

DOI: 10.5846/stxb201503030403

杜珊珊, 丁新宇, 杨倩, 张清平, 沈禹颖. 黄土旱塬区免耕玉米田土壤呼吸对降雨的响应. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Du S S, Ding X Y, Yang Q, Zhang Q P, Shen Y Y. Response of soil respiration of corn field under no tillage to precipitation events in loessial tablelands. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

黄土旱塬区免耕玉米田土壤呼吸对降雨的响应

杜珊珊, 丁新宇, 杨倩, 张清平, 沈禹颖*

兰州大学草地农业科技学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730020

摘要:在多年定位试验的基础上, 采用 LI-8150-16 多通道土壤碳通量测量系统对传统耕作和免耕处理下玉米田的土壤呼吸进行了连续观测, 以探讨不同耕作措施处理下土壤呼吸对降雨的响应。结果表明: 降雨发生瞬间, 土壤呼吸受应激反应影响迅速降低, 传统耕作和免耕处理下分别较降雨前降低 62.9%—92.9% 和 35.8%—56.9%; 降雨后, 传统耕作和免耕处理土壤呼吸的降幅范围分别为 31.5%—89.2% 和 15.7%—59.9%; 土壤体积含水量接近于 18% 时, 传统耕作下土壤呼吸比免耕下高 51.8%, 当土壤体积含水量高于 30% 时, 传统耕作下土壤呼吸比免耕处理下低 43.0%, 表明传统耕作土壤呼吸更易受土壤水分的影响, 波动幅度大; 传统耕作处理下土壤呼吸随土壤温度的升高而增大, 免耕处理下土壤呼吸随土壤温度的升高变化不明显; 土壤体积含水量较小 (<20%) 时, 不同耕作处理下土壤呼吸均随土壤含水量增加而增加, 含水量较高 (>30%) 时则均随土壤含水量的升高而减小, 两种情况下均为免耕处理的变化速率更大; 双因子线性模型可较好地描述玉米田土壤呼吸对温度和水分变化的响应。

关键词:免耕; 雨养农业; 土壤呼吸; 降雨

Response of soil respiration of corn field under no tillage to precipitation events in loessial tablelands

DU Shanshan, DING Xinyu, YANG Qian, ZHANG Qingping, SHEN Yuying*

College of Pastoral Agricultural Science and Technology, Lanzhou University, The State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystems, Lanzhou 730020, China

Abstract: Soil respiration in terrestrial ecosystems plays an important role in global carbon cycling. However, our understanding of the effects of precipitation on soil respiration is still very limited, particularly for conservation agricultural systems. This study was conducted to investigate the effects of long-term no-till practice on soil respiration in a corn field under rain-fed conditions in the loessial tablelands of northwest China. The no-till experiment was established in a maize/winter wheat/soybean rotation field in 2001 at Qingyang Experimental Station of Lanzhou University, which is located in the east of Gansu Province and in the rain-fed agricultural production zone of the western Loess Plateau. Experiments examining the effects of precipitation events on fluctuations in soil respiration were carried out in July 2013 under tillage and no-till conditions. Soil respiration was measured using the LI-8150-16 multi-channel soil carbon flux measurement system, which also recorded synchronous soil moisture and soil temperature data. The dynamics of soil respiration before and after several precipitation events were analyzed and relationships between soil respiration and factors affecting it (mainly soil temperature and soil water conditions) were examined. Soil respiration decreased immediately when rainfall occurred; soil respiration under tillage and no-till treatments decreased by 62.9%—92.9% and 35.8%—56.9%, respectively. After the precipitation event, soil respiration under tillage and no-till decreased by 31.5%—89.2% and 15.7%—59.9%, respectively, from soil

基金项目:甘肃省重大科技专项-庆阳黄土高原生态治理与水资源高效利用研究与示范 (1203FKDA035); 教育部重大科技项目-黄土高原雨养农业区粮草轮作系统调控有害生物的关键机理研究 (313028); “草地农业系统耦合与管理” 教育部长江学者创新团队项目 (IRT13019)

收稿日期: 2015-03-03; 修订日期: 2016-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn

respiration before the precipitation event. Soil respiration under tillage was 51.8% higher than that under no-till when soil water content was around 18%, while soil respiration under tillage was 43.0% lower than that under no-till when the soil water content was over 30%, indicating that soil respiration under tillage was more sensitive to soil water content. Soil respiration under both treatments had a linear relationship with soil temperature. Soil respiration under both treatments increased with soil temperature; however, the linear relationship under tillage ($R^2 = 0.56$) was more significant than that under no-till ($R^2 = 0.36$), indicating that the soil respiration under tillage was more sensitive to soil temperature. Soil respiration was also significantly linearly related to soil water content ($P < 0.05$). Under both tillage treatments, soil respiration increased with soil water content when the soil volumetric water content was below 20%, while soil respiration decreased as soil water content increased when the soil volumetric water content was over 30%. The responses of soil respiration to the synergic effects of soil temperature and soil water content could be satisfactorily described with the two-factors linear model under both treatments ($P < 0.001$), although the correlation coefficient under tillage treatment was higher than that under no-till treatment. The results presented in this work will serve as a basis for further research on the mechanisms by which precipitation affects soil respiration, and can also help to evaluate the effects of the no-till practice on the carbon balance of terrestrial ecosystems under rain-fed conditions.

Key Words: no tillage; rain-fed agriculture; soil respiration; precipitation

土壤呼吸主要包括自养呼吸和异养呼吸,是全球碳循环不可缺少的部分^[1-2],其微小变化就能够对大气中 CO₂ 浓度产生较大影响^[3]。农田土壤既是温室气体重要排放源,也是它们的吸收汇^[4]。众多研究表明土壤水分和温度是影响土壤呼吸的主要因素^[5]。在旱作地区,干旱和降雨交替的发生显著影响土壤温度和湿度,进而直接影响了土壤呼吸动态^[6-7]。近年来,世界范围内极端降雨事件和干旱发生的频率趋于增加^[8-9]。然而,降雨事件对土壤呼吸的影响作用还尚不明确,研究结论也因试验条件不同而存在差异^[10-19]。在热带森林系统的研究发现降雨持续 1.5h 后,比降水前土壤 CO₂ 通量降低了约 30%^[16]。在亚马逊草地生态系统中全年土壤呼吸速率在降水量较高的年份明显大于降水量相对较低的年份,其差值高达 1.8 倍^[17]。在中国南方亚热带森林,降雨成倍增加可使松林的土壤呼吸有所增加,但对阔叶林土壤呼吸的影响不显著^[18]。降雨对作物田土壤呼吸影响效应的研究较少。张红星等研究表明,降雨对黄土高原小麦田土壤呼吸的影响主要和降雨前后的土壤水分状况有关^[19]。少免耕措施通过减少耕作过程对土壤的干扰,可改变土壤的水热状况,促进土壤肥力的构建,加强微生物群落的活性^[20-21],并且利于降低土壤呼吸速率^[22-23],但少免耕下土壤呼吸对降水事件的响应未见文献报道。因此,本研究在多年定位试验的基础上,采用原位连续监测技术,对传统耕作和免耕处理下玉米田的土壤呼吸进行了连续观测,以探讨不同耕作措施处理下土壤呼吸对降雨的响应。研究结果可为完善旱作农业区生态保护型农作模式,评价未来气候变化对区域碳平衡的影响等提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验观测在兰州大学庆阳黄土高原试验站(107°51'E, 35°39'N, 海拔 1298m)开展,试验站位于陇东黄土高原中部。年降雨量 480—660mm,全年 70% 以上的降雨集中在 7 至 9 月,年蒸发量 1100—1500mm,年日照时数 2300—2700h,年均气温 8—10℃,极端最高气温达到 39.6℃,极端最低气温 -22.4℃,无霜期 150—190d。土壤类型为黑垆土,有机质含量低于 1%,土壤含氮量低于 0.1%,pH 值为 8.0—8.5^[22]。0—60cm 土层平均田间持水量为 33.6%(体积含水量)。土壤呼吸测定期间降雨量和大气温度如图 1 所示。

1.2 试验设计

免耕 (NT) 试验处理始于 2001 年,设传统耕作 (T) 为对照,每个处理 4 个重复,完全随机区组排列,共 8 个小区,每个小区面积为 4m×13m。传统耕作处理分别于作物收获后和播种前各翻耕一次,耕深 30cm 左右;免

耕处理除播种时采用联合作业的免耕播种机作业外,其余时间不扰动土壤^[22]。本试验土壤呼吸的测定于2013年7月进行,此时玉米处于大喇叭口-抽雄期。

1.3 数据采集

土壤呼吸采用LI-8150-16多通道土壤碳通量测量系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA)连续测定。每个小区安置2个呼吸气室,共安置16个呼吸气室。测定前将直径20cm、高10cm的土壤呼吸底座(PVC)埋入土壤中,露出地面5cm与呼吸室紧密接触(定期除去底座PVC环内的生物活体)。为了减少安置测定基座PVC环对土壤系统的破坏造成的短期呼吸速率波动,基座安置24h后再进行测定。土壤呼吸每52min测定一次。每次测定时呼吸气室的观测时间为90s,测定前后的排空时间为105s,完成一次测定共需要5min。每次测定中呼吸数据的采集频率为每秒1个,一次共测定90个值,开始测定的前10s非稳定期,主机在计算时自动舍弃这部分测定值。利用土壤碳通量测量系统自带的温度探针(E型热电偶)和水分传感器(EC-5)记录5cm深度处的土壤温度和土壤水分电压值(V)。利用式(1)可将电压值转换成土壤体积含水量(θ_v):

$$\theta_v = -3.14 \cdot 10^{-7} \cdot V^2 + 1.16 \cdot 10^{-3} \cdot V - 6.12 \cdot 10^{-1} \quad (1)$$

1.4 数据统计分析

土壤呼吸数据采集频率为每小时1次,各处理下采用每小时8个自动通量呼吸室的平均值。采用SPSS 17.0软件对传统耕作和免耕处理下的土壤呼吸速率差异进行方差分析,拟合降雨过程及前后土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(T_s)及含水量(θ_v)之间的关系:

$$R_s = a \cdot T_s + b \quad (2)$$

$$R_s = a \cdot \theta_v + b \quad (3)$$

$$R_s = a \cdot T_s + b \cdot \theta_v + c \quad (4)$$

式中, a 、 b 和 c 均为拟合系数,线性方程的拟合效果用决定系数 R^2 评价。分析土壤含水量对土壤呼吸速率影响时,(3)式中选用由降雨量、饱和水汽压差和距上次降雨时间决定的再加湿系数(I_w)小于0.3的数据,以粗略选择出对土壤含水量变化较为敏感的呼吸通量值(当 $I_w > 0.3$ 时,温度为主要影响因子)^[23]。 I_w 计算公式如下:

$$I_w = \alpha + \log\left(\frac{\sqrt{R}}{VPD_a t^2}\right) \quad (5)$$

式中, α 为常数2.5, R 为降雨量(mm), VPD_a 为24h内地面1.5m高处测得的平均饱和水汽压差(kPa), t 为距上次降雨的时间长度(h,以>1mm/h降雨量计)。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率的变化趋势

图2显示了研究时段内传统耕作和免耕处理下土壤呼吸的变化趋势。两个处理的变化趋势基本一致,但变化幅度不同。土壤呼吸在每次降雨后先迅速降低,然后逐渐回升。初次降雨事件使土壤含水量迅速增加,土壤呼吸速率急剧降低,土壤水分达到田间持水率以后,土壤呼吸速率的降幅明显减小(图2)。传统耕作处理下土壤呼吸日平均速率降幅明显比免耕处理高10.6%—25.9%,表明传统耕作下土壤呼吸更易受降雨的影响。

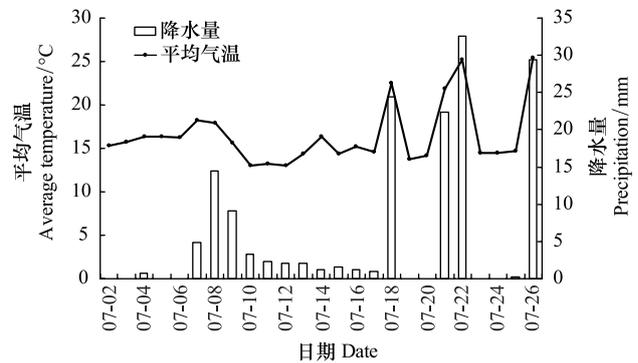


图1 2013年7月试验地平均气温变化和降雨量分布

Fig.1 In July 2013, average temperature change and the daily precipitation distribution of experimental site

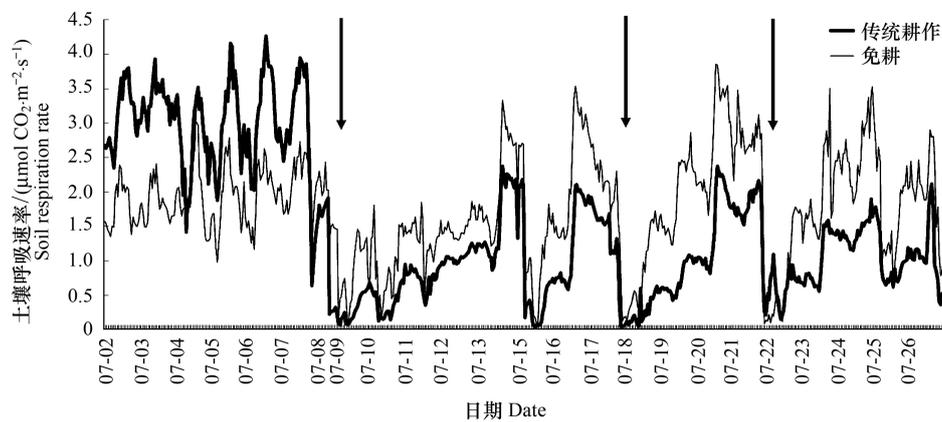


图2 降雨前后传统耕作(T)与免耕(NT)处理下土壤每小时呼吸速率

Fig.2 Hourly soil respiration rate under conventional tillage (T) and no-till (NT)

图中箭头指示降雨开始

第一次强降雨(7月8—9日)降雨量为21.6mm,土壤日均温度由降水前的25.7℃下降到19.8℃,而土壤含水量则由17.4%增加至32.5%。降雨前,土壤呼吸日平均速率在传统耕作处理下较免耕高34.1%,降雨发生瞬间,传统耕作和免耕处理下土壤呼吸速率较降雨前即时降低了88.1%和35.8%,降雨后,分别下降89.2%和60%,传统耕作下比免耕下低75.5%(图2,表1)。第二次(7月18日)降雨量24.4mm,土壤含水量由31.4%微升至33.9%。降雨发生时,传统耕作下即时土壤呼吸速率比雨前下降92.9%,免耕下降低56.9%。降雨后,传统耕作和免耕处理下土壤呼吸日平均速率比下雨前分别下降41.5%和15.7%。第三次(7月21—22日)降雨量高达54.9mm,土壤含水量由31.2%上升至33.8%,传统耕作和免耕处理下土壤呼吸速率分别即时下降了62.9%和46.5%,降雨后,土壤呼吸日平均速率比降雨前分别下降31.5%和20.8%。

表1 降雨前后两种耕作处理土壤呼吸日平均速率($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)的变化

Table 1 The change of soil respiration rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) of two tillage treatments before and after rainfall

降雨序列 Rainfall sequence	传统耕作 Tillage		降幅/% Decreasing range	免耕 No-till		降幅/% Decreasing range
	雨前	雨后		雨前	雨后	
	Before rainfall	After rainfall		Before rainfall	After rainfall	
第一次 First time	2.84±0.09	0.31±0.08	89.21	2.15±0.03	0.86±0.23	59.98
第二次 Second time	1.27±0.39	0.74±0.26	41.54	1.93±0.42	1.63±0.31	15.66
第三次 Third time	1.52±0.45	1.04±0.43	31.45	2.45±0.4	1.94±0.69	20.81

2.2 土壤呼吸速率与土壤温度及含水量的关系

2.2.1 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

传统耕作和免耕处理下土壤呼吸速率均随土壤温度的上升而逐渐增大,有显著的线性关系(图3)。土壤5cm温度分别解释了传统耕作和免耕处理下土壤呼吸速率变化的55.5%和36.2%(图3)。土壤温度每上升1℃,土壤呼吸速率于传统耕作处理下增加 $0.36 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,免耕处理下增加 $0.18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,可见免耕处理下土壤呼吸较传统耕作更不易受到温度变化的影响。

2.2.2 土壤呼吸速率与土壤含水量的关系

根据 I_w 值(表2),选取7月4日与7月7日土壤呼吸速率数据分析第一次强降雨(7月8—9日)前土壤呼吸与土壤含水量间的相关关系,选取7月14—17日、21—22日及25日数据分析进入雨季后土壤呼吸速率与土壤含水量的关系。第一次强降雨之前,两个处理0—5cm土壤体积含水量均小于20%,此时土壤呼吸与水分的关系如图4所示。传统耕作与免耕下玉米田土壤呼吸随着土壤含水量的增加而增大,两个处理下呼吸速率和土壤水分均呈线性相关关系($P < 0.05$)。第一次强降雨之后,两个处理0—10cm土壤体积含水量持续

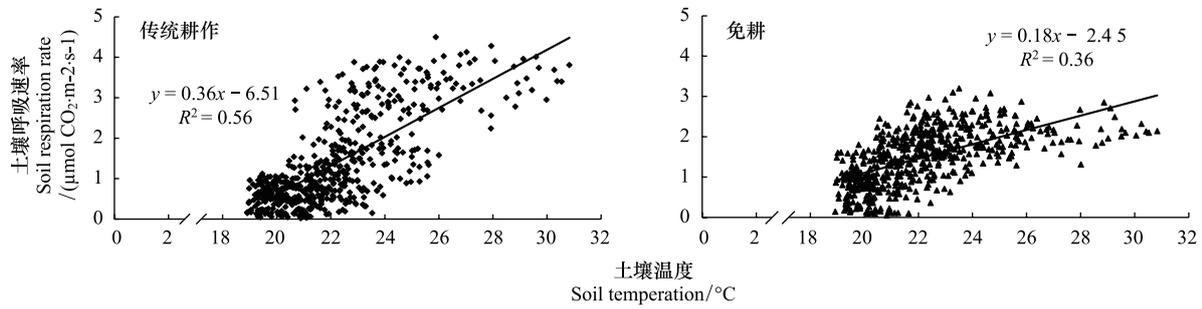


图3 不同耕作处理的土壤呼吸速率对5 cm 土壤温度变化的响应

Fig.3 Relationship between soil respiration rate in different tillage treatments and soil temperature at a depth of 5 cm

a:传统耕作 tillage;b:免耕 no-till

较高,在30%—35%之间变化。两个处理下土壤呼吸均随土壤含水量的增加而降低,免耕处理的斜率更大(图4)。

表2 7月2日至7月26日再加湿系数表

Table 2 Rewetting index (Iw) from July 2 to July 26

日期 Date	IW	日期 Date	IW	日期 Date	IW
7/2	*	7/11	0.56	7/20	*
7/3	*	7/12	0.60	7/21	-0.08
7/4	-0.85	7/13	0.96	7/22	1.95
7/5	*	7/14	-0.04	7/23	*
7/6	*	7/15	-0.13	7/24	*
7/7	-0.50	7/16	0.08	7/25	-0.57
7/8	0.17	7/17	0.06	7/26	-0.20
7/9	2.68	7/18	0.32		
7/10	1.31	7/19	*		

* 为无降雨日期

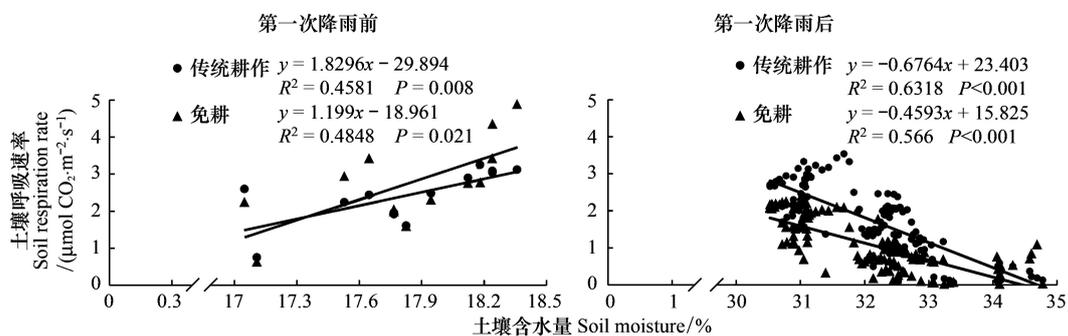


图4 土壤呼吸速率对5 cm 土壤水分变化的响应

Fig.4 Relationship between soil respiration rate and soil moisture at a depth of 5 cm

图 a:第一次降雨前 before the first rain,图 b:第一次降雨后 after the first rain;T:传统耕作 tillage;NT:免耕 no-till

2.2.3 土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量的协同关系

用公式(4)拟合的不同耕作处理下土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量之间关系的线性方程的系数列于表3。从拟合结果可知,温度和水分对土壤呼吸速率有极显著的综合影响。传统耕作下土壤呼吸速率与土壤温度、含水量的双因子线性模拟效果优于单因子模型,表明采用双因子模型描述土壤呼吸较为可靠。传统耕作处理下土壤呼吸速率对土壤5cm 含水量和温度响应的决定系数为0.83,高于免耕处理(0.37)。

表 3 基于土壤水分和土壤温度的土壤呼吸速率模型参数

Table 3 Parameters of soil respiration rate models based on soil temperature and soil moisture

处理 Treatment	a	b	c	R^2	Sig
Tillage	0.14	-0.12	1.82	0.83	$P < 0.001$
No-till	0.13	-0.02	-0.81	0.37	$P < 0.001$

3 讨论

3.1 降雨事件对免耕处理下土壤呼吸的影响

降雨引起土壤温度、水分的变化对土壤呼吸的影响较为复杂,不同地区降雨模式各异、地理条件和植被不同可能导致了研究所得结论的不同。有研究表明,降雨后农田土壤呼吸迅速降低^[24],在巴西亚马逊河流域东部森林和草原也观测到了降雨发生后土壤呼吸减弱^[18]。在美国 Konza 草原的研究表明降雨明显抑制土壤呼吸^[25]。在巴拿马潮湿的热带常绿林 17mm 的降雨过后,土壤呼吸较雨前降低 29%^[26]。模拟降雨明显抑制了澳大利亚西北干旱地区的土壤呼吸^[27],这是因为降水后土壤空隙被水分占据,阻止了气体扩散,抑制了土壤呼吸^[28]。王健林等^[29]研究表明对麦田过量灌溉会抑制土壤呼吸,当一次或者连续降雨累积量超过一定阈值(7—8mm),或土壤体积含水量大于 29%—30%时,土壤呼吸受到明显的抑制^[30]。本研究在黄土高原雨养农业区,对实施传统耕作和免耕处理下 3 次典型降雨前后玉米土壤呼吸进行了全天候测定,发现降雨事件抑制了土壤呼吸,传统耕作处理下土壤呼吸对降雨更为敏感,而免耕下土壤呼吸变化受降雨影响小,这可能是由于长期免耕后土壤孔隙结构稳定,与空气接触面积变小,阻碍了气体排放,CO₂ 气体排放速率降低幅度较小所致。

然而,Chen 等发现降雨明显激发了典型草原土壤呼吸^[31],也有研究认为土壤呼吸在降雨刚开始时会突然增强^[32]。我们的观测表明,降水瞬间土壤呼吸应激减低。当土壤水分田间持水量的 62%时,降雨导致的土壤呼吸速率下降幅度明显高于土壤水分饱和时,这可能是第一次降雨前土壤更为干燥,而在后两次降雨前较为湿润,降雨事件提高了土壤水分含量,导致土壤呼吸增强^[33]。

3.2 影响土壤呼吸的关键因子分析

降雨事件对土壤呼吸的抑制来自土壤水分和温度的共同影响,本研究中传统耕作下土壤温度解释了 56%的土壤呼吸速率变化,免耕下为 36%。免耕下土壤水分单一因子可解释土壤呼吸变异的 47%,表明在干湿交替的条件下,土壤含水量是影响土壤呼吸的主要因子,而土壤温度相对次要。在多雨高温的夏季,土壤含水量是影响土壤呼吸变化的主导因子,这与 Chen 对混合林地夏季土壤呼吸特征研究的结论一致^[34]。

有研究指出当土壤水分超过田间持水量时,土壤 CO₂ 释放量会减少^[35],本研究采用二次曲线模型对土壤呼吸与土壤含水量的模拟表明,CO₂ 释放与临界土壤含水量有关,临界土壤含水量之下,土壤含水量增加表现为改善土壤环境,促进微生物和根系的活动;临界土壤含水量之上,土壤含水量增加则表现为堵塞土壤孔隙,阻碍氧气向土壤中扩散的同时阻碍了 CO₂ 向空气溢出,从而抑制微生物和根系的活动^[36]。已有研究表明,黄土高原旱作玉米农田土壤呼吸拐点出现时,其土壤含水量尚未达到田间持水量^[37],支持了本研究的发现。临界土壤含水量在传统耕作下低于免耕处理,可能是因为传统耕作下土壤有机碳含量(8.35±0.26) g kg⁻¹ 相对免耕(9.37±0.26) g kg⁻¹ 下为低^[38],相对较低土壤水分即可对土壤呼吸的底物及产物与空气间产生较强的阻离效应。

4 结论

(1) 黄土旱塬区玉米田的土壤呼吸在降雨后迅速降低,之后逐渐恢复;免耕处理下土壤呼吸的降低程度小于传统耕作。

(2) 玉米田土壤呼吸与土壤温度线性相关,传统耕作处理下土壤呼吸随土壤温度的升高而增大,免耕处

理下土壤呼吸随土壤温度的升高变化不明显。

(3) 玉米田土壤呼吸与土壤水分线性相关,土壤体含水量较小(<20%)时,不同耕作处理下土壤呼吸均随土壤含水量增加而增加,含水量较高(>30%)时则均随土壤含水量的升高而减小,两种情况下均为免耕处理的变化速率更大。

(4) 双因子线性模型可较好地描述玉米田土壤呼吸对温度和水分变化的响应。

参考文献(References):

- [1] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1625-1635.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [3] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 刘军, 赵磊. 农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(12): 1-7.
- [6] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [7] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 601-610.
- [8] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, Knight R W, Jamason P F, Hennessy K J, Suppiah R, Page C M, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev V N, Douglas A, Førland E, Zhai P M. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 243-283.
- [9] IPCC. Summary for policymakers // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [10] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 宋文质, 刘文兆, 李双江, 庞军柱, 欧阳志云. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应. *生态学报*, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [11] Xu L K, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(1/2): 79-96.
- [12] 陈强, 郭修武, 胡艳丽, 毛志泉. 淹水对甜樱桃根系呼吸强度和呼吸酶活性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1462-1466.
- [13] Chen S P, Lin G H, Huang J H, Jenerette G D. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2450-2461.
- [14] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, Derner J D, Ingram L J, Stahl P D. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(6): 1421-1431.
- [15] 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 刘世忠, 段洪浪, 陈小梅, 张德强. CO₂ 浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1023-1033.
- [16] 李玉强, 赵学勇, 刘新平, 尚雯, 冯静, 苏娜. 樟子松固沙林土壤碳截存及土壤呼吸对干湿变化的响应. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 282-287.
- [17] Davidson E A, Verchot L V, Cattânio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [18] Deng Q, Hui D F, Zhang D Q, Zhou G Y, Liu J X, Liu S Z, Chu G W, Li J. Effects of precipitation increase on soil respiration: A three-year field experiment in subtropical forests in China. *PLoS One*, 2012, 7(7): e41493.
- [19] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 宋文质, 刘文兆, 李双江, 朱元骏, 庞军柱, 欧阳志云. 干湿交替格局下黄土高原小麦田土壤呼吸的温湿度模型. *生态学报*, 2009, 29(6): 3028-3035.
- [20] 陈强, 孙涛, 宋春雨. 免耕对土壤物理性状及作物产量影响. *草业科学*, 2014, 31(4): 650-658.
- [21] 禄兴丽, Tanveer S K, 廖允成, 温晓霞. 不同耕作措施下夏玉米生长季农田 CO₂ 排放速率及其与土壤温度的关系. *西北农业学报*, 2013, 22(6): 53-59.
- [22] 杨倩, 张清平, 蒋海亮, 杨德雄, 王先之, 沈禹颖. 保护性耕作对黄土旱塬玉米土壤呼吸及微生物数量的影响. *草业科学*, 2012, 29(12): 1810-1815.
- [23] Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, Meiresonne L, Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a

- temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*, 2003, 23(18): 1263-1270.
- [24] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1): 29-39.
- [25] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knapp A K, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 322-334.
- [26] Kursar T A. Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama. *Plant and Soil*, 1989, 113(1): 21-29.
- [27] McIntyre R E S, Adams M A, Ford D J, Grierson P F. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1), 92-101.
- [28] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures; Interactions with soil moisture contents and soil CO₂ concentrations. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 215-221.
- [29] 王建林, 赵风华, 欧阳竹. 灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响. *华北农学报*, 2010, 25(3): 186-189.
- [30] 王旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 杨桂霞, 辛晓平. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响. *生态学报*, 2013, 33(18): 5631-5635.
- [31] Chen S P, Lin G H, Huang J H, He M. Responses of soil respiration to simulated precipitation pulses in semiarid steppe under different grazing regimes. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(4): 237-246.
- [32] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, Beese F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1205-1216.
- [33] Lee X H, Wu H J, Sigler J, Oishi C, Siccama T. Rapid and transient response of soil respiration to rain. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 1017-1026.
- [34] Chen W J, Xin J, Zha T S, Wu B, Zhang Y Q, Li C Y, Wang X P, He G M, Yu H Q, Chen G P. Soil respiration in a mixed urban forest in China in relation to soil temperature and water content. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 63-68.
- [35] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52(5): 912-915.
- [36] Pangle R E, Seiler J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont. *Environmental Pollution*, 2002, 116(S1): S85-S96.
- [37] 高翔, 郝卫平, 顾峰雪, 郭瑞, 夏旭, 梅旭荣, 李洁. 降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响. *生态学报*, 2012, 32(24): 7883-7893.
- [38] Yang Q, Wang X, Shen Y, Philp J N M. Functional diversity of soil microbial communities in response to tillage and crop residue retention in an eroded Loess soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(3): 311-321.