

陈仕阳,杨荣,苏永中,等.河西绿洲农田土壤呼吸特征及其对长期施肥的响应[J].中国沙漠,2022,42(3):178-186.

河西绿洲农田土壤呼吸特征及其对长期施肥的响应

陈仕阳^{1,2}, 杨 荣¹, 苏永中¹, 杜泽玉^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域综合研究站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:以河西走廊典型的荒漠绿洲新垦农田为研究对象,设置9个施肥处理(高量有机肥,M3;高量氮磷肥,NP3;低量氮磷肥+高量有机肥,NP1M3;低量氮磷钾肥,NPK1;中量氮磷钾肥,NPK2;高量氮磷钾肥,NPK3;低量氮磷钾肥+高量有机肥,NPK1M3;中量氮磷钾肥+中量有机肥,NPK2M2;高量氮磷钾肥+低量有机肥,NPK3M1),于2019—2020年7—8月采用LI-COR 8100对玉米农田土壤呼吸进行观测,分析土壤呼吸的变化、日动态及其主要影响因素。结果表明:(1)不同施肥处理,土壤呼吸速率 $M3 > NP3 > NPK1M3 > NPK3M1 > NPK2M2 > NP1M3 > NPK2 > NPK3 > NPK1$,单施有机肥能显著提高土壤呼吸速率,较其他处理增长22.1%—41.4%。(2)不同施肥措施土壤呼吸日变化呈单峰曲线,峰值出现在13:00—16:00,土壤呼吸日变化主要受土壤温度变化的影响。(3)土壤温度和土壤湿度分别解释了土壤呼吸变化的24.2%—44.8%和7.7%—36.4%,土壤呼吸与土壤温度显著正相关,而与土壤湿度无显著相关性,不同施肥处理土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值1.419—1.600。(4)土壤呼吸与有机质、总氮、总碳、碱解氮存在显著正相关关系,施用有机肥使土壤有机质、总氮、总碳、碱解氮分别提升188.9%、80.5%、79.3%、147.0%,进而促进土壤呼吸,土壤呼吸与玉米产量无显著关系。不同的施肥措施会对土壤质量和土壤呼吸产生不同影响,有机肥和氮磷钾化肥的平衡施用,能够在提升土壤质量的同时减少碳排放,可在生产实践中采用。

关键词:长期施肥;土壤呼吸;日变化;土壤温度;土壤湿度

文章编号:1000-694X(2022)03-178-09

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00147

中图分类号:S154;S158

文献标志码:A

0 引言

在陆地生态系统中,土壤碳库的碳贮量最大,约分别是植被碳库和大气碳库的3倍和2倍^[1-2]。土壤呼吸是土壤碳库向大气碳库输入碳的主要途径^[3],土壤呼吸速率相对微小的改变长期都会显著改变大气中CO₂的浓度,从而加剧或减缓全球气候变暖^[4]。农业土壤被认为在降低大气CO₂浓度和减缓温室效应方面具有很大潜力^[5-6]。中国农业用地面积约1.33×10⁷ km²,占国土总面积的14%^[7],农田生态系统土壤呼吸在中国生态系统碳循环中具有重要的调节作用。研究土壤呼吸对农田管理措施的响应,对于优化农业土壤管理,进而调节农田生

态系统碳排放具有重要意义。

施肥措施对土壤呼吸影响方面的研究受到国内外学者的普遍关注。施用一定量有机肥可以提升农田土壤呼吸速率^[8],最主要的原因是施用有机肥能显著提升土壤有机质含量,增加呼吸底物。化肥对土壤呼吸影响较小,相关研究主要在氮肥上,对于磷肥、钾肥的研究较少。关于氮肥对土壤呼吸的影响研究目前存在不同看法。部分研究表明,施用氮肥能够显著提升农田土壤呼吸速率,施氮提高了土壤中氮的有效性,促进了作物根系生长,根系呼吸作用得到加强,同时施氮促进了作物地下部根茬及其分泌物增多,使微生物活性和数量增加,微生物呼吸也随之增加^[9-11]。也有研究表明,施用氮

收稿日期:2021-08-03; 改回日期:2021-12-13

资助项目:中国科学院A类先导专项(XDA23060302);甘肃省科技计划项目(创新基地和人才计划,20JR10RA032)

作者简介:陈仕阳(1994—),男,福建南安人,硕士研究生,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: chenshiyang@necer.ac.cn

通信作者:杨荣(E-mail: yangrong@lzb.ac.cn)

肥会导致土壤呼吸速率下降,原因可能是氮元素与碳的亲合性导致碳元素的可利用性降低,进而阻碍了农田土壤微生物的代谢活动,减缓了 CO_2 的排放^[12-14]。尽管关于施肥对农田土壤呼吸的影响已有大量报道,但目前的研究结论还没有达成共识,尤其在西北干旱区荒漠绿洲的研究还相对薄弱,施肥对荒漠绿洲土壤呼吸的作用机制还有待进一步的探讨。

本研究区域为近几十年来由老绿洲向荒漠扩展的新垦绿洲,自2005年开始进行肥料长期定位试验,近年来相继开展了长期施肥对作物生产力表现、土壤养分演变规律及土壤微生物群落变化等影响方面的研究^[15-16],但对其如何影响土壤呼吸过程方面的了解不足,制约了对该区域农田生态系统碳素释放过程及其环境调控机制方面的认识。因此,本研究基于连续14年的农田定位试验,选择在玉米关键生育期对农田土壤呼吸速率的测定,研究其对长期施肥的响应方式及主要影响因子,确定河西绿洲新垦农田土壤呼吸变化规律,以期揭示长期施肥条件下干旱区绿洲农田碳排放特征,为合理制定施肥管理措施、减少农田土壤碳排放提供科学依据,有利于干旱区绿洲农田的可持续健康发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在中国科学院临泽内陆河流域研究站($39^{\circ}14' - 39^{\circ}24' \text{N}$, $100^{\circ}02' - 100^{\circ}21' \text{E}$),位于河西走廊中部、临泽荒漠-绿洲过渡带,隶属于甘肃省张掖市,海拔1350—1400 m。该区属于典型的温带大陆性荒漠气候,年平均气温为 7.6°C ,多年平均降水量117 mm,多年平均潜在蒸发量2390 mm,无霜期165 d。近年来,该区域主要种植制种玉米,农作物生产主要依赖于灌溉和高量的化肥投入,以地下水为主要灌溉用水,采用传统耕作方式。

1.2 试验设计

前期研究^[15-16]已对试验设计进行了详细描述,本文仅对与本实验相关的试验设计进行再次描述。长期施肥处理试验始于2005年,共设计9个处理,随机区组排列,3次重复,小区面积 13.7 m^2 。试验处理分别为:高量有机肥M3(腐熟牛粪 $24\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、高量氮磷肥NP3($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5$, $300-225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、低量氮

磷肥+高量有机肥NP1M3($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5$, $150-90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 腐熟牛粪 $24\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、低量氮磷钾肥NPK1($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $150-90-90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、中量氮磷钾肥NPK2($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $225-135-135 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、高量氮磷钾肥NPK3($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $300-225-225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、低量氮磷钾肥+高量有机肥NPK1M3($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $150-90-90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 腐熟牛粪 $24\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、中量氮磷钾肥+中量有机肥NPK2M2(NPK1M3, $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $225-135-135 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 腐熟牛粪 $18\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、高量氮磷钾肥+低量有机肥NPK3M1(NPK1M3, $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $300-225-225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 腐熟牛粪 $12\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。供试化肥氮肥为尿素,磷肥为磷二铵,钾肥为硫酸钾,所用有机肥为腐熟牛粪,含有机碳 $90.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $5.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试玉米品种为农大364,种植方式为一膜两行,膜宽60 cm,膜间距40 cm,种植密度 $67\,000 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米生长期为4—9月,期间每隔10 d灌水1次,采用漫灌方式,以地下水为主要灌溉用水,年灌水定额为 $8\,500-11\,500 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,使用水表记录各小区灌水量。

1.3 分析测定方法

选择每个小区中央玉米行间位置设置1个PVC呼吸环,呼吸环高10 cm、直径20 cm,将呼吸环一端打入土中,使另一端露出地面3 cm。土壤呼吸测定于2019、2020年7、8月开展,每隔10 d左右测定1次,选择试验前3 d无降雨、灌溉的晴天,使用开路式土壤呼吸观测系统(LI-8100, LI-COR, 美国)进行土壤呼吸测定,同时利用LI-8100辅助监测端口同步测定5 cm处土壤温度及土壤含水量。观测前1天,使用剪刀将PVC环内地表杂草剪除,除草过程中避免对土壤的扰动。每次观测时,于同一日07:00—21:00对27个小区进行土壤呼吸测定,每3 h观测1次,每天记录5次。

2018年玉米收获后,每个试验小区使用环刀法取3个0—20 cm耕层样测定土壤容重,并用土钻在每个小区多点取0—20 cm耕层样,混合风干后过筛,用于土壤有机质(SOM)及养分含量的测定。全碳和全氮含量采用元素分析仪(Maco-cube Elementar, 德国)测定,土壤有机质(SOM)及氮、磷、钾养分含量的测定用常规分析方法^[17],SOM采用重铬酸钾外加热法测定,全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定,水解性氮采用碱扩散法测定,速效磷

采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;土壤机械组成采用比重计速测法;pH值采用PH计测定(1:5土水比)。

玉米在9月上旬进行收获,每个试验小区取中间4行(共8行)玉米进行风干,手工脱粒称重,测定含水量,计算玉米籽粒产量。

1.4 数据处理与分析

数据经Excel 2019整理后,在SPSS 20.0中进行分析,作图采用Origin 2019软件,本文中涉及的误差棒均为标准差(SD)。取一天所测5个时间点的呼吸速率平均值为当日平均呼吸速率,采用方差分析和LSD比较不同施肥处理农田土壤呼吸的差异性,Pearson相关分析检验土壤理化性质、温湿度与土壤呼吸的相关性。

土壤温度与土壤呼吸的关系采用 $R_s = ae^{bT}$ 指数模型^[18]进行拟合, R_s 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, a 、 b 为待定参数。 Q_{10} 表示土壤呼吸的温度敏感性,通过 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算, b 为土壤温度与土壤呼吸拟合方程的参数。土壤湿度与土壤呼吸的关系采用二项式模型 $R_s = a\theta^2 - b\theta + c$ 进行拟合, R_s 为土壤呼吸速率, θ 为土壤湿度, a 、 b 、 c 为待定参数。

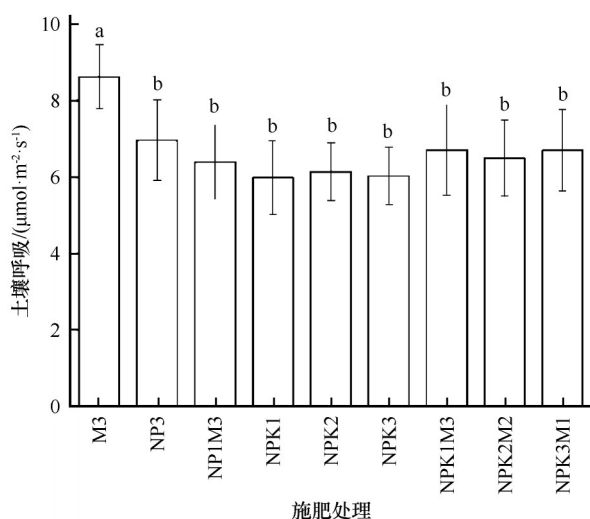
2 结果与分析

2.1 土壤呼吸差异

图1为7、8月玉米抽雄期—成熟期5个观测日的平均土壤呼吸速率,大小顺序为M3>NP3>NPK3M1>NPK1M3>NPK2M2>NPK2>NP1M3>NPK3>NPK1,依次为8.46、6.83、6.55、6.36、6.26、6.23、6.18、5.86、5.60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。有机肥的施用显著提高土壤呼吸作用,其中单施有机肥土壤呼吸强度最高,增长23.94%—51.05%,有机肥无机肥配施次之。无机肥用量对土壤呼吸无显著影响,增施无机肥对于土壤呼吸无促进作用。

2.2 土壤呼吸及土壤温度日变化

图2为不同施肥处理下农田土壤呼吸及土壤温度日变化曲线。9种不同施肥处理下土壤呼吸和土壤温度均存在明显日变化规律,具体表现为单峰型,NPK1日变化幅度最大(4.78—6.50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),NPK3M1日变化幅度最小(5.57—6.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。



不同字母表示处理间差异达到5%显著水平

图1 不同施肥处理土壤呼吸

Fig.1 Soil respiration in different fertilization treatments

施肥处理对土壤呼吸日变化格局产生影响,M3、NPK1M3、NPK2M2、NPK3M1处理土壤呼吸峰值出现在16:00左右,NP3、NP1M3、NPK2、NPK3、NPK1处理土壤呼吸峰值出现在13:00左右。土壤温度与土壤呼吸的日变化趋势存在较高的一致性,Pearson相关分析表明,各施肥处理下土壤呼吸日变化与土壤温度均呈极显著相关(表1, $P<0.01$)。

2.3 土壤呼吸与土壤温湿度的关系

探讨土壤呼吸与土壤温度的关系时,最常用的关系是线性模型和指数模型^[19]。本研究结果采用Lloyd-Taylor指数模型^[18]拟合效果更好(表2)。土壤温度是影响本研究土壤呼吸的主要因素,其解释了土壤呼吸变化的24.2%—44.8%($P<0.01$)。不同施肥处理中,NPK3和NPK2土壤温度和土壤呼吸相关性最强,NP3和NP1M3相关性最弱。土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 常被用来描述土壤呼吸与温度的关系, Q_{10} 值越大表示土壤呼吸对温度的依赖性越大。采用指数模型计算出来的 Q_{10} 值1.419—1.600,施肥处理 Q_{10} 值NPK3>NPK2M2>NP3=NPK1=NPK3M1>M3>NPK1M3>NP1M3=NPK2, Q_{10} 值差异不显著。

土壤湿度对土壤呼吸的直接影响是通过影响根和微生物的生理过程,对土壤呼吸的间接影响是通过影响呼吸底物和氧气的扩散^[20]。不同施肥处理农田7—8月平均土壤湿度11.6%—14.3%,NP1M3平均土壤湿度最高,NP3最低。将土壤呼吸与土壤

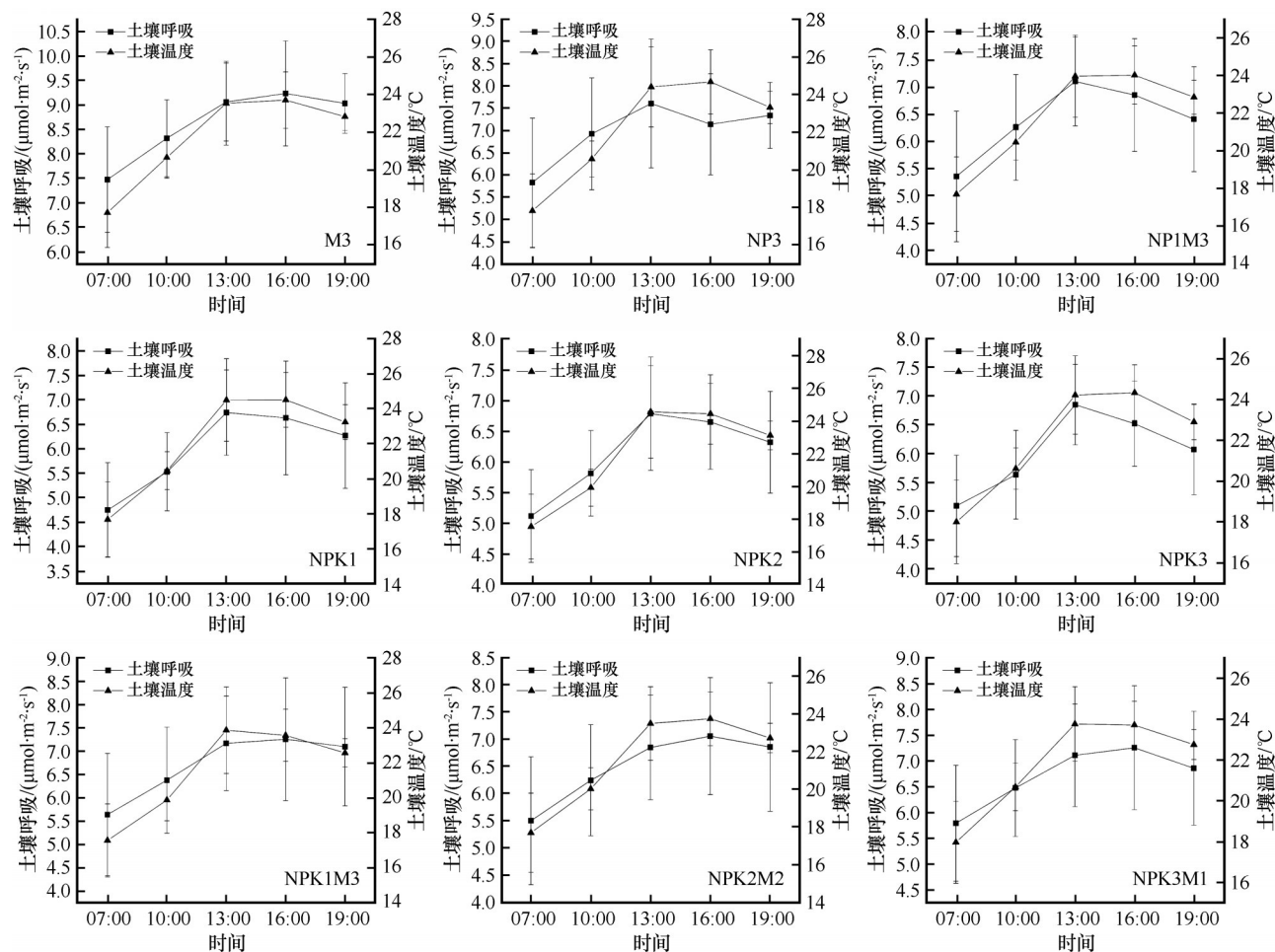


图2 不同施肥措施下的土壤呼吸和土壤温度日变化

Fig.2 Daily variation of soil respiration and soil temperature in different types of fertilization treatments

表 1 不同施肥处理土壤呼吸日变化与土壤温度日变化的相关性

Table 1 Correlation between diurnal variation of soil respiration and soil temperature									
处理	M3	NP3	NP1M3	NPK1	NPK2	NPK3	NPK1M3	NPK2M2	NPK3M1
相关系数	0.601	0.383	0.425	0.498	0.624	0.638	0.466	0.517	0.551
显著性	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

湿度分别采用线性、对数、倒数、乘幂、指数、对数、二项式模型进行拟合,结果除NP3呈指数关系外,其余处理土壤呼吸与土壤湿度呈显著的二项式函数关系,拟合方程结果见表3。在土壤湿度较低时,土壤呼吸随土壤湿度上升而上升;土壤湿度较高时,土壤呼吸随土壤湿度上升而下降。土壤湿度可以解释土壤呼吸变化的7.7%—36.4%,Pearson相关分析表明,土壤呼吸与土壤湿度无显著线性相关性。

2.4 土壤基本化学性质、玉米产量与土壤呼吸的相关性

LSD方差分析表明(表4),施用有机肥可以显

著提高土壤有机质、全氮、碱解氮含量,较单施氮磷钾肥分别提升了188.9%、80.5%、147.0%;全磷的含量与磷肥的施用量显著正相关;pH值和土壤容重则是单施无机肥显著高于单施有机肥和有机肥无机肥配施;玉米产量NPK2M2>M3>NPK3M1>NPK1M3>NPK3>NP1M3>NPK2>NPK1>NP3,有机肥氮磷钾肥配施和单施有机肥的玉米产量显著高于其他处理。Pearson相关分析表明(表5),土壤呼吸与土壤有机质、全氮、碱解氮呈显著正相关关系,与容重呈显著负相关关系,与全磷、pH、玉米产量无显著相关关系。

表 2 土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T)的关系方程参数以及土壤呼吸的温度敏感性系数(Q_{10})

Table 2 Fitted equation parameters of soil respiration rate with soil temperature and temperature sensitivity of soil respiration rate (Q_{10})

处理	拟合方程	R^2	样本数	P	土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10}
M3	$R_s=3.828e^{0.0377T}$	0.375	60	<0.01	1.448
NP3	$R_s=2.663e^{0.0417T}$	0.204	60	<0.01	1.507
NP1M3	$R_s=2.906e^{0.0357T}$	0.199	60	<0.01	1.419
NPK1	$R_s=2.372e^{0.0417T}$	0.269	60	<0.01	1.507
NPK2	$R_s=2.818e^{0.0357T}$	0.391	60	<0.01	1.419
NPK3	$R_s=2.121e^{0.0477T}$	0.448	60	<0.01	1.600
NPK1M3	$R_s=3.001e^{0.0367T}$	0.242	60	<0.01	1.433
NPK2M2	$R_s=2.563e^{0.0427T}$	0.297	60	<0.01	1.522
NPK3M1	$R_s=2.683e^{0.0417T}$	0.299	60	<0.01	1.507

表 3 土壤呼吸(R_s)与土壤湿度(θ)的关系方程及平均土壤湿度

Table 3 Fitted equation parameters of soil respiration rate with soil moisture and average soil moisture

处理	拟合方程	R^2	样本数	P	平均土壤湿度/%
M3	$R_s=1.222\theta^2-0.051\theta+1.791$	0.113	60	<0.05	12.8
NP3	$R_s=8.485e^{-0.021\theta}$	0.077	60	<0.05	11.6
NP1M3	$R_s=0.219\theta^2-0.013\theta+6.090$	0.154	60	<0.01	14.2
NPK1	$R_s=0.346\theta^2-0.018\theta+4.954$	0.288	60	<0.01	13.3
NPK2	$R_s=-0.119\theta^2+0.001\theta+7.48$	0.137	60	<0.05	13.3
NPK3	$R_s=0.817\theta^2-0.040\theta+2.472$	0.364	60	<0.01	12.0
NPK1M3	$R_s=0.782\theta^2-0.030\theta+1.977$	0.189	60	<0.01	14.3
NPK2M2	$R_s=0.084\theta^2-0.010\theta+7.206$	0.266	60	<0.01	13.3
NPK3M1	$R_s=0.571\theta^2-0.032\theta+4.766$	0.345	60	<0.01	11.8

表 4 长期不同施肥处理对土壤理化性质及玉米产量的影响

Table 4 Effects of continuous fertilization on soil properties and maize yield

处理	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	pH 值	容重/(g·cm ⁻³)	产量/(kg·hm ⁻²)
M3	23.57±0.98 ^a	2.00±0.08 ^a	1.40±0.04 ^c	99.25±2.73 ^a	8.58±0.02 ^b	1.25±0.05 ^b	13 456±617 ^{ab}
NP3	9.06±1.01 ^{de}	1.17±0.05 ^{cd}	1.85±0.09 ^b	40.82±4.21 ^{cd}	8.80±0.04 ^a	1.43±0.06 ^a	10 221±1000 ^b
NP1M3	10.24±0.12 ^d	1.31±0.03 ^c	1.49±0.03 ^c	48.27±1.60 ^c	8.78±0.01 ^a	1.46±0.02 ^a	11 943±470 ^b
NPK1	8.32±0.72 ^{de}	1.13±0.03 ^d	1.29±0.06 ^c	41.29±2.77 ^{cd}	8.84±0.01 ^a	1.47±0.01 ^a	11 465±834 ^b
NPK2	7.05±0.71 ^e	1.05±0.03 ^d	1.50±0.03 ^c	36.46±2.36 ^d	8.79±0.05 ^a	1.43±0.03 ^a	11 792±369 ^b
NPK3	9.10±0.27 ^{de}	1.15±0.03 ^{cd}	2.17±0.15 ^a	42.81±0.68 ^{cd}	8.61±0.08 ^b	1.43±0.01 ^a	12 812±719 ^{ab}
NPK1M3	21.94±1.21 ^a	1.93±0.10 ^a	1.68±0.03 ^{bc}	93.56±6.03 ^a	8.53±0.03 ^b	1.27±0.03 ^b	12 596±662 ^{ab}
NPK2M2	18.16±1.70 ^b	1.68±0.05 ^b	1.75±0.0 ^{8b}	73.75±5.72 ^b	8.52±0.01 ^b	1.31±0.02 ^b	14 111±755 ^a
NPK3M1	14.31±0.71 ^c	1.54±0.04 ^b	2.04±0.11 ^{ab}	65.28±2.92 ^c	8.52±0.03 ^b	1.38±0.02 ^{ab}	12 925±667 ^{ab}

不同字母表示处理间差异达到5%显著水平。

土壤呼吸作为一个复杂的生物化学过程,受到其所处土壤环境的综合作用。对有机质、全碳、全氮、全磷和pH等13个土壤基本性质进行了主成分分析(表6),共提取到3个公因子。第1公因子F1

表 5 土壤呼吸与土壤基本化学性质之间的相关性($n=27$)

Table 5 Linear correlation coefficients among soil respiration rate and soil chemical properties

指标	有机质	全氮	全磷	碱解氮	pH 值	容重	产量
相关系数	0.484	0.497	-0.258	0.469	-0.112	-0.392	0.093
显著性	0.011	0.008	0.195	0.014	0.579	0.043	0.645

表 6 土壤呼吸影响因子主成分分析特征值和贡献率

Table 6 The eigenvalues and variance of principal component analysis on influencing factors for soil respiration

公因子	因素分量	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
F1	有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效钾、容重	7.4	56.92	56.92
F2	砂粒、粉粒、黏粒	2.6	20.24	77.16
F3	全磷、速效磷	1.7	13.45	90.61

的贡献率均 56.92%，其中有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效钾、土壤容重有较大负荷，因此 F1 主要反映了土壤有机质及碳氮钾元素状况。第 2 公因子的贡献率 20.24%，其中砂粒、粉粒、黏粒有较大负荷，所以 F2 主要反映土壤机械组成状况。第 3 公因子 F3 的贡献率 13.45%，主要反映土壤的磷元素状况。

3 讨论

3.1 施肥措施对土壤呼吸速率及日变化的影响

本研究试验地为连续多年的肥料长期定位试验，前期研究发现连续施肥处理 10 年后，土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮及有效磷均有一定程度的提高，这些土壤养分的变化可能会对土壤呼吸产生影响^[15]。本试验结果表明，不同施肥措施对土壤呼吸的影响效果不同，土壤呼吸总体趋势表现为单施高量有机肥土壤呼吸速率最高，有机肥无机肥配施次之，单施无机肥土壤呼吸速率最低。施用有机肥能促进土壤呼吸，原因可能有以下几个方面。一是施入有机肥可以提高农田土壤有机碳含量，增加土壤呼吸作用底物^[21]；二是施肥促进作物生长，提高了植物根系的呼吸强度；三是有机肥无机肥配施或单施有机肥均有利于增加土壤微生物群落多样性^[22]，提高了微生物呼吸的 CO₂ 排放量。单施有机肥的土壤呼吸速率显著高于有机肥无机肥配施，而有机肥无机肥配施的土壤呼吸速率与单施无机肥无显著差异，说明无机肥对土壤呼吸起抑制作用，抵消了有机肥对土壤呼吸的促进作用。单施有机肥对土壤呼吸的促进效果强于有机肥无机肥配施，这与有的研究结果一致^[23-24]，但与另外的关于有机肥无机

肥配施促进效果更强的研究结果不一致^[25-26]，这可能是由于不同土壤区系的土壤微生物和植被对土壤营养元素的需求不同，导致无机肥施用对土壤呼吸产生不同效应。

多数研究结果表明，森林、草原、湿地和农田等生态系统土壤呼吸日变化动态均呈单峰型^[21]，本研究也得出了相同的结论。不同施肥措施土壤呼吸日变化均表现为明显的单峰型曲线，施肥并未改变土壤呼吸的日变化趋势，但会对土壤呼吸大小及峰值的出现时间产生影响，M3、NPK1M3、NPK2M2、NPK3M1 处理土壤呼吸峰值出现在 16:00 左右，NP3、NP1M3、NPK2、NPK3、NPK1 处理土壤呼吸峰值出现在 13:00 左右，说明有机肥的施用会使土壤呼吸峰值出现时间推后，这可能是由于不同施肥玉米秸秆长势不同，植被盖度有所差异，导致土壤受到的光照强度不同，土壤温度也就不同。土壤呼吸速率的日变化趋势与土壤温度基本一致，说明影响土壤呼吸日变化规律的主要驱动因子是温度的昼夜周期变化，而其他环境因子，如土壤湿度、根系生物量和土壤理化性质等日周期变化幅度较小，对土壤呼吸日变化的影响不明显^[27]。

3.2 不同施肥措施下土壤呼吸速率对水热因子的响应

尽管影响土壤呼吸速率的因素众多，但温度（包括土壤温度和空气温度）是最重要的因子，由此常被用来解释土壤呼吸速率的大部分变化^[28]。本研究结果显示土壤温度与土壤呼吸存在显著的正相关关系，土壤温度解释了土壤呼吸速率变化的 24.2%—44.8% ($P<0.01$)。在一定温度范围内，土壤

温度升高对植物根系的呼吸作用、土壤微生物活动、土壤中凋落物和有机质分解均有促进作用^[29],从而增加了土壤中CO₂向大气排放。 Q_{10} 值表示温度每升高10℃土壤呼吸速率增加的倍数,本研究结果显示不同施肥措施的土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值1.42—1.60,低于世界平均水平(2.4)^[19],这是由于本研究测量时间在7、8月,土壤温度较高,导致土壤呼吸温度敏感性下降。王小国等^[30]发现旱地农田全年 Q_{10} 平均值2.74,其中7、8月 Q_{10} 值分别为1.54、1.79,为全年最低。这表明 Q_{10} 值存在随温度升高而降低的趋势,即在高温时土壤呼吸对温度的变化敏感性降低。本研究中,不同施肥措施下 Q_{10} 值的差异不显著,说明施肥对土壤呼吸温度敏感性无影响或影响较小。

土壤水分是影响土壤呼吸的另一关键因子,其与土壤呼吸的关系较为复杂,Kucera等^[31]认为,当土壤水分处于田间持水量和萎蔫系数之间时,土壤水分对土壤呼吸的影响较小,当土壤水分超过田间持水量或低于永久萎蔫点时,才成为土壤呼吸的限制因素。土壤水分是影响干旱区土壤呼吸的重要因素,但农田生态系统由于受到灌溉等人类活动干预,只有在极端条件下水分才会对土壤呼吸起限制作用^[21]。本研究结果显示,土壤水分解释了土壤呼吸变化的7.7%—36.4%,其解释量低于土壤温度,Pearson相关分析表明,土壤水分与土壤呼吸无显著线性相关性,这是由于定期定量灌溉使农田土壤水分在合适的范围中变化,因而土壤呼吸对土壤水分敏感性较低。

3.3 影响土壤呼吸速率变化的其他因子

土壤呼吸是复杂的生物地球化学过程,为了更深入地了解其控制机理及过程,仅仅研究土壤温度及土壤湿度是不够的,Raich等^[32]认为土壤微环境的不同导致植物群落间土壤呼吸差异。土壤理化性质影响根系和微生物的数量和分布,因而也间接影响着土壤呼吸^[19]。本研究结果表明,长期施肥将显著改变土壤的理化性质,施用有机肥能显著提升土壤的有机质、全氮、碱解氮含量,并降低土壤容重,而土壤呼吸也与土壤有机质、全氮、碱解氮、土壤容重呈显著相关,主成分分析结果说明土壤有机质和碳氮钾元素含量是土壤理化性质中影响土壤呼吸的主要因子,因此可以认为有机肥的施用改变了土壤有机质、营养元素含量和土壤容重,进而对

土壤呼吸产生影响。本研究中,中量氮磷钾肥+中量有机肥的施肥方式玉米产量最高,而土壤呼吸速率较其他处理则无显著提升。因此,采用适量有机肥氮磷钾肥配施的方式,能够在提升土壤质量和玉米产量的同时,减缓土壤呼吸的CO₂排放。为了进一步探明施肥对干旱区农田土壤呼吸的影响及其机制,还需要开展多因素的长期观测研究,对提升研究区农田土壤质量可提供一定的参考依据,也可作为土壤碳循环和减少温室气体排放提供理论依据。

4 结论

长期不同施肥模式下,土壤呼吸速率整体表现为单施有机肥>有机肥无机肥配施>单施无机肥,施用有机肥能促进土壤呼吸,而施用无机肥对土壤呼吸有一定抑制作用;土壤呼吸日变化呈现明显的单峰型,施肥不会改变日变化趋势,但会对峰值出现时间产生一定影响,温度是土壤呼吸日变化的主要环境驱动因子;土壤呼吸与土壤温度呈显著正相关,指数模型能较好拟合二者关系,其解释了土壤呼吸变化的24.2%—44.8%,土壤水分在合适范围时对土壤呼吸影响较小;施用有机肥能显著提高土壤养分含量,进而促进土壤呼吸作用,单施有机肥土壤呼吸速率高于有机肥无机肥配施,但玉米产量低于适量的有机肥无机肥配施。因此,从可持续发展和生态保护方面考虑,有机肥和无机肥的平衡施用,能够在提升土壤质量和作物产量的同时减少CO₂的排放,可在生产实践中采用。

参考文献:

- [1] Wilfred M P, Peng T H, William R, et al. The global carbon cycle[J]. American Scientist, 1990, 78(4): 1736.
- [2] Johnson M G, Kern J S, Lammers D A, et al. Sequestering carbon in soils: a workshop to explore the potential for mitigating global climate change[R]. Corvallis, USA, 1990.
- [3] William H S, Jeffrey A A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7–20.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [5] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003(6): 980–987.
- [6] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008(3): 734–743.
- [7] 时光慧. 2016年中国国土资源公报[M]//中华人民共和国年鉴社, 中华人民共和国年鉴, 2017: 400–405.
- [8] 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(6):687-692.
- [9] 李建敏,丁维新,蔡祖聪.氮肥对玉米生长季土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2025-2030.
- [10] Ding W X, Meng L, Yin Y F. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39: 669-679.
- [11] 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,2013,22(1):18-24.
- [12] Grandy A S, Sinsabaugh R L, Neff J C, et al. Nitrogen deposition effects on soil organic matter chemistry are linked to variation in enzymes, ecosystems and size fractions[J]. Biogeochemistry, 2008, 91(1): 37-49.
- [13] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin[J]. Tree Physiology, 1995, 15(2): 317-325.
- [14] 刘妍,周连仁,苗淑杰.长期施肥对黑土酶活性和微生物呼吸的影响[J].中国土壤与肥料,2010(1):7-10.
- [15] 苏永中,杨荣,刘婷娜.施肥对新垦绿洲风沙土肥力及碳积累的影响[J].中国沙漠,2019,39(3):1-6.
- [16] Yang R, Su Y Z, Yang Q. Crop yields and soil nutrients in response to long-term fertilization in a desert oasis[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(1): 83-92.
- [17] 中国生态系统研究网络科学委员会.陆地生态系统土壤观测规范[M].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [18] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [19] 周洪华,李卫红,杨余辉,等.干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J].地理科学,2011,31(2):190-196.
- [20] Luo Y Q, Zhou X H. Soil Respiration and the Environment[M]. San Diego, USA: Academic Press, 2006.
- [21] 韩广轩,周广胜,许振柱.中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J].植物生态学报,2008(3):719-733.
- [22] 刘振香,刘鹏,贾绪存,等.不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):113-121.
- [23] 王艳萍,高吉喜,冯朝阳,等.北京郊果园施用不同农肥的土壤呼吸特征研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2009,35(1):77-83.
- [24] 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,2012,49(7):1294-1300.
- [25] 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.
- [26] 张前兵,杨玲,王进,等.干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J].中国农业科学,2012,45(12):2420-2430.
- [27] Han G X, Zhou G S, Xu Z 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 and Soil, 2007, 291(1/2): 15-26.
- [28] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1024-1041.
- [29] 刘春霞,王玉杰,王云琦,等.重庆缙云山3种林型土壤呼吸及其影响因子[J].土壤通报,2013,44(3):587-593.
- [30] 王小国,朱波,王艳强,等.不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J].生态学报,2007,27(5):1960-1968.
- [31] Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri[J]. Ecology, 1971, 52(5): 912-915.
- [32] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 87-90.

Characteristics of soil respiration in farmland of Hexi oasis and its response to long-term fertilization

Chen Shiyang^{1,2}, Yang Rong¹, Su Yongzhong¹, Du Zeyu^{1,2}

(1. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The soil respiration rate was measured by LI-COR 8100 in the newly reclaimed farmlands in Hexi desert oasis in July and August from 2019 to 2020. We analyzed the changes of soil respiration rate and diurnal dynamic variation under 9 different fertilization treatments to determine the key factors. The results showed that: (1) The soil respiration rate was influenced by M3, NP3, NPK1M3, NPK3M1, NPK2M2, NP1M3, NPK2, NPK3, NPK1 in turn from high level to low level. This indicates that the treatment of organic fertilizers application alone significantly increased soil respiration rate by 22.1%–41.4% in comparison with combined manure with chemical fertilizers and the treatment of chemical fertilizers alone. (2) The diurnal dynamic variation of soil respiration in different fertilization presented unimodal curve, and the peak value was found in the periods of 13:00–16:00. The diurnal dynamic variation of soil respiration had a significant correlation with soil temperature (5 cm). (3) Soil temperature (5 cm) and soil moisture (5 cm) could explain 24.2%–44.8% and 7.7%–36.4% of soil respiration, respectively. A remarkable correlation was found between soil respiration rate and soil temperature, but soil respiration rate had no significant correlation with soil moisture. The temperature sensitivity coefficient of soil respiration Q_{10} was in the range of 1.419 to 1.600, which was lower than the world average value of 2.4, because high temperature led to decreased sensitivity of soil respiration to temperature changes. (4) Soil respiration was significantly negatively correlated with organic matter, total nitrogen, total carbon and available nitrogen. After applying organic fertilizers, soil organic matter, total nitrogen, total carbon and available nitrogen increased by 188.9%, 80.5%, 79.3% and 147.0% respectively. Thus soil respiration was promoted. There is no significant relationship between soil respiration and maize yield. In conclusion, fertilization measures have an effect on soil quality and soil respiration rate. The balanced application of organic and inorganic fertilizers can improve soil quality while reducing CO₂ emissions, which can be adopted in production practice.

Key words: long-term fertilization; soil respiration; diurnal dynamic variation; soil temperature; soil moisture