

不同耕作方式下旱作玉米田土壤 CO₂ 排放量 及其与土壤水热的关系

张俊丽¹,张锦丽²,赵晓进¹,廖允成³,景小丽¹,薛 菁¹

(1.渭南市农业技术推广中心,陕西 渭南 714000;2.武汉市东西湖区环境监测站,湖北 武汉 430000;
3.西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探讨不同耕作方式对旱作玉米田土壤 CO₂排放量的影响,设置深松耕(DT)、翻耕(PT)和免耕(NT)3个处理,分析3种耕作方式下土壤 CO₂排放量的动态变化及其与土壤温度和土壤水分间的关系。结果显示:2010~2011年夏玉米生长季,3种耕作方式下土壤 CO₂排放量均呈先增后降的变化趋势,表现为 DT>PT>NT,且不同处理间差异显著($P<0.05$);耕作方式可显著影响夏玉米生育前期土壤温度,且土壤 CO₂排放量对不同耕作方式下土壤温度的敏感性不同,土壤温度分别可以解释 PT、DT 和 NT 处理土壤 CO₂排放量季节变化的 50.72%~53.90%、48.10%~59.63%和 13.31%~19.90%;土壤水分和温度共同分别可以解释旱作夏玉米田 DT 和 PT 处理下土壤 CO₂排放量季节变化的 57.61%~76.83%和 56.62%~67.12%。土壤温度和水分是影响旱作农田 DT 和 PT 处理下土壤 CO₂排放量的关键因素。

关键词:土壤 CO₂排放量;土壤温度;土壤水分;夏玉米;耕作方式
中图分类号:S157 **文献标志码:**A

Effects of different tillages on soil CO₂ flux, and its relation to soil moisture and soil temperature in dry-land maize field

ZHANG Jun-li¹, ZHANG Jin-li², ZHAO Xiao-jin¹, LIAO Yun-cheng³, JING Xiao-li¹, XUE Jing¹
(1. Weinan City Agricultural Technology Promotion Center, Weinan Shaanxi 714000, China;
2. Environment Monitor Station in Dongxihu District of Wuhan, Wuhan Hubei 430000, China;
3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: An experiment was conducted to explore the effects of different tillages on soil CO₂ flux, and its relation to soil moisture and soil temperature in dry-land maize field. Summer maize was planted using three different tillages, including deep tillage (DT), plow tillage (PT) and no tillage (NT). The results indicated that soil CO₂ flux was first increased and then decreased in all 3 tillage systems during the whole maize growth period in 2010~2011, the maximum of soil CO₂ flux was DT, followed by PT, and NT, and there was significant difference between different treatments ($P<0.05$). The effect of tillage system on soil temperature are more significant at early stage than at later stage. There was difference in the temperature sensitivity of soil CO₂ flux in different tillages, Soil temperature could explain 50.72%~53.90%, 48.10%~59.63% and 13.31%~19.90% seasonal variation of soil CO₂ flux under PT, and DT and NT treatments. Soil temperature and soil moisture could explain 57.61%~76.83% and 56.62%~67.12% seasonal variations of soil CO₂ flux under DT and PT treatments, indicating that soil temperature and soil moisture are the key factors affecting soil CO₂ flux under DT and PT treatments in dry-land maize field.

Keyword: soil CO₂ flux; soil temperature; soil moisture; summer maize; tillage system

以温室气体增加导致的全球气候变暖是当前备受关注的全球性环境问题^[1-2],CO₂是主要的温室气体之一,增温贡献率达 56%^[3]。农田土壤 CO₂排放量占人类活动释放到大气 CO₂排放量的 1/4^[4],微小的土壤 CO₂排放量改变可明显影响大气中的 CO₂浓度,从而减缓或加剧气候变暖^[1,5-6]。因此,明

确农田土壤 CO₂排放量的变化规律及其调控机制对客观评估区域碳排放及评价碳源/汇效应有重要意义。农田生态系统受人为活动和自然环境影响较大,耕作、施肥、种植制度、土壤 pH 值及土壤温度和水分等改变都可使土壤 CO₂排放量呈现空间和时间上的差异^[2,4-8]。有研究显示,土壤水分和温度是影响农田土壤 CO₂排放的关键因素,两者相互协调共同调控土壤 CO₂排放^[1,6-7,9],耕作、施肥等措施直接或间接影响农田土壤水分和温度,进而改变土壤 CO₂排放量^[1,3,6-9]。土壤水分、温度与土壤 CO₂排放量的关系可以用线性、指数、二次函数等模型描述,通过建立模型分析土壤水热与土壤 CO₂排放量的关系,有助于了解未来气候变化条件下旱作农田土壤碳排放的规律^[5-6,8-9]。目前,有关土壤 CO₂排放量与土壤水热关系的研究较多,但立足旱作夏玉米田的研究尚不多见。旱作农田在农田生态系统中占有重要地位,而夏玉米又是我国西北地区“压夏扩秋”的重要粮食作物,研究旱作夏玉米田碳排放对探讨粮食安全和节能减排有重要意义。因此,本研究基于旱作夏玉米农田,分析不同耕作方式下土壤水热与土壤 CO₂排放量的关系,以期客观预测未来气候条件下土壤碳排放量及补充完善土壤碳排放机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2010-2011 年在西北农林科技大学试验田(E108°10',N34°21')进行。该区域年均日照 2 196 h,无霜期约 220 d,年均温 12~14℃,2000-2010 年 10 a 年均降雨量 602.45 mm,降雨主要集中在 6-9 月(图 1),2010、2011 年夏玉米生长季(6 月 20 日至 10 月 15 日)降雨量分别为 496.0 mm 和 695.4 mm。

1.2 试验设计

本研究为长期定位试验,始于 2008 年 10 月。设深松耕(DT)、翻耕(PT)和免耕(NT)3 个处理。深松耕:冬小麦收获后,深松机(西北农林科技大学机械与电子工程学院研制)深松耕 30~35 cm;翻耕:冬小麦收获后,翻耕机翻耕 25~30 cm;免耕:冬小麦收获后,为保证出苗,旋耕机浅旋 5 cm 左右。采用硬茬播种机播种,玉米品种巡天 19 号,播种量 90 kg·hm⁻²,株距 24 cm,行距 60 cm,每年 6 月 20 日播

种,10 月 15 日收获。底肥施尿素[ω(N)=46%]375 kg·hm⁻²、过磷酸钙[ω(P₂O₅)=16%]750 kg·hm⁻²,不追肥。每处理 3 次重复,小区面积 10 m×25 m=250 m²。整个生育期试验田不灌水,全部为旱作,除草、除虫等农田管理措施与当地农田一致。

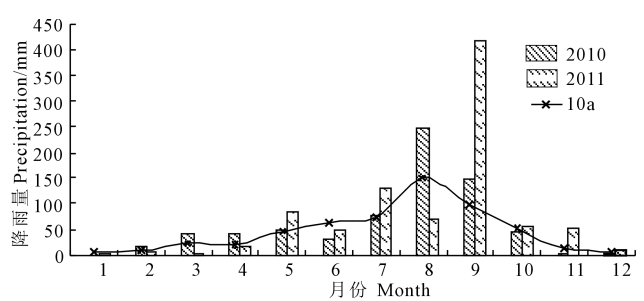


图 1 2010-2011 年试验区降雨情况
Fig.1 Rainfall condition at experimental site in 2010 and 2011

1.3 测定项目

1.3.1 土壤 CO₂排放量 采用便携式红外 CO₂气体分析仪(型号:GXH-3010E1,北京华云仪器有限公司生产)测定。参考张俊丽等^[7]方法测定。

1.3.2 土壤温度 播种后,将地温计埋至作物行间,测定 5~20 cm 地温(5 cm 为 1 层)。6 月 19 日至 10 月 15 日每 10 d 观测一次(若有降雨适当调整),每小区埋设 3 套地温计,作为 3 次重复。

1.3.3 土壤水分 测定土壤 CO₂排放量当天,用土钻取 0~40 cm 土壤样品,带回实验室采用烘干称量法测定土壤含水量,3 次重复。

1.4 数据分析

土壤 CO₂排放量(R)计算:
$$R = k(X_2 - X_1) H / \Delta t$$

土壤温度与土壤 CO₂排放量的关系:
$$R = ae^{bT} \quad R = a + bT + cT^2$$

土壤 CO₂排放量对温度的敏感性(Q₁₀):
$$Q_{10} = e^{10b}$$

土壤水分、温度与土壤 CO₂排放量的关系:
$$R = a + bT + cW + dTW$$

式中,R 为土壤 CO₂排放量[mg·(m²·h)⁻¹];k 为换算系数,k=1.80(25℃,1 个标准大气压);X₁、X₂ 分别为测定时 CO₂初始质量分数和测定结束后 CO₂即时质量分数(mg·kg⁻¹);H 为气室高(m);Δt 为测定时间变化(h);T 为地温(℃),Q₁₀为土壤呼吸敏感系数;W 为土壤质量含水量(%),a、b、c、d 均为参数。

采用 Excel 2007 和 DPS 7.05 软件分析处理数据,Duncan 新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下旱作夏玉米田土壤 CO₂ 排放量分析

不同耕作方式下旱作夏玉米田土壤 CO₂ 排放量变化规律一致,均随玉米生育期推进呈先增加后下降的变化趋势(图 2 和图 3)。播种前,土壤 CO₂ 排放量较低,但不同处理间差异显著 ($P<0.05$),这可能是因为播种前试验田已进行相应耕作处理,土壤结构发生变化,土壤 CO₂ 排放量表现出差异。播种后,土壤 CO₂ 排放量逐渐升高,玉米出苗后(2010 年为播种后 11 d,2011 年为播种后 9 d)迅速升高,这是因为播种后试验区进入雨季,水分、气温均适宜,夏玉米生长迅速,出苗后,玉米根呼吸增强,并且施入的氮肥为土壤微生物提供了丰富的氮源和能源,进一步促进玉米根系生长和土壤微生物呼吸,使土壤 CO₂ 排放量明显增强;作物生育后期生长减缓,根系活力降低,且气温逐渐降低,表现为土壤 CO₂ 排放量减小,至成熟收获时降至低值。

不同年际间,3 种耕作处理间土壤 CO₂ 排放量差异明显,其中,2010 年夏玉米生长季 DT、PT 和 NT 3 个处理下土壤 CO₂ 排放量均值分别为 670.93、594.49 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 222.04 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,2011 年则分别为 549.13、454.65 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 203.14 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,2 a 试验期间,3 个处理土壤 CO₂ 排放量均表现为 DT>PT>NT,且处理间差异均达到显著

水平($P<0.05$)。由图 2 和图 3 可知,2011 年 PT 和 DT 处理土壤 CO₂ 排放量明显低于 2010 年,这可能与 2011 年夏玉米生长季气温明显低于 2010 年有关(图 4);2011 年 3 种处理土壤 CO₂ 排放量峰值出现时间晚于 2010 年,这可能与 2011 年夏玉米生育后期有明显降雨有关(图 5)。

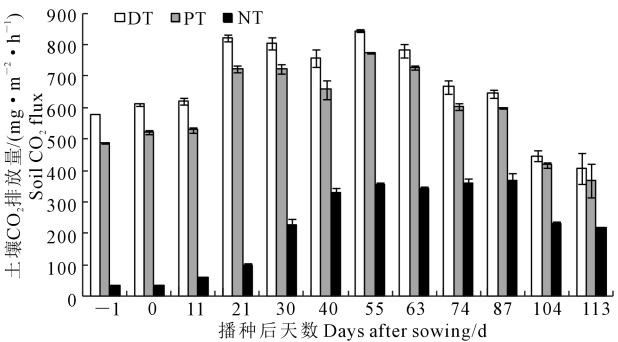


图 2 2010 年不同耕作方式下土壤 CO₂ 排放量
Fig.2 Soil CO₂ flux under different tillage systems in 2010

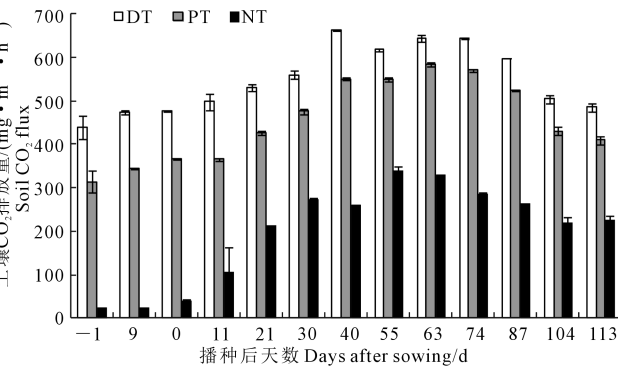


图 3 2011 年不同耕作方式下土壤 CO₂ 排放量
Fig.3 Soil CO₂ flux under different tillage systems in 2011

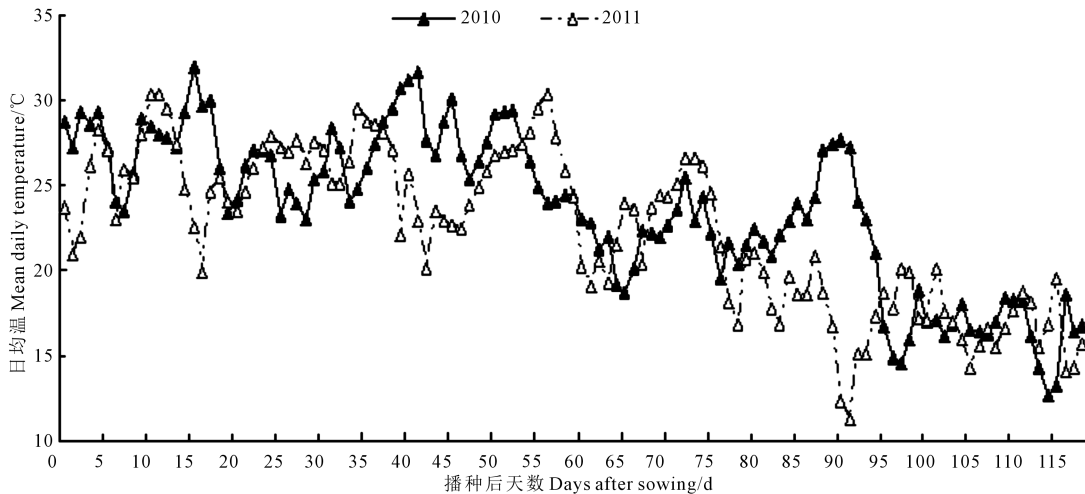


图 4 作物生长季内日均气温
Fig.4 Mean daily temperature during crop growth season

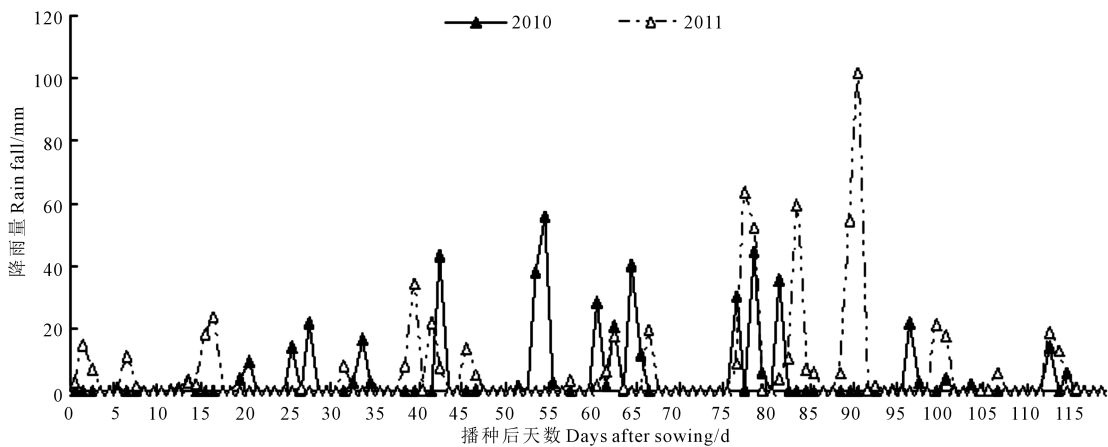


图 5 作物生长季内日均降雨量

Fig.5 Mean daily rainfall during crop growth season

2.2 不同耕作方式下旱作夏玉米田土壤温度与土壤 CO₂排放量的关系

2 a 试验期间,不同土层间表现为土壤温度随土层深度增加而降低,5 cm 和 10 cm 土壤温度明显高于 15 cm 和 20 cm,且 5 cm 和 10 cm 土壤温度差异不显著($P>0.05$)。分析不同土层温度可知,各耕作方式对土壤温度的影响差异集中在 5 cm,且表现为在夏玉米生育前期(播种后 0~30 d)影响明显,后期(播种 50 d 后)逐渐缩小。2 a 试验期间,播种后 0~30 d,PT 和 DT 处理差异不显著($P>0.05$),但两者均显著高于 NT($P<0.05$),其中 2010 年 5 cm 土壤温度均值表现为 PT(27.4 ℃)>DT(27.1 ℃)>NT(26.7℃),2011 年为 PT(28.1℃)>DT(27.2℃)>NT(26.7℃),且 2011 年播种后 0~9 d,PT 处理土壤温度均显著高于 DT 和 NT($P<0.05$)。播种后 50 d 至收获期间,3 种耕作方式下各土层土壤温度间的差异均未达到显著水平($P>0.05$)。

分析不同土层土壤温度与土壤 CO₂排放量关系可知,5 cm 土壤温度与土壤 CO₂排放量相关性最明显,且 DT 和 PT 处理 5 cm 土壤温度与土壤 CO₂排放

量呈显著正相关(相关系数 0.52),因此,本研究用 5 cm 土壤温度分析土壤温度与土壤 CO₂排放量的关系。结果显示,指数方程和二次函数方程均可拟合土壤温度与土壤 CO₂排放量的关系(表 1)。指数方程拟合下,土壤温度可以解释土壤 CO₂排放量季节变化的 9.40%~32.78%,其中,PT、DT 和 NT 处理下,土壤温度分别可以解释土壤 CO₂排放量季节变化的 18.39%~19.70%、17.68%~32.78%和 9.40%~14.87%,其 Q_{10} 值分别为 1.22~1.23、1.17~1.33 和 1.11~1.15;二次函数拟合下,土壤温度分别可以解释 PT、DT 和 NT 处理土壤 CO₂排放量季节变化的 50.72%~53.90%、48.10%~59.63%和 13.31%~19.90%。说明,二次函数方程比指数方程更适于拟合不同耕作方式下旱作夏玉米田土壤 CO₂排放量和土壤温度的关系。另外,由表 1 可知,2 a 试验期间,无论是二次函数拟合还是指数方程拟合结果均一致,均表现为翻耕和深松耕处理下土壤温度与土壤 CO₂排放量拟合结果优于免耕,说明翻耕和深松耕条件下,土壤温度对土壤呼吸速率的敏感性高于免耕。

表 1 土壤 CO₂排放量与 5 cm 土层土壤温度指数拟合方程

Table 1 Fitted equation of soil CO₂ flux with 5 cm's soil temperature value

年份 Year	处理 Treatment	拟合方程(指数) Fitted equation	R^2	Q_{10}	拟合方程(二次函数) Fitted equation	R^2
2010	NT	$R = 584.93e^{0.0117T}$	0.0940	1.11	$R = -277.27 + 57.62T - 1.50T^2$	0.1331
	PT	$R = 358.00e^{0.0217T}$	0.1839	1.23	$R = -2174.09 + 233.98T - 4.79T^2$	0.5390
	DT	$R = 331.16e^{0.0297T}$	0.3278	1.33	$R = -2067.223.01T - 4.42T^2$	0.5963
2011	NT	$R = 731.80e^{0.0147T}$	0.1487	1.15	$R = -727.16 + 94.79T - 2.28T^2$	0.1990
	PT	$R = 754.71e^{0.0207T}$	0.1970	1.22	$R = -1716.96 + 194.07T - 4.18T^2$	0.5072
	DT	$R = 692.72e^{0.0167T}$	0.1768	1.17	$R = -1882.78 + 217.03T - 4.70T^2$	0.4810

2.3 不同耕作方式下旱作夏玉米田土壤水分与土壤 CO₂排放量的关系

2010 年,整个生育期间 DT、NT 和 PT 处理 0~

40 cm 土壤水分均值分别为 21.34%、22.53% 和 21.22%,2011 年分别为 22.91%、23.03%和 22.72%,2 a 试验期间,NT 处理土壤水分均值明显高于 DT

和 PT($P>0.05$),且生育前期(2010 年为播种后 0~55 d,2011 年播种后 0~40 d)表现明显,如 2010 年播种前 1 d 至播种后 55 d,NT 处理土壤含水量分别比 DT 和 PT 高 6.38%和 4.75%,播种后 55~113 d 分别高 3.79 和 2.74%,说明 NT(免耕)处理较其他 2 种耕作方式有较好的蓄水保墒效果,但生育后期差异逐渐缩小。

除土壤温度外,土壤水分也是影响土壤 CO₂排放量的主要因素^[1,5-6]。本研究中,单独分析土壤 CO₂排放量与土壤水分关系时,两者无明显相关性($P>0.05$),二次函数拟合下,土壤水分仅分别可以解释 2010、2011 年夏玉米生长季土壤 CO₂排放量季节变化的 15.89%~25.95%、0.82%~18.39%。但试验区夏玉米生长季降雨量占年降雨量的 63.3%~70.6%,且该时间段气温高、水分蒸发量大,这种强蒸发、高温炎热相叠合的独特气候特征,使得在预

测土壤 CO₂排放量时不得不综合考虑土壤水分与土壤温度的相互作用。诸多研究显示,将土壤温度和土壤水分整合成一个方程可以提高土壤 CO₂排放量预测的准确性^[1,5-6,9]。本研究显示,采用 $R=a+bT+cW+dTW$ 函数方程可以较好拟合土壤 CO₂排放量与土壤水和温度的关系(表 2),试验条件下,土壤温度和土壤水分共同分别可以解释 DT、PT 和 NT 处理土壤 CO₂排放量季节变化的 57.61%~76.83%、56.62%~67.12%和 21.26%~22.32%。说明,土壤温度和水分的是影响 DT 和 PT 处理下土壤 CO₂排放量的主要因素。另外,由表 2 可知,2 a 试验期间,深松耕和翻耕处理土壤温度、土壤水分与土壤 CO₂排放量拟合结果均优于免耕,说明深松耕和翻耕条件下土壤温度和水分对土壤 CO₂排放量的敏感性高于免耕,且 $R=a+bT+cW+dTW$ 函数方程可以较好预测不同水温条件下旱作夏玉米田土壤 CO₂排放量。

表 2 土壤 CO₂排放量与土壤水分和土壤温度拟合方程
Table 2 Fitted equation of soil CO₂ flux and soil moisture and soil temperature

年份 Year	处理 Treatment	拟合方程 Fitted equation	R^2	F	P
2010	NT	$R=-898.44+58.69W+29.36T-1.69WT$	0.2232	0.7660	0.5443
	PT	$R=1858.37-78.82W-79.64T+4.57WT$	0.6712	5.4438	0.0247
	DT	$R=691.74-34.47W-23.99T+2.52WT$	0.7683	8.8405	0.0064
2011	NT	$R=-2063.85+111.22W+98.60T-4.84WT$	0.2126	0.8098	0.5197
	PT	$R=-2398.46+135.63W+109.20T-5.23WT$	0.5662	1.3243	0.3250
	DT	$R=-2157.12+122.38W+98.07T-4.47WT$	0.5761	1.1443	0.3827

3 结论与讨论

3.1 耕作方式对土壤 CO₂排放量的影响

夏玉米生长季,深松耕和翻耕处理土壤 CO₂排放量显著高于免耕,主要是因为深松耕和翻耕对土壤的扰动程度高于免耕,耕翻措施在一定程度上改变了土壤通透性,促使有机质分解,并将前茬作物的脱落物和根茬掩埋至土壤深处,加速腐解,表现为土壤 CO₂排放量增加^[5-6,11-12];与翻耕和深松耕比较,免耕有效减少土壤扰动及土壤与空气的接触机会,抑制有机质分解,减少土壤碳排放量,这与张丁辰等^[6]、张宇等^[11]、胡立峰等^[12]研究结果一致。本研究条件下,深松耕处理土壤 CO₂排放量高于翻耕,这与刘武仁等^[10]的少免耕处理土壤 CO₂排放量低于传统耕作的结论不一致,这可能是因为本研究中深松耕耕深达 35 cm,犁底层打破有效促进了玉米根系生长,根呼吸和根际微生物呼吸增强,进而表现为土壤 CO₂排放量增加。前期研究显示^[7],本试验条件下深松耕处理夏玉米根长达 58.2 cm,显著高于翻耕(50.00 cm)和免耕(40.40 cm)。Luo 等^[13]研

究也显示,根呼吸占土壤呼吸的 50%左右,不同试验条件下根呼吸占土壤呼吸的比例为 10%~90%^[14],根呼吸排放出 CO₂是土壤 CO₂的重要来源。本研究中,2 a 试验期间免耕处理土壤 CO₂排放量变化不明显,说明免耕土壤各项理化性质较翻耕和深松耕处理更为稳定,当外界气候条件发生变化时受影响较小^[13];年际间,不同耕作方式土壤 CO₂排放量表现出明显差异,这可能与年际间气温和降雨存在差异有关。

3.2 土壤水分、温度对土壤 CO₂排放量的影响

耕作方式对土壤温度、水分影响明显^[5-7,11,13-14]。本研究中,不同耕作方式下土壤温度表现为 PT>DT>NT,且在夏玉米生育前期(播种后 0~30 d)表现明显,后期(播种 50 d 后)差异逐渐缩小,这与 Hatfield 等^[14]研究的免耕可暂时保墒但可降低生育前期土壤温度的结果一致,生育后期各处理差异逐渐缩小可能是因为随植物生长发育,植物地表植被遮蔽程度增加,太阳辐射对土壤温度影响逐渐减弱^[15],使处理间差异逐渐缩小。2 a 试验期间,NT 处理土壤水分均值明显高于 DT 和 PT,且在

生育前期(2010 年为播种后 0~55 d,2011 年播种后 0~40 d)表现明显,生育后期差异逐渐缩小,说明免耕未进行翻耕,表土水分损失较小,较其他处理有较好的蓄水保墒效果,生育后期差异逐渐缩小可能与人为干扰、作物生长及降雨等因素有关^[5-6,9,11,13]。

土壤 CO₂排放是一个复杂的过程,其受土壤温度、水分以及有机质、微生物等诸多因素的影响^[1,5-6,8,11,13]。众多研究显示^[5-6,8-9,11,16-17],土壤温度是影响土壤 CO₂排放的关键因素,明确土壤温度与土壤 CO₂排放量间的关系,有助于准确估算不同耕作方式下土壤 CO₂排放量的大小,进而帮助预测陆地生态系统土壤碳库在未来气候变化情形下碳源汇转化对气候变化的影响。前人多采用乘幂(Power)、线形(Linear)、二次(Quadratic)、指数(Exponential)模型等分析土壤温度与土壤 CO₂排放量的关系,建立的模型不同得到的结论也存在一定差异^[1,5-6,8,11],本研究显示,指数方程和二次函数方程均可以拟合土壤温度与土壤 CO₂排放量的关系,且二次函数拟合的准确性高于指数方程。王立刚等^[15]、李虎等^[1]研究均显示,土壤水分也是影响农田土壤 CO₂排放量的主要因素,土壤水分主要通过影响土壤通气状况和氧化还原状况影响土壤碳排放;也有研究显示^[18],土壤水分主要通过影响植物根系分布、土壤微生物呼吸及根呼吸等影响土壤碳排放。本研究显示,单独分析土壤水分与土壤 CO₂排放量时,两者相关性不显著,说明,土壤水分不是影响土壤 CO₂排放的直接因素,这与陈述悦等^[19]、李虎等^[1]研究结果一致。有研究显示^[1,5-6,8,19],土壤水分与土壤温度相互协调共同影响土壤 CO₂排放。韩广轩等^[8-9]研究得出,土壤水分和温度与土壤 CO₂排放量的关系可用模型 $R = ae^{bT}Wc$ 、 $R = a + bT + cW + dTW$ 等描述。本研究显示,模型 $R = a + bT + cW + dTW$ 可以较好反映土壤温度、水分与土壤 CO₂排放量的关系,且试验条件下,土壤温度和水分可以解释 DT、PT 和 NT 处理土壤 CO₂排放量季节变化的 57.61%~76.83%、56.62%~67.12% 和 21.26%~22.32%。这也说明,土壤温度和水分是影响深松耕和翻耕旱作夏玉米田土壤 CO₂排放量的主要因素,且土壤水分对土壤 CO₂排放量的影响取决于与土壤温度的相互协调作用。

4 结 论

夏玉米生长季,3 种耕作方式下土壤 CO₂排放量均值表现为 DT>PT>NT($P<0.05$),且随生育期推进呈先增后降的变化趋势;土壤水分和温度均为影

响土壤呼吸的主要因素,2 a 试验期间 NT 处理土壤水分均值明显高于 DT 和 PT,土壤温度表现为 PT>DT>NT;土壤温度和水分是影响 DT 和 PT 处理土壤 CO₂排放量的主要因素,两者共同分别可以解释 DT 和 PT 处理旱作夏玉米田 CO₂排放量季节变化的 57.61%~76.83% 和 56.62%~67.12%。

参 考 文 献:

- [1] 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): 15-20.
- [2] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273.
- [3] IPCC. Special report on fluxes scenarios; a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张丁辰,蔡典雄,代快,等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1916-1925.
- [7] 张俊丽, Sikander Khan Tanveer, 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.
- [8] 韩广轩,周广胜,许振柱,等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 363-371.
- [9] 韩广轩,周广胜,许振柱. 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1698-1705.
- [10] 刘武仁,郑金玉,罗洋,等. 玉米秸秆还田对土壤呼吸速率的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 105-108, 113.
- [11] 张宇,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): 47-52.
- [12] 胡立峰,李洪文,高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 308-312.
- [13] Luo Yiqi, Zhou Xuhui. 姜丽芬,曲来叶,周玉梅,等译. 土壤呼吸与环境[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [14] Hatfield J L, Allmaras R R, Rehm G W, et al. Ridge tillage for corn and soybean production: environmental quality impacts[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48(3): 145-154.
- [15] 宋振伟,郭金瑞,邓艾兴,等. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 108-114.
- [16] 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 observation[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 115-146.
- [17] 王立刚,邱建军,李维纲. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料, 2002, (6): 13-17.
- [18] 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.
- [19] 陈述悦,李俊,陆佩玲,等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1552-1560.