmol·m⁻²·s⁻¹;土壤碳排放总量与玉米干物质积累、生长速率、叶面积指数及净同化率均呈极显著正相关关系;玉米产量、碳排放量和碳排放效率在商品有机肥配施化肥和单施化肥处理间无显著差异,分别较对照增加了 121.2%、41.9%、54.5%和 151.4%、31.9%、92.9%。说明商品有机肥配施化肥在增加了碳排量的同时增加了玉米的产量,进而提高了碳排放效率。

关键词:培肥模式;旱作;全膜双垄沟播;玉米;生长特性;土壤呼吸

中图分类号:S143.1;S513 文献标志码:A

Effects of fertilization method on maize growth and soil respiration under plastic-covered ridge and furrow planting in dry farmland

XIE Junhong^{1,2}, WANG Jinbin^{1,2}, LI Lingling^{1,2}, ZHOU Yongjie^{1,2}, WANG Linlin, QI Peng^{1,3}

- (1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;
 - 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
- 3. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: For maize production under plastic-covered ridge and furrow planting, a serious issue was undiversified fertilization with deficient theoretical base for carbon emission reduction. Therefore, a filedstudy was conducted to determine the impacts of different fertilization practices on maize growth, grain yield, soil respiration and carbon emission. The experimental design consisted of a zero N control (CK) and three fertilizer practices with the same N amount, i.e. chemical fertilizer (N), chemical fertilizer in combination with organic fertilizer (NM), and organic fertilizer (M). The results showed that soil respiration rate increased at early growth stages while declined at late growth stages. The peak of soil respiration was revealed at flowering stage of maize, and the value is 5.38 μ mol · m⁻² · s⁻¹. The total carbon emission was positively correlated with dry matter, crop growth rate, leaf area index and net assimilation rate. There were no significant difference in yield, total carbon emission and carbon emission efficiency between chemical fertilizer and chemical fertilizer combination with organic fertilizer. Compared to control, the grain yield, total carbon emission, and carbon emission efficiency of chemical fertilizer increased by 151.4%, 31.9%, and 92.9%. Similarly, that of chemical fertilizer in combination with organic fertilizer increased by 121.2%,41.9%, and 54.5%, respectively. This indicated that chemical fertilizer in combination with organic fertilizer increased carbon emission in the growing season, but it improved yield of maize, thus, enhanced carbon emission

收稿日期:2019-01-28 修回日期:2019-07-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B04-3); 甘肃农业大学干旱生境作物学重点实验室开放基金课题(GSCS-2017-4); NSFC 项目(31460337,31660373 和 31761143004); 甘肃省教育厅项目(2017C-12); 甘肃省玉米产业体系项目(GARS-02-10)

作者简介:谢军红(1981-),男,甘肃天水人,博士,副研究员,主要从事旱地农业研究。E-mail: xiejh@gsau.edu.cn

通信作者:李玲玲(1977-),女,甘肃天水人,博士,教授,博士生导师,主要从事保护性农业研究。E-mail: Lill@gsau.edu.cn

sion efficiency.

Keywords: fertilization method; dry farming; plastic-covered ridge and furrow planting; maize; growth characteristics; soil respiration

黄土高原旱农区水热资源不足、土壤肥力瘠薄、水土流失严重^[1-2],生产生态面临着严重压力。全膜双垄沟播种植模式集成沟垄作集雨栽培、地膜覆盖增温保墒于一体,该技术的应用有效地克服了玉米种植的水热限制,发挥了明显的增产和提高水分利用效率的作用^[3-4]。受高产利益的刺激,生产中存在重施化肥(尤其是氮肥)、不施有机肥现象,造成了土壤板结,有机质含量、土壤肥力、氮肥利用率降低^[5-6],同时,过量施氮引起诸如硝态氮淋溶^[7]、NH₃挥发^[8]与碳排放^[9]等一系列环境问题,不利于全膜双垄沟播玉米可持续生产。因此,通过优化培肥模式提升土壤肥力水平来维持或提高全膜双垄沟播玉米可持续生产能力的研究具有重要意义。

土壤培肥是提高耕地可持续生产能力的主要措施。研究发现,以增加土壤有机质为主要目标的秸秆还田^[10]、有机肥施用^[11]、有机无机结合^[12]等措施能增加土壤有机质和土壤肥力,提高了作物产量和水分利用效率。然而,乔云发等^[13]发现,施用有机肥虽能增加农田土壤有机碳含量,但有机肥的增加为土壤微生物呼吸提供底物,同时加强作物根系呼吸,进而增加了土壤 CO₂的排放。CO₂是最主要的一种温室气体,其微小改变直接影响全球碳平衡,从而加剧或减缓全球气候变暖。如何保证在稳增产水平下实现土壤固碳减排成为旱作全膜双垄沟播玉米可持续生产中主要的科学问题。

土壤呼吸是一个复杂的生物和化学过程,在陆地生态系统中占有重要地位,农田生态系统的土壤

呼吸易受耕作[14]、施肥[15]、灌溉[16]、覆盖[17]等非生物因素的影响,还与作物类型、生长过程、微生物活动等生物因素密切相关[18]。然而,土壤培肥对于产量、碳排放影响的研究以及土壤培肥措施下作物生长与土壤呼吸的相互关系研究在全膜双垄沟播玉米生产体系中研究相对不足。因此,本试验研究了不同培肥模式对黄土高原半干旱区全膜双垄沟播玉米生长及土壤呼吸的影响,以期挖掘既能维持一定生产力水平又能降低碳排放的全膜双垄沟播玉米培肥模式,明晰覆膜沟垄种植条件下玉米生长与土壤呼吸速率、碳排放的关系,为旱作农田养分管理与土壤碳排放理论提供技术理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究于 2018 年在甘肃省定西市安定区的甘肃农业大学旱农综合实验站进行,研究所依托田间定位试验始于 2012 年。试验区平均海拔 2 000 m,年无霜期 140 d,属中温带半干旱偏旱区,多年平均日照时数 2 476 h,太阳辐射量为 593 kJ·cm⁻²;年均气温 6.4℃,>0℃ 积温为 2 933.5℃,>10℃ 积温为 2 239.1℃,多年平均降水量为 390.9 mm,80%保证率的降水量为 365 mm,年蒸发量达到 1 531 mm,属典型的半干旱雨养农业区,试区土壤为黄绵土,土质疏松,质地均匀,贮水性良好;凋萎含水率 7.3%,饱和含水率 28.6%,pH 值约为 8.36,土壤有机质含量 12.01 g·kg⁻¹,全氮 0.76 g·kg⁻¹,全磷 1.77 g·kg⁻¹。2018 年降雨量为 472.1 mm(图 1),玉米生长季降雨量为 377.6 mm。

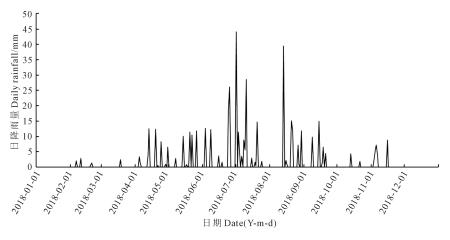


图 1 试验区 2018 年降雨量

Fig.1 Daily rainfall in the study area in 2018

1.2 试验设计

以全膜双垄沟播玉米为研究对象,采用单因素随机区组排列,以不施肥(CK)为对照,设计 3 个等氮(200 kg·hm $^{-2}$)的培肥模式,即单施化肥(N:纯N 200 kg·hm $^{-2}$)、商品有机肥配施化肥(NM: 3.03 t·hm $^{-2}$ 有机肥+100 kg·hm $^{-2}$ 纯N)和单施商品有机肥(M: 6.06 t·hm $^{-2}$),共 4 个处理,3 次重复,12 个小区,小区面积为 42.9 m 2 (13 m×3.3 m)。参试玉米品种为先玉 335,各处理播种量均为 5.25 万株·hm $^{-2}$,玉米于 2018 年 4 月 30 日用点播器进行播种,10 月 15 日收获,为保证出苗率,每穴播种 2 粒玉米,在玉米出苗后,及时补苗、间苗。作物生长期间,人工除草,其它管理措施同大田管理。本试验所用化学氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 $P_2O_516\%$)。所用商品有机肥含氮、磷、钾和有机质含量分别为 3.3%、1.0%、0.7%和 45%。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累量 分别在玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期和成熟期每小区取样 3 株,105℃烘箱 杀青 30 min,然后 80℃烘干至恒量,最后计算单株 玉米干物质积累量(g・株⁻¹)。

1.3.2 玉米生长率(CGR) 玉米生长率为单位时间内单株玉米所增加的干物质重量($g \cdot k + (d^{-1})$)。

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$$

式中, $W_2 - W_1$ 表示一段时间内每株玉米植株干重的净增长数量, $t_2 - t_1$ 为 2次测定时期的间隔天数。

1.3.3 叶面积指数(LAI) 分别在玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期和成熟期每个小区取样 3 株,用直尺测量每株各叶片叶长(L_{ij}) 和最大叶宽(B_{ij}),计算叶面积指数。

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} (L_{ij} \times B_{ij})}{m}$$

式中,n 为j 株的总叶片数,m 为测定株数, ρ 为种植密度,0.75 为校正系数。

1.3.4 玉米净同化率(NAR) 玉米净同化率为某一段时间内单位叶面积干物质的增长量($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)。

$$NAR = \frac{(W_2 - W_1)(\ln L_2 - \ln L_1)}{(t_2 - t_1)(L_2 - L_1)}$$

式中, W_1 、 W_2 为第 t_1 和 t_2 天玉米的干物质重, L_1 和 L_2 分别为第 t_1 和 t_2 天的叶面积。

1.3.5 土壤呼吸速率 在玉米生长期内,选择晴朗或少云天气,用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系

统(LI-COR Inc, Lincoln, NE, USA)进行田间土壤呼吸速率测定。于播种后(5月3日)开始第一次测定,每隔15d左右测定一次,10月16日最后一次测定。为减少对土壤表层的干扰,土壤呼吸室放置在测定基座(内径20 cm、高11.5 cm的PVC圈)上,PVC圈嵌入玉米行间,露出土壤表面2 cm。在每次测定的前一天,去除基座内土壤表层的一切活体、掉落物以及揭出PVC圈内的薄膜于圈外,将膜内积累的 CO_2 排除,待测定结束后,盖好薄膜,在整个观测过程中PVC圈埋设位置保持不变,并且定期去除圈内杂草。为了减少安置测定基座对土壤系统的破坏,在测定基座安置24h后进行第一次测定。1.3.6 土壤碳排放量 根据土壤呼吸速率及测定时间,计算整个生育期的土壤碳排放量 $CE(kg C \cdot hm^{-2})$ 。

$$CE = \sum \left[\frac{R_{i+1} \times R_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 0.1584 \times 24 \right]$$

 $\times 0.2727 \times 10$

式中,R 为作物生长季土壤呼吸速率(μ mol·m⁻²·s⁻¹),i+1和i是前后两次采样时间,t 为播种后的天数。0.1584 是将 μ molCO₂·m⁻²·s⁻¹转化为 g CO₂·m⁻²·h⁻¹的系数,0.2727 是将 gCO₂·m⁻²·h⁻¹转化为 g C·m⁻²·h⁻¹的系数,24 和 10 是将碳排放单位由 g C·m⁻²·h⁻¹转化为 kgC·hm⁻²·d⁻¹的系数。1.3.7 碳排放效率

$$CEE = \frac{Y}{CE}$$

式中,Y 为作物籽粒产量,CE 为土壤碳排放量,CEE 为每释放 1 kg 碳所产生的籽粒产量(kg·kg⁻¹)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理与作图,用 SPSS 19.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 培肥模式对旱作全膜双垄沟播玉米生长的影响

2.1.1 对玉米干物质积累的影响 不同培肥模式下玉米的干物质积累量如表 1。随着玉米生育时期的推进,干物质积累量呈增大趋势,单施化肥和商品有机肥配施化肥能显著增加玉米干物质积累量。拨节期商品有机肥配施化肥处理较对照增加53.8%,其余处理间无显著差异;在大喇叭口期、灌浆期和成熟期,单施化肥和商品有机肥配施化肥处理的干物质积累量显著高于对照,分别较对照增加154.1%、245.9%、193.8%和162.8%、214.7%、160.4%,单施有机肥处理各生育时期与对照无显著差异。

表 1 不同培肥模式对玉米各生育时期干物质 积累量的影响/(g·株⁻¹)

Table 1 Effects of different fertilization treatments on dry matter accumulation of maize at different growth stages/(g • plant⁻¹)

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big flare stage	灌浆期 Filing stage	成熟期 Maturity
CK	11.90b	44.72b	115.37b	165.81c
N	17.18ab	113.57a	399.14a	487.07a
NM	18.34a	117.47a	363.24a	431.78b
M	12.47b	49.45b	147.86b	184.28c

注:不同字母表示处理间在 P<0.05 水平上差异显著,下同。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments at P < 0.05 level. CK-no fertilizer; N-chemical fertilizer; NM-combined chemical fertilizer with commercial organic fertilizer; M-commercial fertilizer. The same below.

2.1.2 对玉米叶面积指数的影响 由图 2 可知,玉米生长期叶面积指数表现为先增大后降低趋势,在灌浆期达到最大,单施化肥和商品有机肥配施化肥能提高玉米叶面积指数。拔节期所有处理下叶面积指数无显著差异,大喇叭口期、灌浆期和成熟期处理间叶面积指数的大小均为单施化肥>商品有机肥配施化肥>单施商品有机肥>对照,其中单施化肥和商品有机肥配施化肥处理显著高于对照,单施有机肥与对照、单施化肥与商品有机肥配施化肥处理显著高于对照,单施有机肥与对照、单施化肥与商品有机肥配施化肥处理同无显著差异。

2.1.3 对玉米生长率与净同化率的影响 表 2 为 玉米各生长阶段的生长率。随着玉米生长进程的 推进,玉米生长率表现为先增大后减小趋势,大喇叭

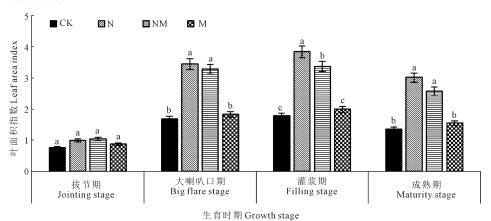


图 2 不同培肥模式下玉米叶面积指数的变化

Fig.2 Changes in leaf area index of maize under different fertilization treatments

表 2 不同培肥模式对玉米各生长阶段 生长率的影响/ $(g \cdot k^{-1} \cdot d^{-1})$

Table 2 Effects of different fertilization treatments on growth rate of maize at different growth periods/($g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1}$)

处理 Treatment	播种~ 拔节期 Sowing to jointing stage	拔节~ 大喇叭口期 Jointing to big flare stage	大喇叭口~ 灌浆期 Big flare to filling stage	灌浆~ 成熟期 Filling stage to maturity
CK	0.25b	1.22b	2.14b	0.79b
N	0.37ab	3.57a	8.65a	1.91a
NM	0.39a	3.67a	7.45a	1.49ab
M	0.27b	1.37b	2.98b	1.10ab

口期到灌浆期的积累速率最大,全生育期的干物质积累速率均为单施化肥和商品有机肥配施化肥处理显著高于对照,单施有机肥与对照无差异,单施化肥和商品有机肥配施化肥处理下的平均积累速率较对照分别增大231.8%和195.5%。

单施化肥和商品有机肥配施化肥可以显著提高玉米生长后期的净同化率(表3)。拔节期~大喇叭口期各处理间无显著差异,与对照相比,单施化肥

表 3 不同培肥模式下玉米各生长阶段净 同化率的变化 $/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

Table 3 Changes in net assimilation rate of maize under different fertilization treatments at different growth periods

处理 Treatment	拔节~ 大喇叭口期 Jointing to big flare stage	大喇叭口~ 灌浆期 Big flare to filling stage	灌浆期~ 成熟期 Filling stage to maturity
CK	1.38a	2.25b	4.03b
N	1.27a	3.17a	7.20a
NM	1.35a	3.56a	7.26a
M	1.34a	2.30b	5.12b

和商品有机肥配施化肥处理在大喇叭口期~灌浆期和灌浆期~成熟期的净同化率分别增加了 40.89%、78.66%和 58.22%、80.15%,单施化肥和商品有机肥配施化肥处理间无显著差异。

2.2 培肥模式对旱作全膜双垄沟播玉米农田土壤 呼吸及碳排放的影响

2.2.1 对土壤呼吸速率的影响 不同培肥模式下 玉米牛长期呼吸速率变化规律基本一致, 随生育时

期的推进表现为先升高后降低趋势, 开花期(7月25日)是土壤呼吸速率的高峰期, 达 5.38 μ mol·m⁻²·s⁻¹(图 3)。在玉米整个生长期内各处理下的平均土壤呼吸速率表现为商品有机肥配施化肥(3.42 μ mol·m⁻²·s⁻¹)>单施化肥(3.25 μ mol·m⁻²·s⁻¹)>)单施有机肥(2.67 μ mol·m⁻²·s⁻¹)>对照(2.42 μ mol·m⁻²·s⁻¹), 商品有机肥配施化肥、单施化肥和单施有机肥下的呼吸速率较对照分别增加 41.1%、31.0%、10.2%。

2.2.2 对土壤碳排放量与碳排放效率的影响 由 表 4 可知,培肥模式对玉米籽粒产量、碳排放总量及 碳排放效率有显著影响。单施化肥、商品有机肥配施化肥和单施商品有机肥下的玉米籽粒产量显著高于对照,较对照分别增加 151.4%、121.2%和43.3%;碳排放总量变化范围为 4 502.9~6 390.4 kg·hm⁻²,各处理下表现为:商品有机肥配施化肥>单施化肥>单施商品有机肥>对照。与对照相比,商品有机肥配施化肥、单施化肥和单施商品有机肥处理碳排放总量分别增加 41.9%、31.9%和 10.9%;单施化肥和商品有机肥配施化肥处理的碳排放效率较对照提高 92.9%和 54.5%,说明土壤培肥在增加土壤碳排放量的同时大幅增加了玉米产量,提高了碳排放效率。

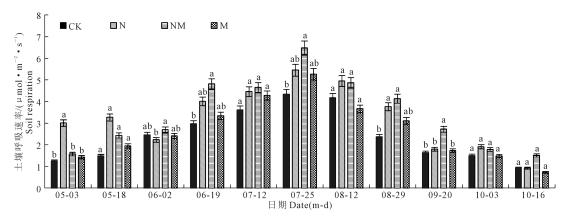


图 3 不同培肥模式下玉米田土壤呼吸速率的变化

Fig.3 Soil respiration of maize field under different fertilization treatments

表 4 不同培肥模式下玉米田土壤碳排放效率的变化

Table 4 Carbon emission efficiency of maize field under different fertilization treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield /(kg・hm ⁻²)	碳排放总量 Carbon emission /(kg·hm ⁻²)	碳排放效率 Carbon emission efficiency /(kg·kg ⁻¹)
CK	4382.33e	4502.88b	0.99с
N	11017.53a	5937.37ab	1.91a
NM	9695.01a	6390.37a	1.53ab
M	6282.04b	4994.25ab	1.26bc

2.3 不同培肥模式下土壤呼吸速率与玉米生长的 关系

由表 5 可知,不同培肥处理下土壤呼吸速率与干物质积累速率呈极显著或显著线性正相关关系。其中,商品有机肥配施化肥处理的相关系数最高,其次为单施商品有机肥,单施化肥、对照较低。单施化肥、商品有机肥配施化肥、单施商品有机肥和对照下干物质积累速率分别解释土壤呼吸速率变化的 43.59%、60.34%、47.49%和 42.14%,说明玉米生长对土壤呼吸速率有重要影响。土壤碳排放量与干物质积累量、生长速率、叶面积指数和净同化率相关分析(表 6)表明,不同培肥模式下土壤碳排

表 5 不同培肥处理下土壤呼吸速率与玉米生长速率的关系

Table 5 The relationship between soil respiration and growth rate of maize under different fertilization treatments

处理 Treatment	回归方程 Correlation equation	决定系数 R ² Coefficient of determination	相关系数 r Coefficient of correlation
CK	y = 0.4257x - 0.1288	0.4214	0.651 *
N	y = 1.6377x - 2.9469	0.4359	0.661 * *
NM	y = 1.4966x - 3.3131	0.6034	0.776 * *
M	y = 0.6291x - 0.8396	0.4749	0.689 * *

注: * 表示 P<0.05 水平上显著相关; * *表示 P<0.01 水平上显著相关,下同。

Note: * indicates significant correlation at P<0.05; * * indicates significant correlation at P<0.01. The same below.

表 6 土壤碳排放量与干物质积累量、生长速率、 叶面积指数和净同化率的相关性

Table 6 The relationship between soil carbon emission and dry matter accumulation, growth rate, leaf area index and net assimilation rate

项目 Item	干物质 积累量 Dry matter accumulation	生长速率 Growth rate	叶面积 指数 Leaf area index	净同化率 Net assimilation rate
土壤碳排放量 Soil carbon emission	0.690 * *	0.701 * *	0.697 * *	0.765 * *

量与玉米干物质积累量 $(r=0.690^{**})$ 、生长速率 $(r=0.701^{**})$ 、叶面积指数 $(r=0.697^{**})$ 和净同化率 $(r=0.765^{**})$ 均达到极显著水平。

3 讨论

氮素是作物生长发育的必须营养元素之一,在 农田生态系统中,施用氮肥、有机肥、生物固氮等是 增加氮素的主要措施。大量研究表明,施用有机肥 能增加土壤有机质和土壤肥力水平,有机无机配施 能提高土壤微生物生物量和土壤养分的供应强 度[19],有利于土壤培肥和作物增产。其主要原因 是,合理的有机无机配施通过有机肥的作用刺激了 土壤微生物活动,改善了土壤养分释放的过程[20]. 增加了作物的抗旱性,促进光合同化物的积累,提 高收获指数、增加籽粒产量。本研究中,商品有机 肥配施化肥处理玉米籽粒产量与单施化肥的增产 作用相当,而单施商品有机肥玉米的籽粒产量较单 施化肥表现为减产。说明不同肥料投入对全膜双 垄沟播玉米产量有不同的影响。鉴于黄土高原半 干旱区区域粮食安全与土壤肥力提升的同等地位, 合理的有机无机配施有利于培肥地力、提高作物产 量[21],因此,建议全膜双垄沟播玉米中采用商品有 机肥配施化肥的施肥方式。

土壤碳排放效率的高低取决于籽粒产量和土壤碳排放量相互作用的结果,能较好地反映田间生态系统的经济效益和环境效益[22]。本研究中,单施化肥和商品有机肥配施化肥下的碳排放量、碳排放效率均高于对照,但与单施化肥处理差异不显著,其主要原因是商品有机肥配施氮肥在增加碳排放量的同时,增加了玉米地上、地下部分的碳积累,提高了作物产量,进而提高了碳排放效率。

土壤呼吸速率表现出明显的季节变化,随着玉 米生育时期的推进,土壤呼吸速率均表现为先增大 后减小趋势,在开花期达到峰值,这与 Han 等^[23]研 究结果基本相同:肥料的种类以及施肥措施是影响 土壤呼吸的重要因素[24]。同时,长期土壤培肥造成 作物生长的差异,进而使得作物生长季的土壤呼吸 速率及碳排放总量出现明显差异[25]。研究表明,作 物地上部分和地下部分生物量的分布情况对土壤 呼吸起着重要作用,且作物地上部分干物质积累与 土壤呼吸呈正相关关系[26]。本试验中,单施化肥和 商品有机肥配施化肥显著增加了玉米干物质积累 量和生长率,影响了土壤呼吸速率和碳排放量,其 原因主要是单施化肥和商品有机肥配施化肥处理 满足玉米生长对养分需求,增加叶面积指数、干物 质积累[27-28]的同时增大了玉米根系呼吸[29]。有机 肥与氮肥配合施用促进土壤及加入有机肥中的有 机质的矿化^[30]也是商品有机肥配施化肥具有较高土壤呼吸速率和碳排放总量的主要原因。本研究中,单施化肥和商品有机肥配施化肥处理显著增大了玉米各时期的叶面积指数和净同化率,土壤碳排放总量与玉米干物质积累、生长速率、叶面积指数及净同化率均呈极显著正相关关系。

4 结 论

- 1) 旱作全膜双垄沟播玉米农田土壤呼吸速率随着玉米生育时期的推进,呈先增大后减小的趋势,开花期是峰值期;土壤碳排放总量与玉米干物质积累量、生长率、叶面积指数及净同化率均呈极显著正相关关系。
- 2) 纯 N 200 kg·hm⁻²的施氮水平下,商品有机 肥配施氮肥使旱作全膜双垄沟播玉米具有与单施 化肥同等的产量、碳排放和碳排放效率。

综上所述,在纯 N 200 kg·hm⁻²的施氮水平下, 商品有机肥配施化肥(本研究中有机氮与无机氮的 配比为1:1)较单施化肥具有同等的产量、碳排放 量和碳排放效率,建议在生产中应用。

参考文献:

- [1] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等.不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2326-2332.
- [2] Huang G B , Zhang R Z , Li G D , et al. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems [J]. Field Crops Research, 2008, 107(1):43-55.
- [3] 谢军红,李玲玲,张仁陟,等.覆膜、沟垄作对旱作农田玉米产量和水分利用的叠加效应[J].作物学报,2018,44(2):268-277.
- [4] 王进斌,谢军红,李玲玲,等.氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J].草业学报,2019,28(1):60-69.
- [5] 杨馨逸,刘小虎,韩晓日.施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2561-2571.
- [6] 姜慧敏,郭俊娒,刘晓,等.不同来源氮素配合施用提高东北春玉米 氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究[J].植物营养与肥料学 报,2017,23(4):933-941.
- [7] 王大鹏,郑亮,吴小平,等.旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1731-1741.
- [8] 李诗豪,刘天奇,马玉华,等.耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):447-454.
- [9] 王艳群,彭正萍,马阳,等.减氮配施氮转化调控剂对麦田 CO_2 和 CH_4 排放的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1657-1664.
- [10] 马想, 黄晶, 赵惠丽, 等. 秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量 碳氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1574-1580.
- [11] 李继明,黄庆海,袁天佑,等.长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):563-570.
- [12] 姜慧敏,郭俊娒,刘晓,等.不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):933-941.
- [13] 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.

- [14] Hungria M, Franchini J C, BrandãO-Junior O, et al. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems [J]. Applied Soil Ecology, 2009, 42(3):290-296.
- [15] Ward D, Kirkman K, Hagenah N, et al. Soil respiration declines with increasing nitrogen fertilization and is not related to productivity in long-term grassland experiments [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115:415-422.
- [16] 张前兵,杨玲,张旺锋,等.农艺措施对干旱区棉田土壤有机碳及微生物量碳含量的影响[J].中国农业科学,2014,47(22):4463-4474.
- [17] 霍龙, 逢焕成, 卢闯, 等. 地膜覆盖结合秸秆深埋条件下盐渍土 壤呼吸及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1209-1216.
- [18] 王新源,李玉霖,赵学勇,等.干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J].生态学报,2012,32(15);4890-4901.
- [19] Zhang Y L, Li C H, Wang Y W, et al. Maize yield and soil fertility with combined use of compost and inorganic fertilizers on a calcareous soil on the North China Plain[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155: 85-94.
- [20] Shisanya C A, Mucheru M W, Mugendi D N, et al. Effect of organic and inorganic nutrient sources on soil mineral nitrogen and maize yields in central highlands of Kenya [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103;239-246.
- [21] Fließbach A, Oberholzer H R, Gunst L, et al. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and con-

- ventional farming [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 118(1-4):273-284.
- [22] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的 碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 120-131
- [23] Han G, Zhou G, Xu Z, et al. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem [J]. Plant & Soil, 2007, 291(1-2):15-26.
- [24] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤 呼吸的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3174-3180.
- [25] Gong W, Yan X, Wang J. The effect of chemical fertilizer on soil organic carbon renewal and CO₂ emission—a pot experiment with maize [J]. Plant and Soil, 2012, 353(1-2):85-94.
- [26] Wardle D A. Communities and ecosystems; linking the aboveground and belowground components [J]. Austral Ecology, 2010, 29(3):358-359.
- [27] 王建国, 樊军, 王力, 等. 退耕还林还草过程中不同土地利用方式土壤呼吸作用及其碳收支评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2024-2032.
- 28] Frank A B. CO₂ fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in Northern Great Plains[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3); 397-403.
- [29] 韩广轩,周广胜,许振柱,等.玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J].生态学报,2007,27(7):5254-5261.
- [30] 苗淑杰,周连仁,乔云发,等.长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J].土壤学报,2009,46(6):1068-1075.

(上接第78页)

46%和15%,作物产量并未下降,且果实品质得到改善。说明在目前日光温室栽培条件下,常规施肥与灌水措施存在严重的过量问题,采取节水节肥措施具有巨大的潜力。同时,日光温室栽培条件下大量氮肥施人后的氮素去向及其环境效应,还需进行深入研究。

参考文献:

- [1] 喻景权,周杰."十二五"我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望 [J].中国蔬菜,2016(9):18-30.
- [2] 刘苹,李彦,江丽华,等.施肥对蔬菜产量的影响——以寿光市设施蔬菜为例[J].应用生态学报,2014,25(6):1752-1758.
- [3] 周婷.日光温室蔬菜施肥现状及减肥潜力研究[D].杨凌:西北农林 科技大学,2017.
- [4] 唐珧,李丽君,白光洁,等.山西南部设施蔬菜施肥及土壤氮磷累积 现状调查分析[J].山西农业科学,2017,45(5):773-776,785.
- [5] 余海英,李廷轩,张锡洲.温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J].中国农业科学,2010,43(3):514-522.
- [6] 白新禄,高佳佳,陈竹君,等新建日光温室土壤养分平衡与累积特性[J].中国土壤与肥料,2014(2):1-5.
- [7] 杜连凤,赵同科,张成军,等.京郊地区 3 种典型农田系统硝酸盐污染现状调查[J].中国农业科学,2009,42(8);2837-2843.
- [8] 黄绍文,王玉军,金继运,等,我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):906-918.
- [9] 周博,陈竹君,周建斌.水肥调控对日光温室番茄产量、品质及土壤养分含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(4);58-62.
- [10] 姜慧敏,张建峰,杨俊诚,等.不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(12): 2338-2345.

- [11] 谢安坤,李志宏,张云贵,等.不同施氮水平对番茄产量、品质及土壤剖面硝态氮的影响[J].中国土壤与肥料,2011,(1):26-29,68.
- [12] 刘炼红,莫言玲,杨小振,等.调亏灌溉合理滴灌频率提高大棚西瓜产量及品质[J].农业工程学报,2014,30(24):95-104.
- [13] 刘影,张玉龙,张凯,等.灌溉方法对温室栽培番茄产量及水分利用 效率的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):141-145.
- [14] 邢金金,邢英英,王秀康,等不同施肥量对陕北日光温室番茄生长、产量和土壤硝态氮的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(6):29-35.
- [15] 汤丽玲.日光温室番茄的氮素追施调控技术及其效益评估[D].北京:中国农业大学,2004.
- [16] 王士超,陈竹君,蔡红明,等.栽培年限对新建日光温室番茄生长及 土壤供氮能力的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(10): 1356-1363.
- [17] 高兵,李俊良,陈清,等设施栽培条件下番茄适宜的氮素管理和灌溉模式[J].中国农业科学,2009,42(6):2034-2042.
- [18] 闵炬,施卫明.不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):151-157.
- [19] 潜宗伟,陈海丽,刘明池.不同氮素水平对甜瓜芳香物质和营养品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1451-1458.
- 原的影响[J].植物呂乔司尼科子根,2011,17(0):1431-1438. [20] 范庆锋,张玉龙,张玉玲,等.不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的积累特征及其环境影响[J].农业环境科学学报,2017,36(11):
- 2281-2286. [21] 赵真真,左广胜,徐振同.重茬障碍的研究现状[J].中国农学通报,

2008,24(7):186-190.

- [22] 耿士均,刘刊,商海燕,等.园艺作物连作障碍的研究进展[J].北方园艺,2012,(7):190-195.
- [23] 陈志杰,梁银丽,张锋,等.温室土壤连作对黄瓜主要病害的影响 [J].中国生态农业学报,2008,16(1):71-74.
- [24] 李佳川,杨瑞平,张显灌水高温闷棚处理对温室连作土壤修复效果的影响[J].北方园艺,2016(15);172-175.